

CAPÍTULO 11

Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica

Patricio García-Fayos

Resumen. *Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica.* La eliminación de la vegetación es la principal causa de degradación del suelo y de la pérdida de su capacidad de tolerar la erosión en el bosque y matorral mediterráneos. Y esto es así porque el suelo queda desnudo y sufre las consecuencias del impacto de las gotas de lluvia y del aumento de la escorrentía, produciéndose una pérdida neta de suelo y de su capacidad de mantener la vida. Cada suelo, en función de sus características, de su localización en el paisaje y del régimen climático, posee un umbral crítico de equilibrio entre la erosión que soporta y la vegetación que puede mantener. Si se sobrepasa, el sistema entra en una espiral de disminución de la cobertura vegetal y aumento de la erosión que puede conducirle a un estado irreversible de desertificación. La erosión hídrica se puede considerar una fuerza ecológica que influye sobre la composición de la vegetación y su patrón espacial al producir el desarraigo de plantas y el arrastre de semillas y modificar las propiedades del suelo. Con la agudización de los procesos de erosión, la cobertura vegetal y la diversidad disminuyen. Las escasas plantas que se desarrollan son un subconjunto de las que ya aparecen en zonas cercanas menos degradadas. Sin embargo, aumenta la proporción de especies que presentan características funcionales que les confieren mayor resistencia a los procesos erosivos y a sus consecuencias. El planeamiento y ejecución de planes de gestión del bosque y matorral mediterráneo, como repoblaciones, limpiezas del matorral, fuegos prescrito y construcción de pistas y carreteras, debe tener en cuenta sus consecuencias sobre la estabilidad de las laderas y sobre el suelo. Si dichas acciones desencadenan procesos de erosión agudos, pueden comprometer inclusive su finalidad, que no debe ser otra que la conservación del suelo, agua y seres vivos.

Abstract. *Interactions between vegetation and soil erosion.* When the vegetation is removed, then the soil surface is affected by the impacts of rainfall drops and water runoff grows up, increasing soil erosion and then decreasing the ability of soil for maintain life. In Mediterranean conditions, each soil in a slope can reach a stable equilibrium between erosion rates and vegetation development depending on the characteristics of the soil, its position on the slope and on climatic characteristics. If the balance between soil erosion and vegetation is broken down, then the system makes unstable and comes on a feedback of erosion increase-vegetation loss to an irreversible stage of desertification. Soil erosion by water produces plant and seed losses. On the other hand, soil erosion affects important soil surface properties for plant establishment and development, such as soil water and nutrient reserves. Then, soil erosion by water must be considered an ecological driving force affecting composition and spatial pattern in plant communi-

ties. When soil erosion increases, then the vegetal cover decreases and diminishes the number of species living in. The set of plant species than the can found in the areas with increasing erosion is a subset of the pre-existent flora. However, when erosion increases there is also an increase in the proportion of species that have functional traits conferring them resistance to soil erosion. The design and performance of have into management actions in Mediterranean forests and shrublands such as forestation, forest cut and clearing, prescribed fires, forest tracks and roads, etc. need to be in account their potential negative effects on slope stability, vegetation and soil. These actions could produce an increase in water runoff and soil erosion with future consequences on the composition and structure of the vegetation.

1. Introducción

1.1. *La erosión hídrica*

Habitualmente nos referimos a la erosión como un fenómeno negativo, derivado de la acción del hombre. Sin embargo, se olvida frecuentemente que la erosión es un proceso natural controlado por la gravedad, a través del cual los relieves e irregularidades de la corteza terrestre se equilibran. Cuando el relieve de cualquier parte de la tierra sobrepasa un valor del ángulo de pendiente, el cual es característico para cada tipo de roca, regolito o suelo, la presión que ejerce la gravedad es tal que supera a la fuerza de cohesión y se producen derrumbes o los materiales caen pendiente abajo. Conforme la pendiente disminuye, esa presión es menor y los materiales son entonces mayoritariamente evacuados por el efecto de arrastre del agua. En esta última fase, si los materiales aumentan su cohesión superficial o se protegen de la acción del agua –como ocurre cuando se desarrolla la vegetación–, el proceso de rebajamiento del ángulo de la pendiente se frena. Posteriormente, cualquier desequilibrio de este perfil bien sea por una elevación del terreno derivada de la actividad tectónica, por el encajamiento de la red fluvial o por incisiones en las laderas producidas por la actividad humana, tenderá de nuevo al equilibrio convirtiéndose en una superficie erosiva.

La erosión es un proceso que se puede dividir en tres fases. La primera es el desprendimiento de partículas o porciones de roca madre o bien la rotura de los agregados del suelo. Este desprendimiento se produce habitualmente por la mera acción de la gravedad o con la ayuda de fuerzas como la acción del viento, del agua o del hielo; mientras que la rotura de agregados del suelo se produce por el impacto de las gotas de lluvia o granizo. En una segunda fase, estas porciones y partículas desprendidas son transportadas por la acción de los agentes erosivos, principalmente por la gravedad, el agua y el viento. Durante su transporte, las partículas pueden actuar a su vez como agentes abrasivos que al impactar sobre la roca o el suelo provocan el desprendimiento de nuevas partículas o la rotura de otros agregados del suelo. Por último, en la tercera fase, se produce la deposición de las partículas cuando la energía de los agentes de transporte no es suficiente para seguir arrastrándolas o cuando éstas son retenidas en las irregularidades del terreno o por la vegetación. Cada una de estas fases está controlada por multitud de factores como el clima, la litología, la pendiente o los seres vivos y se rige por las leyes físicas que determinan el comportamiento de los distintos agentes que intervienen. La erosión es, por tanto, un fenómeno natural que debe enmarcarse en la interfase entre la litosfera, la atmósfera y la biosfera, y cuya principal fuerza motriz es la gravedad. Sin embargo, el hombre ha agudizado voluntaria o involuntariamente los procesos erosivos a través del aprovechamiento secular de los recursos naturales. Así, la puesta en cultivo, los incendios forestales y la construcción de infraestructuras, o más localmente, el pisoteo de los animales, el arrastre de troncos o piedras y el paso de maquinaria son algunos ejemplos a partir

de los cuales se pueden desencadenar episodios erosivos importantes en laderas que ya se encontraban en un punto de equilibrio o muy cerca de él. En este contexto, la erosión del suelo se considera uno de los factores que contribuyen a la desertificación; entendida ésta como la pérdida de capacidad de los suelos de sustentar la vida.

Como ocurre con otros procesos naturales, la erosión actúa a escalas espacio-temporales muy dispares. Espacialmente abarca desde el nivel microscópico, como es la escala de los agregados del suelo, en un extremo, hasta el continental en el otro, con todas las posibilidades intermedias. En cuanto a la escala temporal, existen episodios de muy corta duración, como una tormenta que dura unos minutos, pero hay otros que pueden durar años o siglos, como el encajamiento de la red fluvial, o se miden por miles o millones de años, como el dismantelamiento de una cordillera. La interdependencia de los factores que controlan la erosión, el amplio orden de magnitud de las escalas espacial y temporal en que se manifiesta el proceso y, como consecuencia, la variación del peso relativo de cada uno de dichos factores en cuanto a los diferentes rangos de escalas de tiempo y espacio que se consideren, hacen de la erosión un fenómeno complejo y con variadas manifestaciones.

1.2. Procesos, mecanismos y factores de erosión hídrica en laderas mediterráneas

En los ecosistemas mediterráneos, la erosión producida por la lluvia y la circulación del agua por laderas, ramblas y ríos son cuantitativamente los procesos más destacados y los mejor estudiados (Sala *et al.* 1991, Grove y Rackham 2001). Todos estos procesos pueden estar ligados entre sí, aunque no siempre. Así, cuando se produce circulación de agua por los cauces fluviales se está produciendo transporte de sedimentos que han sido erosionados por la lluvia aguas arriba, al tiempo que se puede producir también erosión y sedimentación en el cauce y sedimentación aguas abajo o en el mar. Sin embargo, en otras ocasiones se producen precipitaciones que causan erosión en las laderas pero gran parte del agua y de los sedimentos quedan retenidos antes de circular por los cauces o sedimentan en el propio cauce fluvial.

Aunque la capacidad de las aguas fluviales de modelar el paisaje es sin duda mayor –sólo hay que echar un vistazo a nuestra geografía de barrancos, ríos, ramblas y llanuras aluviales–, la pérdida de suelo de las laderas por acción de la lluvia y la escorrentía se considera también importante. A este último proceso, habitualmente conocido como **erosión hídrica**, es el que vamos a referirnos en este capítulo, y su importancia radica en que afecta a un recurso de muy baja tasa de renovación que se sitúa en la base de los ecosistemas.

Los mecanismos relacionados con la erosión hídrica de los suelos en laderas son tres: el impacto de las gotas de lluvia, la acción de la escorrentía y los movimientos en masa. Las gotas de lluvia al impactar sobre el suelo desprotegido pueden romper los agregados que conforman la estructura superficial del mismo, transportando a distancia trozos de los mismos o las partículas minerales que los constituyen por efecto de la salpicadura. La escorrentía se produce cuando el suelo no es capaz de absorber toda el agua que está recibiendo en un momento dado y se origina un manto de agua que fluye ladera abajo arrastrando las partículas desprendidas y arrancando a su vez nuevas partículas. Se genera habitualmente durante lluvias intensas o duraderas. Rara vez este manto de agua es regular. Lo habitual es que no lo sea y que remueva más sedimentos de unos sitios que de otros de manera que, si esta heterogeneidad espacial de la acción del agua persiste, llega a formar regueros e incluso cárcavas. La heterogeneidad de la escorrentía se genera por la propia irregularidad del terreno, la cual depende a su vez de la topografía y de la presencia de obstáculos –piedras, plantas y rocas–. En estos dos mecanismos expuestos, el agua afecta a los primeros milímetros o centímetros del suelo,

arrancando y arrastrando las partículas. Sin embargo, en los movimientos en masa el agua satura hasta varios metros de profundidad al suelo o sedimentos, produciendo que éstos se conviertan en un auténtico fluido viscoso que al exceder el punto de cohesión con el resto de los sedimentos de la ladera fluyen por efecto de la gravedad. Entre los tres procesos expuestos hay diferencias importantes de magnitud. Así, mientras que el impacto de una gota de lluvia es el mecanismo más frecuente en el tiempo, la magnitud de la erosión que produce es muy baja (10^{-1} g) pero afecta a una vasta superficie (10^4 a 10^8 m²). En el caso de la escorrentía, es menos frecuente en el tiempo y se concentra más espacialmente (10 a 10^6 m²) aunque su magnitud ya es considerable, sobre todo si se incluyen las cárcavas (10^3 a 10^6 g). Por último, en el caso de los movimientos en masa, su frecuencia temporal y su escala espacial son las más bajas de todas (10 a 10^3 m²) pero su magnitud puede ser tremenda (10^9 a 10^{12} g).

