

CONCEPTOS, MODELOS Y EJEMPLOS SOBRE OASIFICACIÓN*

ANDRÉS MARTÍNEZ DE AZAGRA¹, JORGE MONGIL², JORGE DEL RÍO³
Y LEOPOLDO ROJO⁴

RESUMEN

En el presente artículo se define el concepto de *oasificación*, proceso natural inverso al de desertificación por aridez edáfica. Para conseguir restaurar muchas laderas degradadas hay que alterar su fisiografía levemente mediante una acertada preparación del terreno, creando zonas en donde se concentre el agua de escorrentía con el suelo y nutrientes que transporta. En este artículo se proponen dos ecuaciones para dimensionar las trampas de agua con que revertir el proceso desertificador. Así mismo, se definen las series progresivas y regresivas del número de curva y de la disponibilidad hídrica en una ladera. También se concretan los efectos hidrológicos que tienen las diferentes preparaciones del terreno utilizadas habitualmente en repoblación forestal, de acuerdo con el modelo hidrológico MODIPÉ. Se describe un interesante método tradicional agrícola de *oasificación*: el riego de boqueras o de turbias, antaño muy extendido en el Sureste Español pero hoy en día abandonado, y sobre el que conviene reflexionar para aprender. Por último, se indican las especies arbóreas y arbustivas con las que emprender la *oasificación* en el SE de España, señalando sus principales características ecológicas y técnicas.

Palabras clave: *Oasificación*, desertización, recolección de agua, microcuencas, trampas de agua, riego de turbias, reforestación de zonas áridas y semiáridas

SUMMARY

The concept of *oasification*, that is: a natural process opposite to desertification, is developed in this study. To restore degraded lands, their slope's physiography must be slightly modified by means of a correct preparation of the soil, building sink zones (microponds), where runoff, soil and nutrients can concentrate. Two equations are developed to size the microponds conveniently for

* Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General para la Biodiversidad en el ámbito de su proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo).

¹ Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Avenida de Madrid, 44. 34004 Palencia (España). E-mail: amap@iaf.uva.es.

² Área Departamental Agroforestal y Ambiental. Universidad Católica de Ávila. Canteros, s/n. 05005 Ávila (España). E-mail: jorge.mongil@ucavila.es.

³ Delegación Territorial de Valladolid. Servicio Territorial de Medio Ambiente. Duque de la Victoria, 1. 47001 Valladolid (España). E-mail: riosanjo@jcy1.es.

⁴ Proyecto LUCDEME. Dirección General para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente. Gran Vía de San Francisco, 4. 28005 Madrid (España). E-mail: Irojo@mma.es.

redressing the dangerous process of desertification. Progressive and regressive series of the SCS curve number are proposed in this work. The hydrological effects of some current procedures followed in the preparation of the soil for reforestation, according to the model MODIPÉ, are also described. Finally, the article describes a traditional Spanish oasisification method, known as «riego de boqueras» or «riego de turbias», where our earlier generations show us their wisdom and knowledge in combating desertification.

Key words: *Oasisification*, desertification, water harvesting, microcatchments, water traps, runoff farming, reforestation of arid and semiarid zones

INTRODUCCIÓN

Unas condiciones generalizadas de aridez favorecen la aparición de mecanismos de desertificación (= desertización), que a su vez implican la degradación del territorio. La desertificación puede definirse como un proceso complejo que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales, en el contexto específico de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de variaciones climáticas y actuaciones humanas adversas (UNCCD, 1994). Este término fue introducido por AUBREVILLE en 1949, aunque ha sido desde entonces controvertido y mal utilizado o, cuando menos, su significado no ha cristalizado de manera precisa ni siquiera a nivel técnico (PUIGDEFÁBREGAS 1995). Pero volviendo a lo sustantivo, la desertificación es un conjunto de procesos o la manifestación de fenómenos implicados en el empobrecimiento y degradación de los ecosistemas terrestres por impacto humano. No es un problema meteorológico o ambiental aislado (como puede ser la sequía o la desaparición de una especie vegetal) en un territorio más o menos extenso, sino, como argumenta LÓPEZ BERMÚDEZ 2001, una patología surgida de la ruptura del equilibrio entre el sistema de producción de los geosistemas naturales y el sistema de explotación humana.