Tanto los modelos teóricos como los trabajos experimentales reconocen la influencia de diversos factores sobre el desencadenamiento de la erosión hídrica. Estos son principalmente la agresividad de las precipitaciones o erosividad, la resistencia del suelo a la desagregación o erosionabilidad, la forma del relieve, el uso del suelo y las características de la vegetación (Cuadro 11.1). En condiciones mediterráneas, la agresividad de las precipitaciones es el desencadenante de la erosión hídrica, mientras que el resto de los factores que intervienen en la erosión nos darán las claves de dónde y cuánto se puede erosionar. En este sentido, los movimientos tectónicos, el encajamiento de la red de drenaje, la naturaleza del sustrato geológico y la acción de las perturbaciones –incluyendo la actividad humana–, actuando a través de la inestabilidad de las laderas, de la degradación o pérdida de la vegetación y del aumento de la erosionabilidad del suelo, son los agentes que facilitan o preparan la pérdida de materiales. Estos materiales no son removidos o sólo lo son ligeramente durante la mayor parte de las precipitaciones y generalmente ni siquiera eso; sólo a partir de cierto umbral de intensidad de lluvias es cuando se produce remoción efectiva de los sedimentos. Pero aún más importante, todos los estudios de medición en parcelas o cuencas coinciden en que unos pocos, o incluso muy pocos, aguaceros de elevada intensidad y duración son los responsables de la mayor parte de los sedimentos erosionados. Así, por ejemplo, Bautista (1999) en parcelas de erosión instaladas sobre un pinar quemado en Alicante, encontró que un solo evento extraordinario de lluvia acaecido 5 años después del incendio produjo más del doble de sedimentos que el total de sedimentos recogidos desde que se produjo el incendio. A una escala espacial mayor, otros estudios han revelado también como la coincidencia de períodos torrenciales de lluvia y de deforestación puede explicar la evolución de la forma de laderas y la distribución de los depósitos de sedimentos en cuencas (Calvo y La Roca 1988, Wainwright, 1994). De la misma manera, se han relacionado los episodios de sedimentación del río Júcar con la deforestación de la cuenca acaecida en el siglo XI, con los cambios de uso del suelo en la misma durante los siglos siguientes, con los cambios geomorfológicos en la llanura aluvial y con las anomalías climáticas (Butzer *et al.* 1983).

1.3. Relaciones vegetación-erosión

Tradicionalmente, y como consecuencia probablemente de la falta de un enfoque integrado, el estudio de las relaciones vegetación-erosión se ha limitado a considerar una sola dirección en dicha relación, los efectos de la vegetación en la erosión hídrica, sin tener en cuenta que la erosión también afecta a la vegetación. Así, se ha establecido que la vegetación influye sobre la erosión aumentando la estabilidad de los agregados del suelo y la propia coherencia del suelo, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía. Sin embargo, sólo en contadas ocasiones se han con-

CUADRO 11.1
MODELOS DE EROSIÓN

La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo o USLE (*Universal Soil Loss Equation*) es un modelo que fue desarrollado por Wischmeier y Smith (1965 y 1978) con fines de gestión a partir de datos empíricos de pérdida de suelo obtenidos en multitud de parcelas de cultivo del oeste de Estados Unidos. Su objetivo era cuantificar las pérdidas de suelo útil para la agricultura debidas a la erosión hídrica y relacionarlas con distintos parámetros del suelo y de las propias precipitaciones para poder establecer un modelo que predijera la tasa de erosión a partir de unos pocos factores. Este modelo es:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

E es la pérdida media anual de suelo, generalmente expresada en $Mg \cdot Ha^{-1} \cdot año^{-1}$ porque es como habitualmente se cuantifican los sedimentos recogidos en los aforos de parcelas de erosión o en cuencas. Sin embargo si lo que se mide es el rebajamiento del suelo ésta se puede medir en $mm \cdot año^{-1}$.

R es el factor de agresividad de la lluvia o erosividad y es función de la energía cinética de la precipitación y de la escorrentía que genera. La tasa de erosión se relaciona positiva y fuertemente con la intensidad de la lluvia en eventos tormentosos intensos de corta duración que superan la capacidad de infiltración del suelo. Sin embargo, también se relaciona con la duración de las lluvias en el caso de eventos de larga duración, aunque sean poco intensos, porque acaban igualmente saturando el suelo y generando escorrentía.

K es denominado factor de erosionabilidad y mide la susceptibilidad del suelo a ser desestructurado y arrastrado. La primera propiedad es función del tamaño y del tipo de agregados que conforman la estructura del suelo y de la fuerza con la que están unidas las partículas que forman dichos agregados, la segunda propiedad depende además de la capacidad de infiltración del suelo. Cuanto más débiles sean las uniones de los agregados al impacto de las gotas o al arrastre y cuanto más rápidamente se produzca la escorrentía y mayor sea ésta, mayor también será la erosionabilidad de un suelo. En el modelo USLE, este factor se estima en un monograma a partir de datos como la textura del suelo, contenido de materia orgánica, estabilidad de los agregados, estructura y permeabilidad.

L y **S** son factores ligados a la topografía del terreno y son función de la longitud y ángulo de la pendiente respectivamente. La longitud se refiere a la máxima distancia que puede recorrer libremente la escorrentía en el terreno en donde estamos aplicando la ecuación. Así, cuanto mayores sean el ángulo y la distancia que puede recorrer libremente la escorrentía, mayores podrán ser las tasas de erosión.

C inicialmente se consideró el factor manejo del cultivo, pero por extensión, para suelos no agrícolas, se ha asimilado al valor de protección ejercido por la cubierta vegetal, con cuyo porcentaje de cobertura del suelo se relaciona de manera inversa la tasa de erosión.

P es el factor de prácticas de control de la erosión. Se consideran como tales la formación de bancales, el *mulching*, etc.

Este modelo USLE, aunque revisado y mejorado posteriormente (Sanroque *et al.* 1983, Renard *et al.* 1991 y 1998, Sonneveld y Nearing 2003), ha sido criticado por sus carencias y por la falta de ajuste de las predicciones fuera de las condiciones climáticas particulares en las que fue desarrollado el modelo, incluso cuando se considera un período largo de tiempo. Por ejemplo, no tiene en cuenta la interacción entre los factores implicados, no incluye parámetros hidrológicos y geomorfológicos y no es capaz de cuantificar la erosión en surcos y cárcavas (Morgan 1997). Sin embargo, y por ello se ha expuesto aquí, además de su propio valor intrínseco tiene el valor añadido de haber sido el marco conceptual en el que más frecuentemente se ha estudiado el papel de la vegetación en la erosión y su relación con el resto de los factores que la desencadenan.

En las últimas décadas se ha desarrollado una nueva generación de modelos, mucho más sofisticados y precisos, entre los que destaca el Modelo Europeo de Erosión del Suelo (EUROSEM). Dicho modelo es capaz de simular la erosión, transporte y sedimentación de laderas y pequeñas cuencas para eventos de lluvia individuales incluyendo la erosión en surcos. Sin embargo, todavía no se ha logrado que sea capaz de cuantificar la erosión en cárcavas (Morgan *et al.* 1998).

siderado los efectos que la erosión tiene sobre la vegetación (Thornes 1985). En este sentido, la erosión influye sobre la vegetación directamente, mediante el desarraigo de las plantas y la eliminación y redistribución de las semillas. Pero también influye de manera indirecta, pues los procesos de erosión alteran o eliminan la superficie del suelo, que es donde se produce el establecimiento de las plántulas y donde reside gran parte de la reserva de agua y nutrientes. Bajo ese prisma, la erosión hídrica puede verse como una fuerza ecológica capaz de modificar la composición de la vegetación y su patrón espacial y, por ello, las relaciones entre erosión y vegetación deberían considerarse un aspecto particular del conjunto más amplio de relaciones entre suelo y vegetación.

El estudio de las relaciones entre erosión y vegetación debe tener en cuenta también los mecanismos de retroalimentación que se pueden establecer. Un ejemplo de ello son algunas laderas de elevada pendiente de las áreas montañosas de la península ibérica con cultivos abandonados o que han sufrido importantes cargas ganaderas. Estas laderas se caracterizan por un matorral de escasa cobertura vegetal y por poseer suelos muy poco desarrollados y muy pobres en materia orgánica. En ellas, a pesar de cesar en su acción el agente causante de la degradación e inclusive tener un balance hídrico adecuado, la vegetación y el suelo se mantienen durante muchos años sin cambios importantes (García-Ruiz *et al.* 1991) y ello es debido al equilibrio que se establece entre erosión y desarrollo de la vegetación.

2. Efectos de la vegetación sobre la erosión

Aunque la mayoría de los estudios experimentales y los que se basan en modelos reconocen la multiplicidad de efectos de la vegetación sobre la erosión, la necesidad de simplificación de los análisis acaba, sin embargo, reduciendo el papel de la vegetación a una función del valor de su cobertura. Un ejemplo de ello se produce al analizar a escala planetaria la relación entre erosión hídrica y precipitación anual en condiciones de suelo y vegetación sin manejar. La erosión alcanza el valor máximo en zonas con 300 mm de precipitación. Cuando el volumen anual de lluvia es menor, la erosividad de la lluvia decrece también, pero cuando sobrepasa este umbral, el desarrollo de la vegetación producido por la mayor disponibilidad hídrica supone un freno al proceso erosivo (Morgan 1997). Esta simplificación ha permitido por otro lado una mayor operatividad en la experimentación.

De la experiencia acumulada se ha podido establecer para una gran amplitud de escalas espaciales, tipos de suelo, climas y vegetación que la relación entre la cobertura vegetal y la tasa de erosión hídrica se ajusta a una curva exponencial negativa (Gyssels *et al.* 2004). Así, para un valor de intensidad de lluvia dado, la tasa de erosión disminuye muy rápidamente con pequeños incrementos de la cobertura vegetal hasta alcanzar un punto de inflexión (Figura 11.1). A partir de este punto de inflexión la reducción de las tasas de erosión es cada vez menor aunque los incrementos de la cobertura vegetal sean grandes. Ahora bien, si la intensidad de la lluvia se modifica, la relación entre ambas variables también se modifica, indicando que, al menos cuando se calcula en función de la cobertura vegetal o la biomasa, el papel de la vegetación en el control de la erosión es mayor a bajas intensidades de precipitación que a altas.

Esta relación entre cobertura vegetal y pérdida de suelo, sin embargo, nos dice que la vegetación es importante pero no porqué lo es. ¿Se trata simplemente de un efecto “paraguas” el que explica esa protección por la vegetación? ¿Es la propia complejidad de las plantas, su arquitectura, su efecto sobre las propiedades del suelo, el mantillo o las raíces, los que podrían explicar estas relaciones? Y, a otra escala ¿Es el valor de la cobertura vegetal el que explica

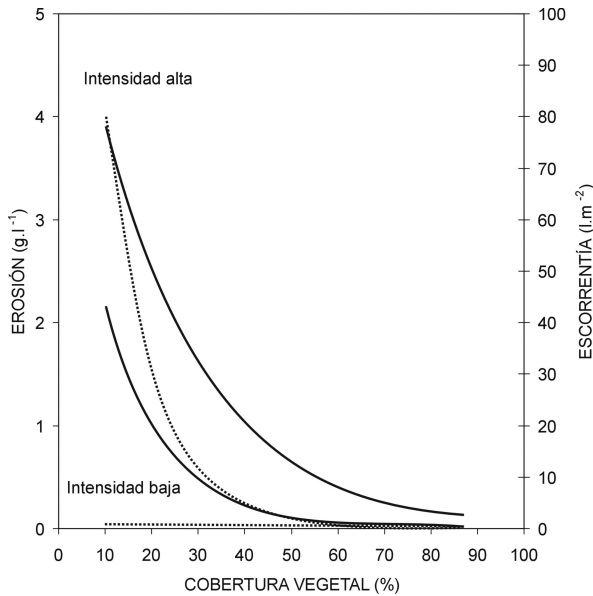


Figura 11.1. Relación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo (línea continua) y con la escorrentía (línea discontinua). Los datos se obtuvieron en parcelas de erosión de 10 m² con matorral mediterráneo a partir de experimentos de simulación de lluvia con intensidad elevada (>100 mm.h⁻¹) y con intensidad baja (<25 mm.h⁻¹) (modificado a partir de Francis y Thornes 1990).