La problemática social y económica, amén de la ecológica, que suscita la desertificación trasciende el enfoque regional o nacional. De hecho, los ecosistemas secos ocupan el 41,3% de la superficie terrestre y en ellos vive el 34,7% de la población mundial. En las últimas

décadas la degradación de estos ecosistemas, en parte exacerbada por sequías extremas, ha alcanzado niveles alarmantes, sobretudo por sus consecuencias sociales de pobreza y migración. La Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD), fue promovida para abordar esta problemática. Hoy día son 190 los países que se han adherido a la misma, entre ellos España. La UNCCD proporciona un marco institucional adecuado. Sin embargo, la necesidad de un conocimiento científico y técnico que permita orientar y resolver el problema es cada vez más acuciante. El presente trabajo trata de aportar algunas ideas y soluciones técnicas para todos aquellos proyectos que tengan que afrontar el difícil reto de instalar vegetación en las zonas secas del planeta.

MARTÍNEZ DE AZAGRA 1999, 2002 ha propuesto el neologismo *oasisificación*, como antónimo de desertificación por aridez edáfica (consulte también la página web www.oasisificacion.com). Se trata de densificar y lignificar la cubierta vegetal, o lo que es lo mismo, revertir el proceso de degradación hídrica, edáfica y botánica que padece una ladera, mediante una correcta preparación del suelo e introduciendo las especies vegetales adecuadas. Pero para ello hay que acudir a sistemas de recolección de agua, es decir: hay que aprovechar la propia degradación de la ladera para acumular el agua de escorrentía en los puntos de repoblación mediante microembalses (alcorques) convenientemente dimensionados.

Frente al problema de la desertificación se apuesta por su solución: la *oasisificación*. En ella,

las pequeñas estructuras de tierra que recogen e infiltran la escorrentía (sistematización primaria), mejoran las condiciones de humedad del suelo y posibilitan el desarrollo de una vegetación forestal, invirtiéndose el temido proceso de desertificación por aridez edáfica. *Oasificar* supone combatir la escorrentía superficial; por el contrario, inducir la escorrentía desertiza el territorio.

La oasificación engloba un conjunto de procesos naturales que son signo e indicador, en el caso de producirse, de un estado de conservación favorable de nuestros ecosistemas. El mantenimiento de esta función es una condición necesaria para garantizar la conservación a largo plazo de un hábitat, con independencia de su grado o nivel de biodiversidad.

El término *oasificación* está muy relacionado con el concepto de recolección de agua y con el riego de boqueras (o de turbias) pero tiene un marcado enfoque ecológico en vez de meramente agrícola. En la *oasificación* contemplamos las cosechas de suelo y de nutrientes como fundamentales para el proceso restaurador de una ladera degradada. Además de cosechar agua, con la *oasificación* se recolectan nutrientes y suelo, por lo que al mismo tiempo se logra el control de la erosión hídrica, tan frecuente en las zonas áridas y semiáridas. De hecho, en muchos lugares del mundo, conservación de suelos y de aguas pueden considerarse sinónimos. En este mismo sentido se expresan LUDWIG *et al*; 1997, cuando describen que en las laderas de climas semiáridos en Australia existen sumideros naturales (v.g.: cada árbol, mata, macolla o depresión del terreno) que se ven enriquecidos al capturar el agua y el suelo de las zonas adyacentes.

Debemos recuperar las técnicas tradicionales de aprovechamiento agroforestal del territorio aplicando –eso sí– los nuevos conocimientos adquiridos: utilización de modelos hidrológicos sobre conservación de suelos y aguas, manejo de sistemas de información geográfica, introducción de especies vegetales con interés ecológico, económico y social, uso e incorporación de nuevos materiales (para construir

albarradas, para realizar enmiendas edáficas, para aumentar la capacidad de retención de agua; para conseguir micorrizaciones in situ, etcétera).