las tasas de erosión y sedimentación o lo explican también la densidad y la distribución espacial de la vegetación? Así pues, el papel de la vegetación podría ser más complejo que la mera relación con la cobertura que se desprende de la Figura 11.2. En este sentido se distinguen dos tipos de efectos de la vegetación sobre los procesos de erosión que nos van a permitir abordar dicho análisis. Por una parte están los efectos sobre el agente erosivo, las precipitaciones, y se concretan en la capacidad de las plantas de interceptar y redistribuir la precipitación así como en influir sobre la capacidad de infiltración del suelo. Por otra parte están los efectos sobre la resistencia del suelo frente a dicho agente erosivo. Es decir, los efectos sobre la estabilidad física del suelo. Esto último se produce tanto en superficie, a través de su papel en la estabi-

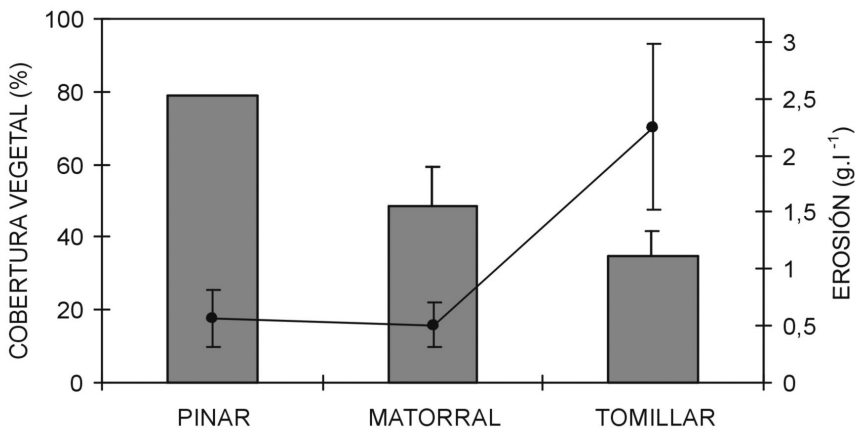


Figura 11.2. Valores de erosión (líneas) en función de la cobertura vegetal (barras) (media ± desviación estándar) para distintos tipos de vegetación obtenidos a partir de simulaciones de lluvia de intensidad elevada (>100 mm.h⁻¹) en parcelas de 10 m². Nótese que la diferencia en la pérdida de sedimentos entre tipos de vegetación no es proporcional a la diferencia de los valores de cobertura de los distintos tipos de vegetación, indicando que están interviniendo otras propiedades de la vegetación además de la interceptación de la lluvia. (A partir de Francis y Thornes 1990).

lidad de los agregados estructurales, como en profundidad, a nivel del sistema radicular, estableciendo una red tridimensional de anclajes entre distintas porciones del suelo.

2.1. Interceptación y redistribución de las precipitaciones

Como hemos mencionado, la protección del suelo por la vegetación se ha hecho depender tradicionalmente de la cobertura vegetal, como si fuera la consecuencia simplemente de la interceptación de la lluvia, en lo que hemos denominado efecto “paraguas”. Sin embargo, este fenómeno de interceptación es más complejo y en parte debería ser asimilado a un efecto “esponja”. Del total de la precipitación incidente, parte es interceptada por las hojas y ramas de las plantas y evaporada desde allí, y parte de ella se redistribuye a través de las estructuras de las plantas hasta llegar de nuevo al suelo (Figura 11.3). El agua que se redistribuye lo hace a través de dos mecanismos, trascolación y escurrimiento cortical. La trascolación es el fenómeno de formación de nuevas gotas de agua, generalmente de mayor tamaño que las gotas de lluvia, que se originan por concentración del agua en las hojas y ramas de las plantas y, desde allí, por efecto de la gravedad escurren cayendo al suelo. El escurrimiento cortical es el fenómeno por el que el agua interceptada se redistribuye por las hojas y ramas pero acaba fluyendo al suelo a través del tronco.

Todos estos compartimientos son función no sólo de la superficie que ocupa la planta sino también de su volumen y de su forma. Cuanto mayor volumen y más complejidad estructural tenga una planta o una comunidad vegetal más importante será su capacidad de interceptación y menores las tasas de erosión, aunque esa capacidad también varía en función de la precipitación caída. En este sentido, diversos autores han encontrado que el pino carrasco (*Pinus halepensis*) intercepta entre el 25% y 50% del total de precipitación anual, pero eventos de lluvia menores de 10 mm son completamente o casi completamente interceptados (Belmonte y Romero-Díaz 1994, Maestre *et al.* 2003). Como un mismo individuo a lo largo de su vida va cambiando su tamaño y su configuración espacial y distintas especies presentan tamaños y formas diferentes, la eficacia en la interceptación de las precipitaciones no es tampoco la misma (Figura 11.4).

Las gotas de lluvia que no son interceptadas por la vegetación y las gotas producidas *de novo* por la trascolación se convierten en un factor de destrucción de los agregados al alcanzar

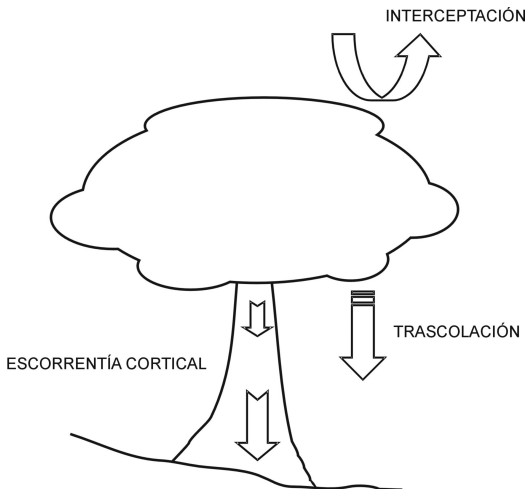


Figura 11.3. Partición relativa de la precipitación por las plantas en distintos compartimientos. **Interceptación:** agua que queda atrapada en las estructuras de la planta y evaporada. **Trascolación:** agua que gotea hasta el suelo por las ramas y hojas. **Escorrimiento cortical:** agua que escurre hasta el suelo por el tronco.

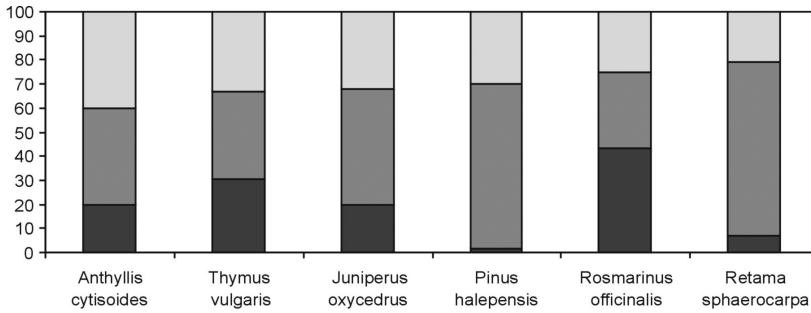


Figura 11.4. Partición relativa de la precipitación por distintas especies mediterráneas. De arriba abajo, interceptación, trascolación y escurrimiento cortical. Datos obtenidos por Belmonte y Romero-Díaz (1988) a partir de observaciones con lluvia natural durante tres años, excepto los datos de *Anthyllis cytisoides* y *Retama sphaerocarpa* que se obtuvieron por Domingo y colaboradores (1998) a partir de observaciones con lluvia natural durante dos años y sólo en primavera.

el suelo. Al impactar las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo, éstos se fragmentan en otros de menor tamaño o en partículas minerales que son más fácilmente arrastradas y que tapan los poros del suelo, sellándolo y favoreciendo, por tanto, la escorrentía superficial. Por otra parte, las gotas de lluvia al impactar sobre el suelo salpican literalmente dichos agregados y partículas en lo que se conoce como efecto salpicadura o *splash*, favoreciendo que éstos sean después arrastrados por el agua de escorrentía. Al mismo tiempo, como el efecto destructivo del impacto de las gotas de lluvia es función de la energía cinética de las gotas, y ésta se relaciona positivamente con la intensidad de la lluvia, a mayor intensidad de lluvia mayores desagregación del suelo por impacto de las gotas. En el caso de la trascolación, la energía cinética depende tanto del tamaño que alcancen las nuevas gotas como de la altura desde la que caigan, de manera que las gotas formadas por trascolación pueden llegar a tener mayor poder destructivo por salpicadura que las propias gotas de lluvia (Rickson y Morgan 1988).

La tasa de erosión por salpicadura se relaciona también negativamente con la cobertura vegetal, sobre todo del mantillo. Sin embargo, para una misma cobertura vegetal e intensidad de lluvia, la talla y la forma de la planta, la superficie foliar, la rigidez y orientación de las hojas y la cantidad y calidad del mantillo inciden sobre las tasas de erosión por salpicadura (Figura 11.5).

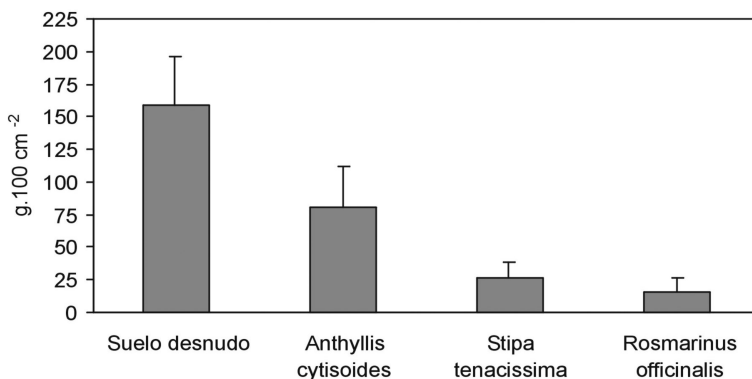


Figura 11.5. Erosión producida por efecto de la salpicadura de las gotas de agua debajo de la copa de distintas especies mediterráneas. Datos recogidos en observaciones con lluvia natural durante dos años (a partir Bochet *et al.* 2002).

2.2. Infiltración y escorrentía

Si no hay circulación de agua en superficie no se produce arrastre de sedimentos y, por tanto, no hay pérdida de suelo neta. Esta agua que circula por la superficie del suelo y que recibe el nombre de escorrentía depende lógicamente de la precipitación caída y del estado y características del suelo y del sustrato. Pero, además, la escorrentía está controlada por la cubierta vegetal.

Las relaciones entre escorrentía superficial y cobertura vegetal son negativas (Figura 11.1), como ocurre con la erosión. Una parte de esta relación se explica por la capacidad de interceptar y almacenar agua que tiene la vegetación y que ya fueron comentadas en el apartado 2.1 y otra parte por el aumento de la capacidad de infiltración del suelo (Casermeiro *et al.* 2004). López-Bermúdez y colaboradores (1984) encuentran valores de infiltración entre 3 y 6 veces superiores en el suelo de un matorral de tomillo (*Thymus vulgaris*) y esparto (*Stipa tenacissima*) cubriendo tan sólo un 45% de la superficie del suelo que en las áreas sin vegetación. Una excepción a este patrón la constituyen los líquenes. En ellos la cobertura del suelo se relaciona positivamente con la escorrentía, debido a que su capacidad de absorción de agua no es tan alta como para compensar el efecto de superficie generadora de escorrentía (Alexander y Calvo 1990).

Propiedades como la textura del suelo, su porosidad, el grado de compactación y su espesor, y otras, como la presencia de grietas en el sustrato, tienen gran importancia en determinar dónde, cuando y en qué medida se infiltra el agua. Y parte de estas propiedades están influidas directamente por la vegetación, a través del aporte de materia orgánica, la dinámica radicular y la estimulación de la actividad biológica del suelo.

A escala de ladera, el agua que no es infiltrada en un punto concreto de la ladera puede infiltrarse unos centímetros o metros más abajo por efecto de cambios en las propiedades del suelo, de la pendiente o por la presencia de piedras o vegetación. Por tanto, el agua de escorrentía y los sedimentos erosionados son la resultante de estas áreas generadoras y receptoras, y hasta hace poco tiempo no se ha investigado la influencia de la distribución espacial de las plantas o de sus agrupaciones sobre el patrón de zonas generadoras y receptoras de escorrentía y sobre el balance final. La vegetación de zonas con clima seco o semiárido tiende a presentarse en forma de un mosaico de manchas y claros. Este mosaico varía en su densidad y disposición espacial entre laderas o incluso dentro de una misma ladera. La existencia de este mosaico modifica el micro-relieve e induce heterogeneidad en las propiedades del suelo y, por tanto, en el patrón de escorrentía a escala de ladera. Ello tiene consecuencias sobre la distribución de la vegetación y las interacciones que se establecen entre especies. Laderas que tengan distinta densidad y tamaño de manchas de vegetación presentarán una distinta distribución espacial de áreas de exportación y de deposición de agua y materiales, resultando en diferencias en las tasas netas de escorrentía y erosión al pie de las laderas (Lavee *et al.* 1998, Puigdefábregas *et al.* 1999). Este mecanismo ha sido invocado para explicar los efectos del sobrepastoreo y de la invasión de arbustos en pastizales y estepas herbáceas de zonas secas y semiáridas. En ambos casos, se pasa de una vegetación con un patrón de grano fino y un sistema de drenaje difuso y con poca capacidad de transporte, a vegetación en mosaico con una mayor diferenciación de los canales de drenaje, concentrándose la escorrentía ladera abajo y aumentando las tasas de erosión. Como consecuencia, se forman costras y pavimentos en las áreas situadas entre las manchas de vegetación que son desfavorables para la colonización vegetal (Schlesinger *et al.* 1990, Maestre y Cortina 2002).

2.3. Resistencia del suelo frente a la erosión

Como ya se ha comentado, las relaciones erosión-vegetación deben verse como un aspecto más de las relaciones entre el suelo y la vegetación. En este sentido, uno de los aspectos básicos para comprender los efectos beneficiosos de la vegetación sobre la erosión es la incorporación de los restos orgánicos al suelo durante la edafogénesis y su contribución a la formación de agregados estructurales del suelo.

La formación de agregados se produce por la aglomeración de partículas minerales del suelo –sobre todo arcillas– a partir de fuerzas meramente físicas, como la floculación, compresión y compactación. Sin embargo la estabilidad de los mismos proviene de la acción cementante que ejercen la materia orgánica, tanto viva –hifas de hongos y raíces– como en descomposición, y algunos coloides minerales, como la caliza activa o los hidróxidos de hierro o aluminio (Tisdall y Oades 1982, Bonneau y Levy 1987). Así pues, la cantidad y calidad de la materia orgánica y de hifas y raíces presentes en el suelo van a tener una relación directa con la estabilidad de los agregados del suelo. Estos agregados son los que conforman la estructura del suelo y por tanto determinan la porosidad del mismo y su capacidad de infiltración, pero al mismo tiempo confieren estabilidad al suelo frente a las fuerzas erosivas y nos dan la medida de la susceptibilidad del suelo frente a la erosión o erosionabilidad (ver Cuadro 11.1). Por consiguiente, cuanto mayor sea la proporción de partículas del suelo que estén agregadas, menores serán las pérdidas por erosión. Por otro lado, cuanto más fuerte sea la unión entre los distintos agregados y entre los componentes de los agregados, menor será su susceptibilidad a ser rotos por el impacto de las gotas o a ser arrastrados por el agua de escorrentía.

Distintos autores han demostrado que, de manera general, los suelos cubiertos de vegetación poseen una mayor proporción de agregados y éstos son más grandes y estables que los de las zonas sin vegetación, manteniendo el resto de las características del suelo homogéneas. Esta relación se produce a partir de la materia orgánica aportada por las plantas (López-Bermúdez *et al.* 1996, Cerdà 1998a), por lo que en campos de cultivo, al abandonarse los aprovechamientos y desarrollarse la vegetación se produce un aumento paralelo de la materia orgánica y de la estabilidad de los agregados (Martínez-Fernández *et al.* 1996, Cammeraat y Imeson 1998). Así, en suelos bajo cubiertas de *Cistus monspeliensis*, *Erica arborea*, *Pinus halepensis* y de *Quercus ilex* y para un rango de tamaños estudiados entre 2 μm y 100 μm , hay hasta un 25% más de agregados mayores de 20 μm y un 25% menos de agregados menores de ese tamaño que en los suelos adyacentes desprovistos de vegetación (Cammeraat y Imeson 1998). Pero además, y en función de las diferentes características químicas de las hojas y de la cantidad de materia orgánica que aportan, distintas especies contribuyen en distinta medida a la estabilidad de los agregados (Figura 11.6). Sin embargo, la estabilidad de los agregados de tamaño más pequeño depende en mayor medida de los componentes minerales del suelo que de la materia orgánica y, por tanto, estarán más influidos por el material geológico en el que se desarrolle el suelo (Boix-Fayos *et al.* 2001). Los agregados del suelo y su estabilidad son, junto con otras, las propiedades que se ven más afectadas por la deforestación y los incendios forestales (Mataix-Solera *et al.* 2002) (Cuadro 11.2).

Los agregados estructurales del suelo se unen entre sí gracias a las raíces de las plantas y las hifas de los hongos, de manera que se crea una estructura compleja de raíces y agregados del suelo que puede perdurar incluso cierto tiempo después de ser eliminada la parte aérea de las plantas (Tisdall y Oades 1982). El efecto mecánico de la cohesión producida por las raíces es muy importante no sólo frente a la erosión por salpicadura y por escorrentía sino también frente a otros tipos de erosión. Cuando el flujo de agua de escorrentía se concentra en los

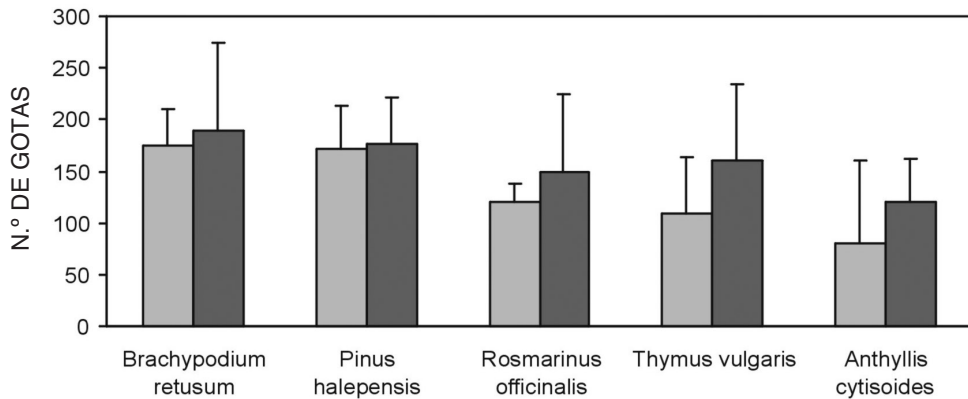


Figura 11.6. Estabilidad de los agregados del suelo bajo distintas especies de matorral mediterráneo. Los valores son la media y la desviación típica del número de gotas de lluvia necesarias para romper un agregado seco (barra de la izquierda) o húmedo (barra de la derecha) (a partir de Cerdà 1998a).

mismos sitios es frecuente que termine excavando surcos y cárcavas, sobre todo en materiales geológicos de naturaleza margo-arcillosa. En estos casos, la existencia de un entramado de raíces tanto en superficie como en profundidad confiere estabilidad al suelo. En uno de los pocos trabajos en que se ha analizado este efecto se encontró que la erosión en surcos y cárcavas decrece exponencialmente con el incremento de la densidad de raíces (Gyssels y Poesen 2003). Por tanto, no sólo la existencia de raíces, sino también su tamaño, densidad y distribución vertical de las mismas influyen sobre la estabilidad del suelo frente a la erosión (Greenway 1987).

La densidad de raíces en el perfil del suelo disminuye con la profundidad, pero distintas especies y distintas comunidades vegetales difieren tanto en la densidad como en su distribución en profundidad. Así, Martínez-Fernández y colaboradores (1995), al analizar la cantidad y distribución de raíces en el perfil del suelo en campos de cultivo y en las zonas de matorral adyacente, encontraron que en los 10 centímetros superficiales, el suelo del matorral tenía 4.5 Kg.m^{-3} de raíces y el del campo de cultivo sólo tenía 1.2 Kg.m^{-3} , mientras que a 35 centímetros de profundidad había 0.9 Kg.m^{-3} de raíces en el matorral frente a 0.3 Kg.m^{-3} en el campo de cultivo.

2.4. Erosión en cárcavas y por movimientos en masa

En la erosión por salpicadura, por escorrentía o incluso en surcos, el agua afecta a los primeros centímetros del suelo, sin embargo, en las cárcavas y movimientos en masa el efecto alcanza una mayor profundidad.

La erosión en cárcavas se produce cuando la escorrentía se acumula y concentra en surcos y canales estrechos por períodos cortos de tiempo, de manera que el suelo o los sedimentos se remueven y circulan en profundidad más que en superficie. En este proceso, la naturaleza del sustrato, el volumen de escorrentía y la topografía son los factores clave en el origen de las cárcavas, reconociéndose asimismo la existencia de umbrales que desencadenan la formación de las mismas (Poesen *et al.* 2003). En este sentido, Vandekerckhove *et al.* (2000), muestran que el umbral topográfico que desencadena la formación de las cárcavas en zonas de clima mediterráneo está más influido por la vegetación –tipo y cobertura vegetal– que exis-

CUADRO 11.2

EFFECTOS DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA RELACIÓN VEGETACIÓN-EROSIÓN

Los incendios forestales afectan la relación entre la vegetación y la erosión a distintos niveles. Al perderse la parte aérea de la vegetación, el papel de interceptación desaparece y aunque la capacidad de regeneración de la vegetación mediterránea es elevada y relativamente rápida (ver capítulo 4), los primeros meses tras el fuego el suelo queda completamente desprotegido y las gotas de lluvia golpearán directamente el suelo. Este efecto puede verse amortiguado en las zonas de acumulación de cenizas.

Las elevadas temperaturas alcanzadas durante los incendios producen la combustión de la materia orgánica con la consiguiente disminución de la estabilidad de los agregados del suelo e incluso su destrucción, así como una reducción de la microporosidad. Ahora bien, este efecto es altamente dependiente de la intensidad alcanzada por el incendio como se puede ver en la figura 1.

Aún en el caso que no medien otros efectos negativos, las primeras lluvias arrastrarán las cenizas y las partículas minerales resultantes de la destrucción de los agregados, contribuyendo a sellar la superficie del suelo y a disminuir su capacidad de infiltración. En consecuencia, las tasas de escorrentía y erosión aumentarán como se puede ver en la figura 2. Inclusive, algunos autores han sugerido que la acumulación por lavado de productos de la combustión a cierta profundidad del suelo favorece la formación de una capa hidrófoba que disminuiría drásticamente la infiltración. Aunque este proceso aún está en discusión.

Los distintos estudios realizados sobre el efecto de los incendios en la erosión indican que en incendios de baja intensidad no se producen alteraciones relevantes y la recuperación del suelo es rápida. Cuando el incendio es de intensidad moderada o elevada, la degradación de la estructura del suelo es importante y las tasas de erosión se disparan durante unos años, aunque luego se reducen con la recuperación de la vegetación.

El período de tiempo que tarda el suelo en recuperarse y el grado de recuperación del mismo varía de unos estudios a otros y dependerá de las características de la zona —orientación, pendiente—, de las propiedades iniciales del suelo, de las características de los incendios, de la intensidad y patrón temporal de las precipitaciones que ocurran después y del manejo de esas áreas, tanto previo como posterior (Abad *et al.* 1997, Llovet *et al.* 1994). Durante este período, la fragilidad del suelo es máxima, de manera que una combinación de incendios de alta intensidad o repetidos, con lluvias de extraordinaria intensidad pueden desencadenar graves procesos erosivos (De Luís *et al.* 2003). A veces, aunque no medien episodios de lluvia extraordinarios, las elevadas tasas de erosión persisten durante años, aumentando la degradación del suelo e impidiendo su recuperación hasta los niveles previos al incendio.