OASIFICACIÓN CONTRA DESERTIFICACIÓN

El empeoramiento de las condiciones hídricas de una ladera (regresión hídrica) conlleva también a una regresión vegetal y edáfica. Se trata de un proceso muy peligroso, especialmente en climas áridos y torrenciales, que se retroalimenta, por lo que puede conducir en poco tiempo a laderas desiertas (sin agua, sin suelo y sin vegetación). Esta regresión hídrica, edáfica y vegetal es característica de la desertización por aridez edáfica, que además de ser la más frecuente y extendida a nivel mundial, tiene unas consecuencias muy perniciosas: suelos desprovistos de vegetación, totalmente improductivos, sin materia orgánica, con una baja capacidad de infiltración, una fortísima insolación, una elevada oscilación térmica y una acelerada evaporación física directa tras los aguaceros.

Por el contrario, la mejora de las condiciones hidrológicas de la ladera (progresión hídrica) supone un incremento de la infiltración (como caso ideal: que se infiltre todo lo que llueve), e implica una progresión edáfica, vegetal y productiva (en biomasa). Es decir, al infiltrarse un mayor volumen de agua en el suelo, las disponibilidades de este elemento para las plantas aumentan, lo que posibilita una vegetación cada vez más avanzada. Estas formaciones vegetales protegen al suelo frente a la erosión y le aportan materia orgánica, facilitando su evolución hacia un perfil más fértil, profundo y maduro.

Ambos procesos, el retroceso desde los tres puntos de vista mencionados (que pueden agruparse en los términos desertización o desertificación) y el avance hacia situaciones más favorables (*oasificación*), quedan reflejados en la Figura 1.

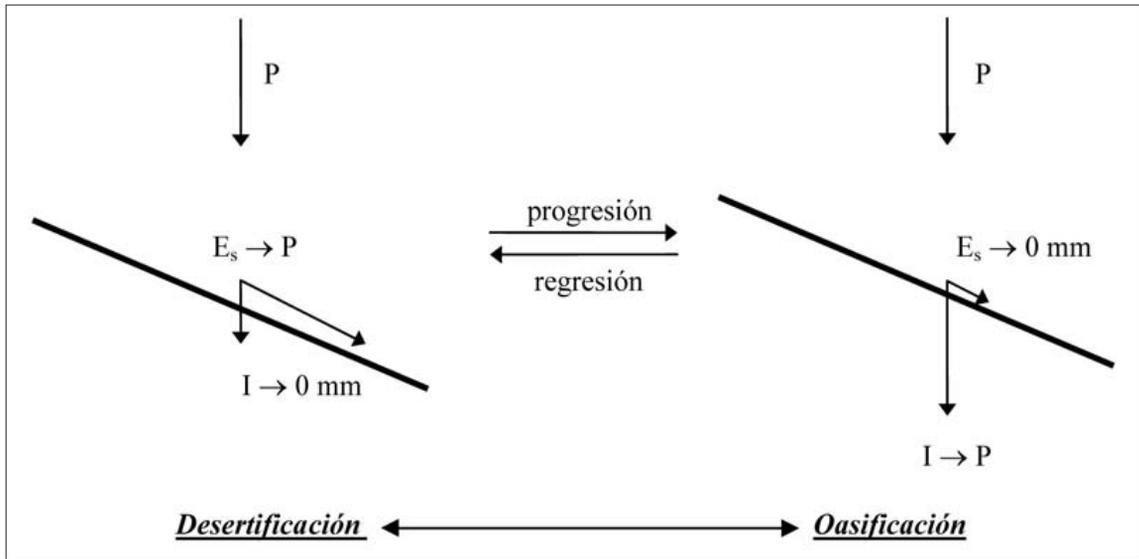


Figura 1. Oasisificación contra desertificación. P = Precipitación; E_s = Escorrentía superficial; I = Infiltración.

Figure 1. Oasisification against desertification. P = Precipitation; E_s = Surface runoff; I = Infiltration.