Dada la fragilidad de estos sistemas incendiados, cualquier actuación que suponga remoción o compactación del suelo incendiado durante el período de recuperación del mismo contribuirá a aumentar las tasas de erosión y por tanto a alargar el tiempo necesario para que dicha recuperación se produzca o incluso que sea posible alcanzar los niveles previos al incendio.

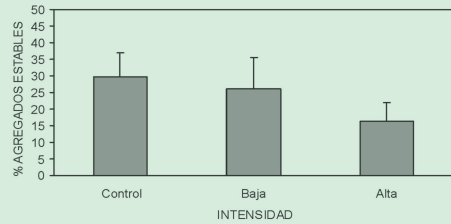


Figura 1. Efecto de la intensidad de los incendios forestales en la estabilidad estructural de los agregados del suelo (a partir de Molina y Llinares 1988).

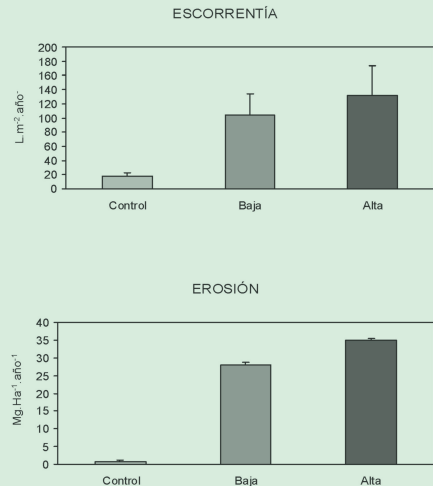


Figura 2. Efecto de la intensidad de los incendios forestales en la escorrentía y erosión durante los 15 primeros meses después del incendio en parcelas con lluvia natural (a partir de Gimeno-García *et al.* 2000)

te en el momento de formarse la cárcava que por el propio clima. Por otro lado, una vez las cárcavas se han formado, la vegetación puede influir en disminuir o incluso detener la actividad erosiva de la cárcava. La vegetación que coloniza el fondo de las cárcavas hace de freno de sedimentos y disminuye la velocidad de circulación –y, por tanto, el potencial de incisión– del agua que circula por la cárcava. En cuencas de montaña de Provenza, Rey (2003) comprueba como la vegetación herbácea (*Calamagrostis argentea*) y de pequeños arbustos (*Ononis fruticosa*) es más efectiva en cumplir este papel que la vegetación arbórea (*Pinus sylvestris*, *Acer opalus* y *Sorbus aria*) y que la actividad erosiva de las cárcavas cesa con coberturas vegetales de 50% en el fondo de la cárcava.

En los movimientos en masa el agua penetra hasta varios metros de profundidad en la ladera saturando los materiales. En unos casos, se produce una saturación diferencial entre distintas capas de sedimentos por efecto de su distinta permeabilidad o por discontinuidades litológicas, de manera que el agua que se infiltra se detiene y forma un plano sobresaturado por el que –debido a la gravedad– se pueden deslizar los sedimentos superiores, son los denominados deslizamientos. En otros casos se satura todo el sedimento y dependiendo de sus características físicas, se puede convertir en un fluido viscoso que fluye cuando la fuerza de la gravedad excede el punto de cohesión con el resto de los sedimentos de la ladera, son las denominadas coladas de barro. Ambos mecanismos están generalmente asociados a lluvias intensas de larga duración y se producen sobre todo en aquellos tramos de las laderas de perfil cóncavo, en los que la escorrentía disminuye su velocidad, y en zonas de terrazas de cultivo (Gallart y Clotet-Perarnau, 1988, La Roca y Calvo 1988). Sin embargo, también se producen movimientos en masa cuando se producen desequilibrios importantes en el perfil de equilibrio de la ladera, sea por efecto de movimientos tectónicos o por excavación de los cauces o la creación de trincheras por acción humana, como en el caso de las canteras, vías de comunicación y transformaciones agrícolas. En estos casos no es necesario la acción del agua para que se produzcan los movimientos en masa y se denominan deslomes o caídas.

En los deslizamientos de ladera, la vegetación no tiene un efecto protector evidente. Se ha comprobado que el plano de rotura en los deslizamientos de ladera a menudo coincide con el final del horizonte de mayor desarrollo radicular. Aunque las raíces son un sistema de anclaje muy importante que cohesiona el suelo y evita su desmoronamiento (Greenway 1987), son también un mecanismo favorecedor de la entrada de agua en el suelo por infiltración y ayudan a crear discontinuidades entre horizontes de suelo con y sin raíces.

3. Efectos de la erosión sobre la vegetación

3.1. Composición y diversidad de especies

La erosión influye sobre la vegetación directamente, a través del descalzamiento de las raíces y de la pérdida directa de plantas, propágulos y mantillo, o bien indirectamente, alterando la estructura del suelo o eliminando la parte más superficial del mismo. Es en este horizonte superficial del suelo donde se produce la germinación de las semillas y el establecimiento de las plántulas y donde reside gran parte de su capacidad para almacenar agua y nutrientes. Por tanto, desde un punto de vista ecológico, la erosión del suelo puede entenderse como un factor perturbador para la vegetación. En sistemas de ladera del centro de la península ibérica este fenómeno ha sido intensamente estudiado, demostrando que la productividad de los pastizales aumenta desde la zona de exportación de sedimentos hasta la receptora y que incluso el desarrollo de una misma especie es comparativamente mayor en las zonas con

menor erosión (Casado *et al.* 1985, Puerto *et al.* 1990). Se puede inferir, por tanto, que aquellas especies que no sean capaces de desarrollarse en estas condiciones no podrán colonizar estos suelos o bien, si ya estaban presentes en ellos, podrán ser desplazadas, de manera que la magnitud y la frecuencia de los eventos erosivos y el momento en que se produce determinarán qué especies pueden establecerse y resistir.

Los estudios realizados hasta ahora han encontrado que con la agudización de los procesos de erosión, la cobertura y la complejidad de la vegetación disminuyen y se produce un empobrecimiento de la riqueza específica (Figura 11.7). Sin embargo, no se ha podido demostrar que existan plantas especialistas en vivir en los medios erosionados ni que exista una sustitución de especies (Guàrdia y Ninot 1992, Guerrero-Campo y Monserrat-Martí 2000). Todos los trabajos coinciden en que las plantas que viven en zonas sometidas a intensa erosión son un subconjunto de las especies que ya aparecen en las zonas menos degradadas de alrededor, sólo que con una menor densidad y diversidad.

Uno de los mecanismos implicados en este empobrecimiento de la vegetación es la pérdida de propágulos por la escorrentía y la erosión (Chambers y MacMahon 1994). Aunque frecuentemente invocado, muy pocas veces ha sido comprobado. En observaciones durante dos años en pequeñas cuencas abarrancadas del interior de Alicante, la tasa anual de pérdida de propágulos no superaba el 13% (García-Fayos *et al.* 1995). Dato que fue corroborado asimismo experimentalmente. A pesar de no ser tan elevadas como se esperaban en ese caso, estos datos ponen en evidencia que la erosión provoca una pérdida considerable de semillas. Además, estos resultados mostraron que la naturaleza de la relación entre las pérdidas de semillas con la erosión y la escorrentía son exponenciales (Figura 11.8). Por tanto, eventos extraordinarios de lluvia, y sobre todo si éstos ocurren durante el período de dispersión de los propágulos o en el periodo inmediatamente posterior a él, podrían poner en dificultad la regeneración vegetal.

En los efectos de la erosión sobre la vegetación, resulta difícil desligar la responsabilidad de los efectos directos, a través del descalzamiento o pérdida de individuos o propágulos, de la responsabilidad de los efectos indirectos que se producen a través de la disminución de la fertilidad y de la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Así, en zonas de intensa erosión por cárcavas del sureste de la península ibérica, la colonización vegetal no está

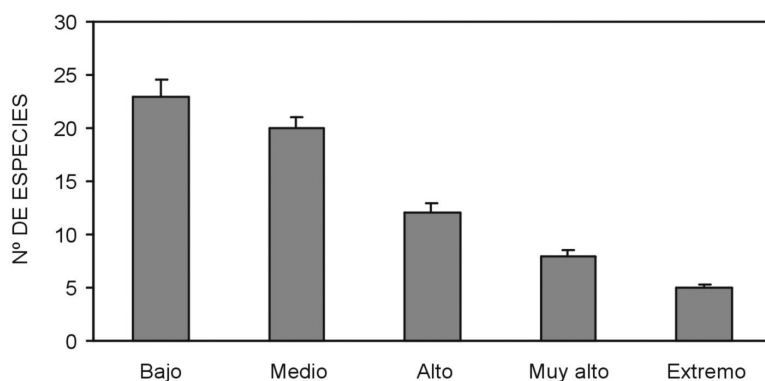


Figura 11.7. Relación entre la intensidad de los procesos erosivos y el número de especies fanerógamas presentes en laderas sobre margas del prepirineo aragonés (a partir de Guerrero-Campo y Montserrat-Martí 2000).

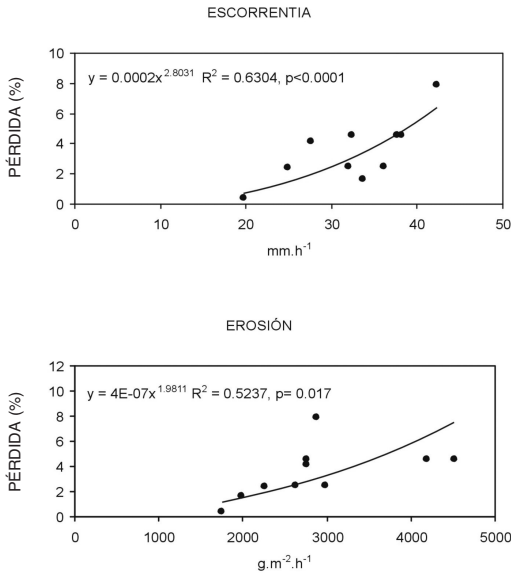


Figura 11.8. Relación entre la pérdida de propágulos y las tasas de escorrentía y erosión. Datos obtenidos en parcelas de campo de 0.24 m² con lluvia simulada de 55 mm.h⁻¹ y mezcla de propágulos de 10 especies (a partir de García-Fayos y Cerdà 1997). El término propágulo designa por extensión a la unidad de dispersión de las especies, que en unos casos coincide con el fruto o incluso infrutescencia y en otros con la semilla.

limitada tanto por la pérdida de semillas o por la mortalidad de plántulas debidas a la erosión, sino por la insuficiente disponibilidad hídrica para la germinación de las semillas de la mayoría de las especies presentes en la flora local y para la posterior supervivencia de las plántulas (García-Fayos *et al.* 1995 y 2000). Esta insuficiente disponibilidad hídrica tiene su origen en las desfavorables propiedades físicas y químicas del sustrato que aflora en superficie una vez que se han erosionado los horizontes superficiales, los cuales poseen propiedades mucho más favorables para la colonización vegetal. Y esto mismo parece ocurrir también en el caso de la colonización de taludes de carreteras sometidos a elevadas tasas de erosión (Bochet y García-Fayos 2004).