Las acciones de restauración o mitigación, que imitando el proceso natural de oasisificación intentan revertir la desertificación, deben basarse en la reconstrucción de la capacidad de nuestros paisajes para conservar el agua, el suelo y los nutrientes. El éxito completo de estas acciones, es decir: la reconstrucción del proceso de oasisificación requiere de decenas de años. Como ejemplo, SCOTT *et al*; 2001 constatan la existencia de fósforo en las aguas de escorrentía cuarenta años después del abandono de la actividad agraria y la ejecución de repoblaciones forestales en Estados Unidos.

Las acciones preventivas pueden basarse en la incorporación del estado actual de la oasisificación en los diagnósticos de instrumentos de: ordenación territorial, evaluaciones ambientales estratégicas y ordenación de los recursos forestales. Se trata de un aspecto clave en el diseño de políticas de protección que garanticen la funcionalidad oasisificadora de nuestros ecosistemas.

La mayor parte de las veces, la desertificación por aridez edáfica puede revertirse mediante sencillas operaciones individuales a pequeña escala que terminan por resolver el problema a escala local, comarcal y regional. Un uso agro-

forestal adecuado por parte de cada propietario, de cada lugareño, resulta crucial para evitar procesos de desertización. Una acertada extensión agraria para la población rural, la formación de agricultores y ganaderos mediante cursos prácticos sobre medidas conservadoras del agua, de la vegetación y del suelo resultan de gran importancia. Al mismo tiempo, una política estatal de incentivos económicos para quienes emprendan y mantengan tales medidas de conservación resulta muy conveniente para el éxito de la empresa. Lamentablemente, dicha política medioambiental ha brillado y brilla por su ausencia en España y en la Unión Europea.

Para iniciar la *oasisificación* de una ladera degradada hay que construir sistematizaciones primarias en ella, que consisten básicamente en microcuencas endorreicas (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996, 1998). Para modelar el proceso, se plantea un balance hídrico local centrado en la economía del agua de la ladera. Los componentes de este balance son, como se muestra en la Figura 2, la precipitación, la interceptación, la escorrentía (tanto la que llega al microembalse como la que escapa de éste, E_{s1} y E_{s2}), la evaporación y la infiltración.

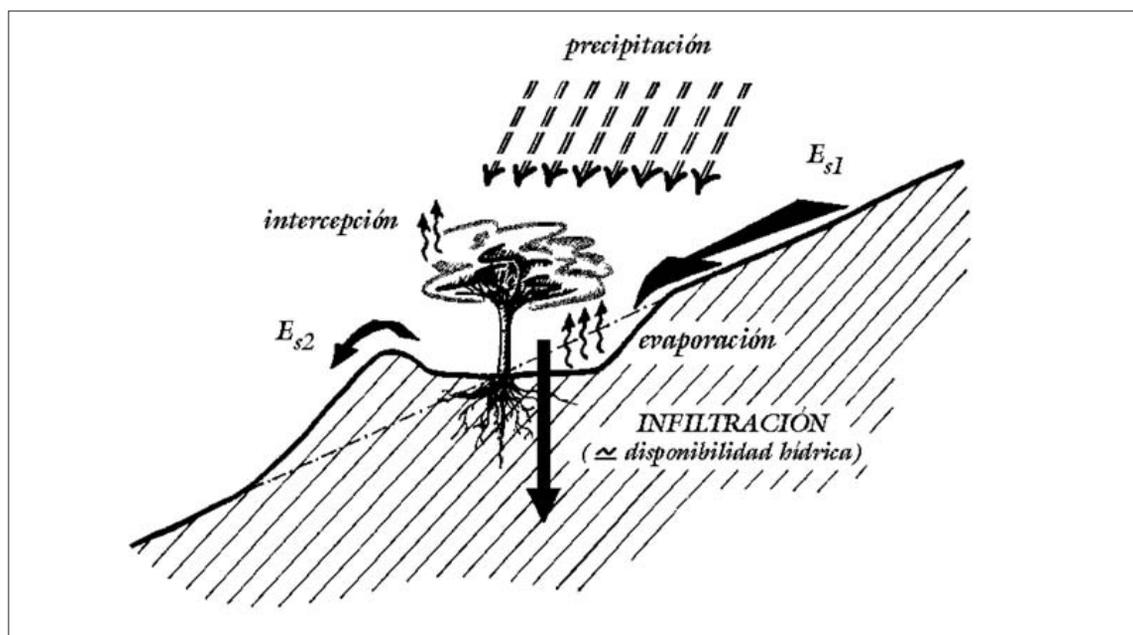


Figura 2 Componentes principales del balance hídrico local (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996).