3.2. Características morfológicas y funcionales de las especies

Otra aproximación al efecto de la erosión en la vegetación se ha realizado desde la perspectiva de los grupos funcionales de plantas (Ver capítulo 5). Al igual que en el caso de la composición florística, se ha propuesto que algunas características funcionales o morfológicas de las plantas podrían estar siendo seleccionadas por la erosión o bien podrían conferir una mayor resistencia frente a la erosión a las especies que las poseen. Sin embargo, las plantas que viven en ambientes con intensa erosión no sólo están sufriendo las consecuencias de la erosión, sino que tienen que hacer frente también a los problemas derivados de la escasez de nutrientes y agua provocados por la misma erosión. Según algunos autores, es muy difícil para las plantas atender compromisos que tienen que ver con la respuesta a las perturbaciones –en este caso erosión– y a la vez atender otros que tienen que ver con el estrés hídrico o nutricional. Debido a ello, no es de esperar que existan plantas con un grupo de características funcionales especializadas a vivir en estos medios en los que están presentes ambas presiones.

Los resultados obtenidos hasta ahora, han permitido comprobar que, en sustratos margosos con erosión intensa, la proporción de especies con capacidad de propagarse vegetativamente a partir de las raíces aumenta conforme lo hace la severidad de la erosión, aunque disminuyen las que producen estolones (Tabla 11.1). Por razones de la misma índole, la

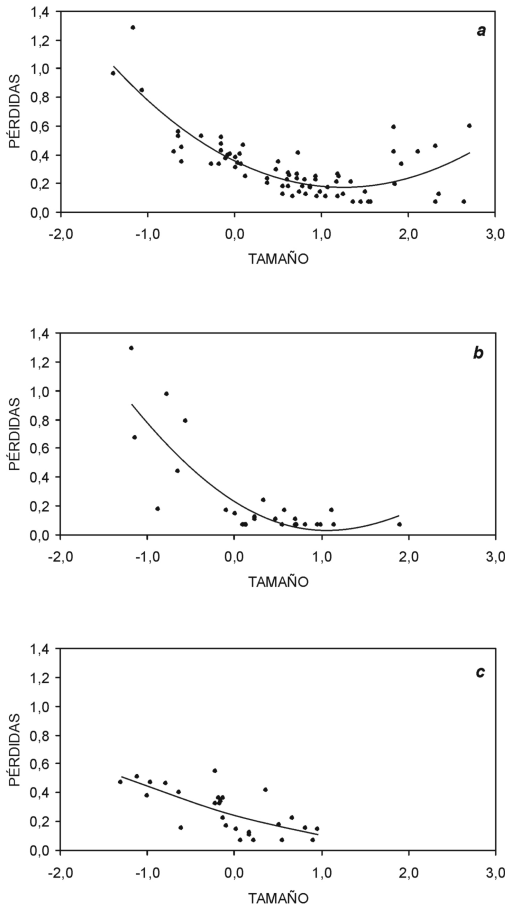


Figura 11.9. Relación entre pérdida de propágulos por arrastre y el tamaño, expresado como peso de los mismos en función de las propiedades de sus cubiertas. **a:** propágulos con superficie externa lisa (75 especies); **b:** propágulos que presentan apéndices como alas, aristas, vilanos y pelos (28 especies); **c:** propágulos que en contacto con el agua segregan un mucílago por el que quedan adheridos al suelo (28 especies). Datos obtenidos a partir de experimentos de laboratorio sobre 5 lotes de 50 propágulos por especie y precipitaciones de $55 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (a partir de Cerdà y García-Fayos 2002 y datos inéditos de Cerdà y Garrigós). Los datos se han transformado matemáticamente. Así pérdida de semillas está expresado como $\arccos(\text{senov}t)$, siendo t tasa de pérdida de semillas por especie, y el peso de las semillas se ha expresado como $\log_{10} p$, siendo p el peso en miligramos.

4. Interacción entre la erosión y la vegetación

Si la multiplicidad de efectos que tiene la vegetación sobre la erosión y los que tiene la erosión sobre la vegetación se ponen en un mismo marco de referencia –geomorfológico, climático, de uso, etc.– la comprensión de los efectos mutuos de ambos factores y su dinámica aumenta. En este sentido, Thornes (1985), reunió en un solo modelo dinámico las interacciones entre vegetación y erosión para los ambientes mediterráneos. El modelo parte de la premisa de que en dichos ambientes la cobertura vegetal puede llegar a ser extremadamente baja debido a razones meramente ambientales –baja e irregular precipitación y elevada evapotranspiración– o debido a las consecuencias de siglos de aprovechamiento humano –fuego, pastoreo y laboreo.

En ausencia de vegetación, las variaciones en la tasa de erosión que se puedan producir en una ladera dada son función de la precipitación (ver apartado 2 y Cuadro 11.1), de manera que conforme aumenta la intensidad y duración de la precipitación, mayores serán las tasas de erosión. Pero este proceso no puede durar indefinidamente y tiende a cero, independientemente de la intensidad y cuantía de la lluvia, debido a dos posibles razones. Una de ellas es que el sedimento disponible para ser erosionado se agote y aflore la roca madre. La otra

razón tiene su origen en que el propio proceso de erosión, al actuar a lo largo del tiempo modifica la topografía de la ladera haciendo que ésta llegue al perfil de equilibrio para las condiciones climáticas y geomorfológicas en las que se encuentra. En el proceso de alcanzar ese punto de equilibrio, la energía necesaria para arrancar y mover nuevos materiales –que proviene de la precipitación y escorrentía– es cada vez más elevada debido a la disminución de la pendiente.

En el caso de la vegetación, la cobertura vegetal también aumenta en función de la precipitación, pero sólo hasta alcanzar un límite en el que aunque la precipitación siga aumentando la cobertura vegetal se mantiene constante. Ello es así porque se ha sobrepasado la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo o por que intervienen otros factores que limitan el desarrollo de la vegetación, como la fertilidad del suelo.

Ahora bien, cuando permitimos interactuar los procesos de erosión y la vegetación en un mismo sistema de referencia –una ladera determinada–, encontramos que la precipitación puede inhibir tanto la vegetación como la erosión, pero al mismo tiempo la erosión puede ser inhibida por la cobertura vegetal y, a su vez, la erosión puede inhibir el desarrollo de la vegetación (ver apartados 2 y 3). En este marco de vínculos con la precipitación, las relaciones entre la erosión del suelo y la cobertura vegetal pueden ser analizadas en un modelo como el de la competencia entre especies por un recurso, en el que las especies competidoras serían la erosión y la cobertura vegetal y el recurso por el que compiten sería el agua.

En la Figura 11.10 se muestra un modelo de relaciones entre los efectos de la vegetación sobre la erosión y los de la erosión sobre la vegetación. El modelo se puede ajustar para cualquier ladera y valor de precipitación y, por tanto, para cada combinación de características geomorfológicas y climáticas. La línea *OAC* representa el valor de cobertura vegetal necesaria para mantener la tasa de erosión en equilibrio para cada uno de los posibles valores de erosión, expresados éstos como espesor de suelo. Desde el origen de coordenadas, y conforme va

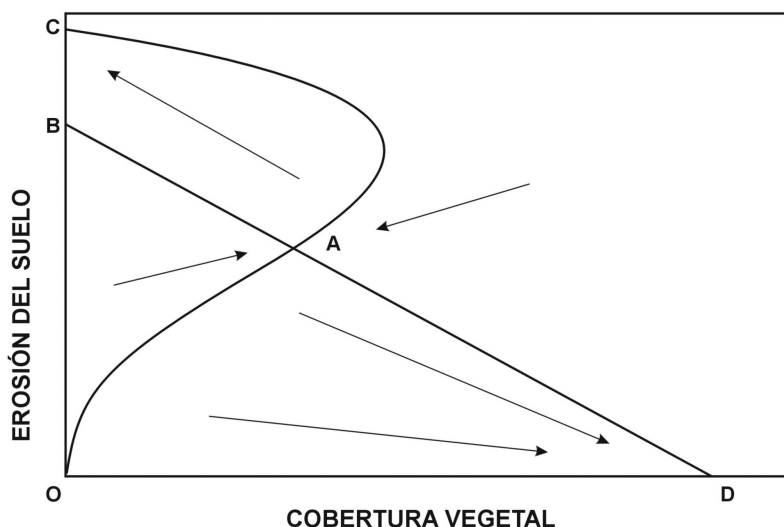


Figura 11.10. Modelo de relaciones entre la cobertura vegetal y la erosión en laderas de ambientes mediterráneos. En este modelo se representan tanto los efectos de la cobertura vegetal sobre la erosión como los efectos de la erosión sobre la cobertura vegetal y la retroalimentación entre ambas (a partir de Thornes 1985, 1988).

umentando el espesor de suelo disponible, aumenta también valor de la erosión y, por tanto, la cobertura vegetal necesaria para que la tasa de erosión se mantenga constante es cada vez mayor. Una vez alcanzado el punto de inflexión de la curva, los valores de erosión son tales que cada vez hacen falta menores valores de cobertura vegetal para mantener la tasa de erosión constante. La línea *BAD* representa, para los distintos valores de cobertura vegetal posibles, el nivel de pérdida de suelo que es capaz de soportar dicha cobertura vegetal y mantenerse en equilibrio. Así, cuando la cobertura vegetal tiende a cero hacen falta elevadas tasas de erosión para mantener dicho valor de cobertura vegetal, mientras que cuando la vegetación ya está muy desarrollada, se mantiene en equilibrio sólo si el valor de la erosión es muy bajo. La intersección entre ambas curvas es el punto *A*, en el que las tasas de erosión y de cambio de la cobertura vegetal están en equilibrio.

A partir del diagrama de la figura 11.10, para cualquier combinación de valores de erosión y cobertura vegetal se puede predecir la trayectoria de cambio esperable en el sistema. Así, cualquier valor de erosión comprendido en el sector *OAD* no afecta negativamente la cobertura vegetal, y ésta tenderá a crecer hacia el punto *D*. De la misma manera, en el sector *CAB* del diagrama, el sistema soporta una tasa de erosión tan elevada que la vegetación no se puede desarrollar e incluso se produce la pérdida de plantas, por lo que el sistema tiende hacia un punto, *C*, que posee el valor más extremo de erosión y el mínimo de cobertura vegetal. Fuera de ambas zonas, cualquier combinación de valores de cobertura vegetal y erosión tenderá hacia el punto de equilibrio *A* y desde dicho punto tenderá hacia *B* o *D*, de una manera que dependerá no tanto de las propiedades del sistema definidas por los parámetros utilizados –tipo y cantidad de vegetación, ángulo y longitud de la pendiente, tipo de suelo, etc.– sino por fluctuaciones climáticas –una sequía, un período húmedo– o por perturbaciones –incendios, cambios de uso, herbivoría, etc.–. Así pues, la línea *OA* constituye un umbral crítico entre situaciones en las que el sistema o bien es capaz de mantener un desarrollo de la vegetación hasta alcanzar el nivel máximo en función del resto de características ambientales y con una tasa de erosión tendiendo a disminuir –derecha de la línea– o bien una situación –izquierda de la línea– en la que el sistema está siendo rejuvenecido continuamente por erosión, la vegetación se va empobreciendo cada vez más, disminuyendo su cobertura hasta llegar inclusive a perderla del todo y manteniendo tasas de erosión muy elevadas.

En consecuencia, además de poder predecir la dinámica concreta de un sistema una vez introducidos los parámetros del mismo, el modelo ha permitido determinar la existencia de un umbral de equilibrio entre la vegetación y la erosión que una vez sobrepasado produce la retroalimentación del sistema agudizándose aún más la erosión e impidiendo el desarrollo e incluso el mantenimiento de la vegetación. Este umbral es específico para cada sistema que definamos. El modelo se puede hacer más complejo incluyendo el factor tiempo, variaciones en la precipitación anual, incluyendo especies de plantas con distintos requerimientos en relación a la precipitación y con distintas consecuencias para la erosión o incluyendo factores que modifiquen la relación entre erosión y vegetación, como el pastoreo, las repoblaciones, las rozas del sotobosque, los incendios, etc. (ver Thornes 1988 y 1990, Thornes y Brandt 1994).

Este punto de vista que interrelaciona las consecuencias de la vegetación en la erosión con las de la erosión en la vegetación permite dar un paso más allá en la interpretación de ciertos paisajes y del marco de interacciones entre especies vegetales que se produce en ellos. Así, la disposición de la vegetación en mosaico o en bandas perpendiculares a la línea de la pendiente en áreas de clima semiárido es el resultado de la interacción del desarrollo de la cobertura vegetal con la escorrentía y la erosión y esta interacción tiene consecuencias para las rela-

CUADRO 11.3

LA INTERACCIÓN ENTRE EL ESPARTO (*STIPA TENACISSIMA*) Y LA EROSIÓN EN SISTEMAS DE LADERA

Los espartales son una de las formaciones vegetales características de las laderas de gran parte del cuadrante sureste de la península ibérica y están dominadas por el esparto (*Stipa tenacissima*), una gramínea perenne de crecimiento centrífugo que forma macollas. En estas áreas coincide una falta de disponibilidad de agua durante gran parte del año, unos ciclos de sequía recurrentes y unas tasas de erosión moderadas producidas por eventos de lluvia intensos que se suceden de manera recurrente también. El desarrollo de estos espartales y las relaciones del esparto con el resto de las plantas en estas laderas son un ejemplo de las consecuencias de las interrelaciones entre vegetación y erosión.

El esparto tiene una gran capacidad para colonizar espacios abiertos y relativamente pobres y tiene un moderado papel como protector del suelo frente a la erosión en relación a otras plantas que conviven en los mismos medios (Bochet *et al.* 1998, Chirino *et al.* 2003). En laderas, cuando se producen eventos de lluvia de intensidad importante, las macollas actúan como trampas para el agua y los sedimentos que circulan ladera abajo (Cerdà 1997, Bochet *et al.* 2000, Cammeraat y Imeson 1999). Cuanto mayor recorrido libre tenga este agua de escorrentía, mayores serán las tasas de transporte de sedimentos. La infiltración de los suelos bajo de las macollas es varias veces mayor que los suelos fuera de ellas gracias al sistema radicular del esparto, de manera que el agua de escorrentía se infiltra en esos puntos y los sedimentos se acumulan formando unas terrazas en la parte superior de las macollas. Estas terrazas son más ricas en nutrientes y agua que el suelo que hay entre las macollas y tienen unas propiedades físicas más favorables para la edafogénesis (Bochet *et al.* 1999). Esto, junto a la presión de los sedimentos depositados en las terrazas permiten crecer a las macollas únicamente en sentido perpendicular a la línea de máxima pendiente. Como han demostrado Sánchez y Puigdefábregas (1994) hay una gran interrelación entre la pendiente de la ladera, la densidad de macollas, el tamaño de las terrazas y el tamaño de las áreas entre macollas, y esta relación está modulada por la precipitación.

Las mejores propiedades del suelo y la mayor acumulación de agua en las terrazas -y eventualmente también de propágulos arrastrados por la escorrentía o el viento-, junto con la protección microclimática ejercida por el propio esparto hacen que en ellas se establezca y sobreviva un mayor número de plantas que en las zonas entre las macollas, y este efecto, conocido como facilitación (Ver capítulo 13) se agudiza durante las sequías prolongadas (García-Fayos y Gasque 2002). Esta mayor ventaja de la terraza para la colonización vegetal se ha postulado, además, como base para un método más eficiente de la revegetación de estas áreas (Maestre *et al.* 2001).

La pendiente de la ladera, la densidad de macollas y el tamaño de las terrazas están interrelacionadas entre sí y a su vez dependen de la precipitación (Sánchez y Puigdefábregas, 1994). Esta red de relaciones constituye un ejemplo de cómo la interacción de los procesos erosivos con el desarrollo de la vegetación determinan la dinámica de estos sistemas, tal y como predice el modelo de interacciones presentado en la figura 11.10.

ciones entre especies de plantas (Cuadro 11.3). En este contexto puede tener sentido plantear la hipótesis de que las relaciones entre las plantas y la erosión suponen un marco evolutivo en el que interpretar no ya cierta característica morfológica o funcional de las especies sino otros aspectos del ciclo biológico de las plantas que viven en estos medios.

5. Implicaciones para la gestión y la conservación

De la información presentada a lo largo del capítulo emergen varias conclusiones que deberían guiar la gestión y restauración de la vegetación en los ambientes mediterráneos.

El primer punto es que es extremadamente importante no perder de vista que la erosión es un fenómeno natural de regulación del relieve. Debido a ello, cualquier ladera sufrirá erosión mientras se encuentre en desequilibrio respecto a la gravedad, independientemente de la vegetación que albergue y de la causa que desencadene el desequilibrio. Pero también, que la eliminación de la cubierta vegetal de cualquier ladera que se encuentre en equilibrio o cerca

de él, desencadenará la erosión del suelo. Y esto es así porque el suelo queda desnudo y sufre las consecuencias del impacto de las gotas de lluvia y del arrastre de la escorrentía, produciéndose una pérdida neta de suelo y en consecuencia una reducción de su capacidad de mantener la vida.

En segundo lugar, la cobertura vegetal se relaciona de manera directa con la protección del suelo, pero no es el único servicio que presta. El aporte de materia orgánica incrementa la estabilidad del suelo y las raíces crean una red que dota al suelo de mayor resistencia frente al arrastre o desplome. En consecuencia, aunque la vegetación ya es un valor por sí mismo contra la erosión, el tipo de vegetación importa.

Un tercer punto es la relación entre la cobertura vegetal y el grado de protección que ésta ejerce frente a la erosión. Se trata de un aspecto relevante en la gestión de la vegetación mediterránea por cuanto permite predecir las consecuencias que pueden tener las actuaciones humanas y las perturbaciones. Por otro lado, además, a partir de distintos tipos de vegetación se puede conseguir el mismo nivel de protección del suelo frente a la erosión, lo que debe tenerse en cuenta en el caso de mediar otras consideraciones, como la riqueza biológica, el balance hídrico, etc. Los datos disponibles indican que existe un valor de cobertura vegetal, el punto de inflexión de la Figura 1, a partir del cual la protección ya no aumenta de manera proporcional al aumento de cobertura vegetal. Sin embargo, este punto requiere de una precaución adicional. Los resultados obtenidos hasta ahora son tan dependientes de la escala a la que se realizaron los experimentos u observaciones que resulta difícil establecer con precisión este punto de inflexión. Así, para vegetación del sureste de la península ibérica se ha podido encontrar que a escala de parcela de simulación ($<1 \text{ m}^2$) este punto de inflexión está situado alrededor del 25% (Calvo *et al.* 1992, Cerdà 1998b), para parcelas de simulación mayores (10 m^2), este punto se sitúa alrededor del 20% (Francis y Thornes 1990), mientras que en parcelas con lluvia natural aún más grandes, se ha establecido en un valor mucho mayor, alrededor del 70% (Chirino *et al.* 2003). Al mismo tiempo, en ciertos tratamientos selvícolas, como las rozas del matorral para evitar la competencia con el arbolado, se ha de tener en cuenta el efecto destructivo del impacto de las gotas producidas por trascolación. La energía cinética de las nuevas gotas de agua es una función de la altura desde la que caigan, llegando a tener mayor poder destructivo por salpicadura que las propias gotas de lluvia. Esto último es lo que ocurre durante eventos de lluvia de poca intensidad pero persistentes en zonas de vegetación arbolada en la que se haya realizado tareas de limpieza del sotobosque o cuando éste no exista.

Un cuarto punto a destacar, es que la erosión tiende a concentrarse en el tiempo y que, por tanto, los eventos de lluvia de elevada intensidad y escasa recurrencia juegan un papel clave para entender la dinámica de la erosión de los suelos mediterráneos y del paisaje. Por tanto, la ejecución de actuaciones sobre la vegetación y el suelo que resulten necesarias, hay que preverla en función de las probabilidades de ocurrencia de eventos extraordinarios y evitar que otros factores –de orden administrativo o de oportunidad política– sean los que al final “decidan” el momento de ejecución.

Un último punto que emerge de este capítulo es la noción de que cada ladera posee un umbral crítico de equilibrio entre pérdida de suelo y la vegetación que puede mantener. De manera que, aunque de manera general, el actual nivel de deforestación de ciertos paisajes es consecuencia de acciones humanas pretéritas, la vegetación presente puede estar en equilibrio con la erosión que soporta en la actualidad y las condiciones climáticas. Algunas laderas con vegetación de matorral sin árboles que se encuentra en las zonas más secas de nuestro territorio o en laderas orientadas a solana de ambientes más húmedos, poseen la máxima vegetación

posible en función de las condiciones de suelo, clima y erosión actuales y, por tanto, la protección que ejercen es suficiente para mantener el sistema. En estos casos, pretender aumentar la protección del suelo frente a la erosión a través de actuaciones que alteren este equilibrio puede ser innecesario, al menos en la medida que ello suponga daños para el suelo y la vegetación actuales. Pero, incluso puede ser contraproducente, en la medida que sí que produzcan daños a la vegetación actual y que no existan los recursos de agua y nutrientes necesarios para las nuevas plantas.

Por todas estas razones, al plantear cualquier programa de gestión –roza, limpia de la vegetación, extracción de árboles, fuego prescrito, introducción de especies, revegetación, pistas forestales, transformaciones agrícolas, urbanización, etc.– hay que calcular cuales pueden ser las consecuencias de la modificación de la estructura y composición de la vegetación sobre la escorrentía y la erosión actuales ya que, además de los problemas erosivos *per se*, al final incidirán también sobre la estructura y composición de la vegetación futura. Por ello, cualquier actuación que altere la vegetación o el suelo debe estar suficientemente justificada y debe incluir medidas de precaución y de corrección que evite la desestabilización del sistema.

Agradecimientos

A Esther Bochet y Adolfo Calvo, por las críticas y sugerencias al manuscrito. A Esther Bochet, Artemi Cerdà y Noelia Garrigós por permitirme usar datos e información suya no publicada todavía y a Jordi García-Fayos y Cota Marqués por su ayuda con las figuras y la edición de las mismas.

Bibliografía

- Abad, N., R.N. Caturla, J. Baeza, C. Bladé, F. Vieira, E. Carbó, A. Valdecantos, A. Bonet, I. Serrasolsa, R. Guàrdia, J. Raventós, J.A. Alloza, A. Escarré, J. Bellot y V.R. Vallejo. 1996. Regeneración de los montes quemados. Páginas: 51-148 *en*: V.R. Vallejo (editor) La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Fundación CEAM, Valencia.
- Alexander, R.W. y A. Calvo. 1990. The influence of lichens on slope processes in some spanish badlands. Páginas: 385-398 *en*: J. Thornes (editor) Vegetation and erosion: processes and environments. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Bautista, S. 1999. Regeneración post-incendio de un pinar (*Pinus halepensis*, Miller) en ambiente semiárido. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Belmonte, F. y M.A. Romero-Díaz. 1994. Distribución de flujos de agua en el proceso de interceptación en cuatro especies vegetales mediterráneas y su relación con la cantidad de agua disponible en el suelo. Páginas: 201-210 *en*: Arnáez, J., García-Ruiz, J.M. & Gómez, A. (editores.) *Geomorfología en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Logroño.
- Belmonte, F. y M.A. Romero-Díaz. 1998. La cubierta vegetal en las regiones áridas y semiáridas: consecuencias de la interceptación de la lluvia en la protección del suelo y los recursos hídricos. *Norba* 10: 9-22.
- Bochet, E., J. L. Rubio y J. Poesen. 1998. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain), *Geomorphology* 23: 139-150.
- Bochet, E., J. Rubio, J.L. y Poesen, J. 1999. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. *Catena* 38: 23-44.
- Bochet, E., J. Poesen y J. L. Rubio. 2000. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes. *Earth Surface processes and Landforms* 25:847-867
- Bochet, E., J. Poesen y J.L. Rubio. 2002. Influence of plant morphology on splash erosion in a Mediterranean matorral. *Zitschrift für Geomorphologie* 46: 223-243.
- Bochet, E. y P. García-Fayos. 2004. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on motorway slopes in Valencia, Spain. *Restoration Ecology* 12: 166-174.

- Boix-Fayos, C., A. Calvo-Cases, A.C. Imeson y M.D. Soriano-Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44: 47-67.
- Bonneau, M. y G. Levy. 1987. Ensamblaje y organización física de las partículas del suelo. Páginas: 232-249 en: M. Bonneau y B. Soucher (editores) *Edaforología: constituyentes y propiedades del suelo*. Ed. Masson. Barcelona.
- Buzter, K.B., I. Miralles y J.F. Mateu. 1983. Las crecidas medievales del río Júcar. *Cuadernos de Geografía* 32/33: 311-331.
- Calvo, A. y N. La Roca. 1988. Slope form and soil erosion on calcareous slopes (Serra Grossa, Valencia). *Catena Supplement* 12: 103-112
- Calvo, A., A. Harvey, J. Payá y R.W. Alexander. 1992. Response of badlands surfaces in south east Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología* 5: 3-14.
- Cammeraat, L.H. y A.C. Imeson. 1998. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology* 23: 307-321.
- Cammeraat, L.H. y A.C. Imeson. 1999. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain. *Catena* 37: 107-127.
- Casado, M.A., J.M. De Miguel, A., Sterling, B. Peco, E.F. Galiano y F.D. Pineda. 1985. Production and spatial structure of Mediterranean pastures in different stages of ecological succession. *Vegetatio* 64: 75-86.
- Casermeiro, M.A., J.A. Molina, M.T. de la Cruz Caravaca, J. Hernando Costa, M.I. Hernando Massanet y P.S. Moreno. 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena* 57: 91-107.
- Cerdà, A. 1997. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments* 36: 37-51.
- Cerdà, A. 1998a. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena* 32: 73-86.
- Cerdà, A. 1998b. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes* 12: 661-671
- Cerdà, A. y P. García-Fayos 2002. The influence of seed size and shape on their removal by water erosion. *Catena* 48: 293-301.
- Chambers, J.C. y J.A. MacMahon. 1994. A day in the life of a seed: movements and fates of seeds and their implications for natural and managed systems. *Annual Reviews of Ecology and Systematics* 25: 263-292.
- Chirino, E., J. Bellot, A. Bonet y J.M. Andreu. 2003. Efecto de diferentes tipos de cubierta vegetal en el control de la erosión en clima semiárido. SE de España. Páginas: 183-187 en: R. Bienes y M.J. Marqués (editores) *Actas del I Simposio Nacional de Control de la erosión y degradación del suelo*. IMIA, Madrid.
- De Luís, M., J.C. González-Hidalgo y J. Raventós. 2003. Effects of fire and torrential rainfall on erosion in a Mediterranean gorse community. *Land Degradation & Development* 14: 203-213.
- Domingo, F., G. Sánchez, M.J. Moro, A.J. Brenner y J. Puigdefábregas. 1998. Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 91: 275-292.
- Francis, C.F. y J.B. Thornes. 1990. Runoff hydrographs from three mediterranean vegetation cover types. Páginas: 363-384 en: J. Thornes (editor) *Vegetation and erosion: processes and environments*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Gallart, F. y Clotet-Perarnau, N. 1988. Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event: the November 1982 flood in eastern Pyrenees. *Catena supplement* 13: 79-85.
- García-Fayos, P., T.M. Recatalá, A. Cerdà y A. Calvo. 1995. Seed population dynamics on badland slopes in southeastern Spain. *Journal of Vegetation Science* 6: 691-696.
- García-Fayos, P. y A. Cerdà. 1997. Seed losses by surface wash in degraded Mediterranean environments. *Catena* 29: 73-83.
- García-Fayos, P., B. García-Ventoso y A. Cerdà. 2000. Limitations to plant establishment on eroded slopes in southeastern Spain. *Journal of Vegetation Science* 11: 77-86.
- García-Fayos, P., y M. Gasque. 2002. Consequences of a severe drought on spatial patterns of woody plants in a two-phase mosaic steppe of *Stipa tenacissima* L. *Journal of Arid Environments*. 52: 199-208.
- García-Ruiz, J.M., P. Ruiz-Flaño, T. Lasanta, G. Monserrat, J.P. Martínez-Rica y G. Pardini. 1991. Erosion in abandoned fields, what is the problem? Páginas: 97-108 en: M. Sala, J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (editores) *Soil erosion studies in Spain*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- Gimeno-García, E., V. Andreu y J.L. Rubio. 2000. Changes in soil organic matter, nitrogen, phosphorous and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science* 51: 201-210.
- Greenway, D.R. 1987. Vegetation and slope stability. Páginas: 187-230 en: M.G. Anderson y K.S. Richards (editores). *Slope stability*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK.
- Grove, A.T. y O. Rackham. 2001. *The nature of Mediterranean Europe: an ecological history*. Yale University Press, New Haven.
- Guardia, R. y Ninot, J.M. 1992. Distribution of plant communities in the badlands of the upper Llobregat basin (southeastern Pyrenees). *Studia Geobotanica* 12: 83-103.

- Guerrero-Campo, J. 1998. Respuesta de la vegetación y de la morfología de las plantas a la erosión del suelo. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie Investigación. Zaragoza.
- Guerrero-Campo, J. y Monserrat-Martí, G. 2000. Effects of soil erosion on the floristic composition of plant communities on marl in northeast Spain. *Journal of Vegetation Science* 11: 329-336.
- Gyssels, G. y J. Poesen. 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 371-384.
- Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet y Y. Li. 2004. Impact of plant roots on the resistance of soil to erosion by water. A review. *Progress in Physical Geography*, en prensa.
- La Roca, N. y Calvo, A. 1988. Slope evolution by mass movements and surface wash (Valls d'Alcoi, Alicante, Spain). *Catena Supplement* 12: 95-102.
- Lavee, H., A.C. Imeson y P. Sarah. 1998. The impact of climate change on geomorphology and desertification along a mediterranean arid transect. *Land Degradation & Development* 9: 407-422.
- Llovet, J., S. Bautista y A. Cerdá. 1994. Influencia de las lluvias otoñales sobre la respuesta hidrológica y erosiva post incendio de los suelos en ambiente semiárido. Páginas: 81-92 en: J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar (editores). *Geomorfología en España*, Sociedad española Geomorfología, Logroño.
- López-Bermúdez, F., M.A. Romero-Díaz, A. Ruiz-García, G.C. Ficher, C. Francis y J.B. Thornes. 1984. Ecología y erosión en la España semiárida (Cuenca de Mula, Murcia). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 10: 113-126.
- López-Bermúdez, F., A. Romero-Díaz, J. Martínez-Fernández y J. Martínez-Fernández. 1996. The Ardal field site: soil and vegetation cover. Páginas: 169-188 en: C.J. Brandt y J.B. Thornes (editors). *Mediterranean Desertification and Land Use*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.
- Maestre, F.T., Bautista, S., Cortina, J., Bellot, J. 2001. Potential of using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecological Applications* 11: 1641-1655.
- Maestre, F.T. y J. Cortina. 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil* 241: 279-291.
- Maestre, F.T., J. Cortina, S. Bautista y J. Bellot. 2003. Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs in Mediterranean semi-arid afforestations?. *Forest Ecology and Management* 176: 147-160.
- Martínez-Fernández, J., F. López-Bermúdez, J. Martínez-Fernández y A. Romero-Díaz. 1995. Land use and soil-vegetation relationships in a Mediterranean ecosystem: El Ardal, Murcia, Spain. *Catena* 25: 153-167.
- Martínez-Fernández, J., J. Martínez-Fernández, F. López-Bermúdez, A. Romero-Díaz y F. Belmonte-Serrato. 1996. Evolution of vegetation and pedological characteristics in fields with different age of abandonment: A case study in Murcia (Spain). Páginas: 279-290, en: J.L. Rubio y A. Calvo (editores). *Soil degradation and desertification in Mediterranean environments*. Ed. Geoforma. Logroño.
- Mataix-Solera, J., I. Gómez, J. Navarro-Pedreño, C. Guerrero y R. Moral. 2002. Soil organic matter and aggregates affected by wildfire in a *Pinus halepensis* forest in a Mediterranean environment. *International Journal of Wildland Fire* 11: 107-114.
- Molina, M.J. y J.V. Linares. 1998. Effects of fire intensity on the soil physical properties related to structure. Organic matter, aggregate stability and water retention. Páginas: 35-50 en: L. Trabaud (editor). *Fire management and landscape ecology*. International Association of Wildland Fire, Fairfield, Washington.
- Morgan, R.P.C. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Mundi-Prensa, Madrid.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri y M.E. Styczen. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 527-544.
- Poesen, J., Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-103.
- Puerto, A., Rico, M., Matías, M.D. y García, J.A. 1990. Variation in structure and diversity in Mediterranean grasslands related to trophic status and grazing. *Journal of Vegetation Science* 1: 445-452.
- Puigdefábregas, J., A. Solé, L. Gutiérrez, G. Del Barrio y M. Boer. 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: result from the Rambla Honda field site in southeast Spain. *Earth-Science Reviews* 48: 39-70.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies y J.P. Porter. 1991. RUSLE, Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 30-33.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, y D.C. Yoder. 1998. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, no. 703, USDA-ARS, Washington, DC.
- Rey, F. 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena* 50: 549-562
- Rickson, R.J. y R.P.C. Morgan. 1988. Approaches to modelling the effects of vegetation on soil erosion by water. Páginas: 237-253 en: R.P.C. Morgan y R.J. Rickson (editores) *Agriculture. Erosion assesment and modelling*. Commission of the European Communities, Luxemburgo.

- Sala, M., J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (editores). 1991. Soil erosion studies in Spain. Geofoma Ediciones, Logroño.
- Sánchez, G. y Puigdefábregas, J. 1994. Interactions of plant-growth and sediment movement in semiarid slopes. *Geomorphology* 9: 243-260.
- Sanroque, P. J.L. Rubio y J. Sánchez. 1983. Evaluación de la erosión hídrica de los suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología* 42: 855-875.
- Schlesinger, W.H., J.F. Reynolds, G.L. Cunningham, L.F. Huenneke, W.M. Jarrel, R.A. Virginia y W.G. Whitford. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043-1048.
- Sonneveld, B.G.J.S. y M.A. Nearing. 2003. A nonparametric parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation. *Catena* 52: 9-21.
- Thornes, J.B. 1985. The ecology of erosion. *Geography* 70: 222-236.
- Thornes, J.B. 1988. Competitive vegetation-erosion model for Mediterranean conditions. Páginas: 255-281 *en*: R.P.C. Morgan y R.J. Rickson (editores) *Agriculture. Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, Luxemburgo.
- Thornes, J.B. 1990. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. Páginas: 41-53 *en*: J. Thornes (editor) *Vegetation and erosion: processes and environments*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Thornes, J.B. y J. Brandt. 1994. Erosion-vegetation competition in a stochastic environment undergoing climatic change and stochastic rainfall variations. Páginas: 306-320 *en*: A.C. Millington y K.J. Pye (editores) *Environmental change in the drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Vandekerckhove, L., J. Poesen, D. Oostwoud Wijdenes, J. Nachtergaele, C. Kosmas, M.J. Roxo y T. De Figueiredo. 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1201-1220.
- Wainwright, J. 1994. Anthropogenic factors in the degradation of semi-arid regions: A prehistoric case study in southern France. Páginas: 285-304 *en*: A.C. Millington y K.J. Pye (editores) *Environmental change in the drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky mountains. *Agriculture Handbook* n° 282.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall-erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Agriculture Handbook* n° 537.