Figure 2. Basic components for a local water balance (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996).

Lo importante para la restauración de una ladera no es el agua que se va (enfoque y preocupación de la Hidrología Clásica, que se centra en la escorrentía) sino el agua que se queda e infiltra, y que –a ser posible– debe ser toda la que cae en el lugar. Como objetivo final para restaurar una ladera hay que establecer que la infiltración termine igualándose con la precipitación. Al estar la ladera degradada hay que intervenir en ella (mediante la sistematización primaria) creando áreas de impluvio y áreas de recepción (S_1 y S_2), las primeras para que su escorrentía alimente a las segundas, que tendrán sus correspondientes microembalses bien dimensionados (en cuanto a la altura de su margen o balate), para que puedan recoger toda el agua que escurre.

Antiguamente las microcuencas (o en general las preparaciones del terreno para repoblación forestal o cultivo agrícola) se construían según la experiencia del agricultor o proyectista, pero sin hacer cálculos precisos. Los procesos de prueba y error iban mejorando el sistema constructivo. En la actualidad el diseño de sistemas de *oasificación* (= de recolección de agua,

suelo y nutrientes) puede y debe abordarse con más conocimientos, seguridad y rigor acudiendo a fórmulas y modelos específicos. Los cálculos previos son tanto más necesarios cuanto más espaciada sea la repoblación, cuanto más grandes sean las unidades sistematizadas y cuanto más agua deban concentrar y acumular los microembalses. Para construir sistemas de *oasificación*, es decir, para dimensionar balates, pocetas, albarradas, etcétera, hay que acudir a modelos hidrológicos.

DOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONADO DEL MICROEMBALSE

La determinación del tamaño del microembalse o trampa de agua (H) es una decisión fundamental cuando se diseñan repoblaciones forestales en zonas con escasez de agua. Por este motivo, MARTÍNEZ DE AZAGRA & MONGIL 2001 enumeran una serie de criterios, basados en la economía del agua y en el modelo MODIPÉ, que ayudan al técnico a tomar la solución más acertada en cada caso. Uno de estos

critérios (el denominado edafológico), que sirve para conseguir una buena dotación de agua, se describe seguidamente. Posteriormente se desarrolla un segundo criterio que persigue la consecución de endorreísmo.

Criterio edafológico

El volumen máximo de agua por unidad de superficie que puede contener el alcorque (H) y la capacidad de retener agua en sus poros eficaces que tiene el suelo han de estar relacionados a través de la profundidad de las raíces que se desea irrigar. Conforme a esta idea, puede establecerse la siguiente ecuación:

$$H = h \cdot p_U$$

Siendo:

H = Altura de los caballones del microembalse

h = Profundidad del suelo abarcado por las raíces

p_U = Porosidad eficaz (o útil) del suelo (en tanto por uno)

En la Figura 3 se esquematiza la cuestión para un bancal con cultivos herbáceos y leñosos. Puede apreciarse cómo la trampa de agua es mayor para el árbol, al poseer éste un sistema radical más profundo.

Criterio para la consecución de endorreísmo

En una unidad sistematizada, bajo una precipitación de intensidad constante, pueden plantearse las siguientes ecuaciones derivadas del modelo de infiltración de HORTON 1940:

En el área de impluvio: $v_i(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha t}$

En el área de recepción: $\omega_i(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta t}$

Ante aguaceros prolongados y siempre que a y b sean grandes, cabe simplificar estas ecuaciones y admitir:

En el área de impluvio: $v_i = f_c$

En el área de recepción: $w_i = g_c$

A su vez y por lo general: $f_c \approx g_c$ (salvo enmiendas muy importantes en el área de recepción o aplicaciones impermeabilizantes en el área de

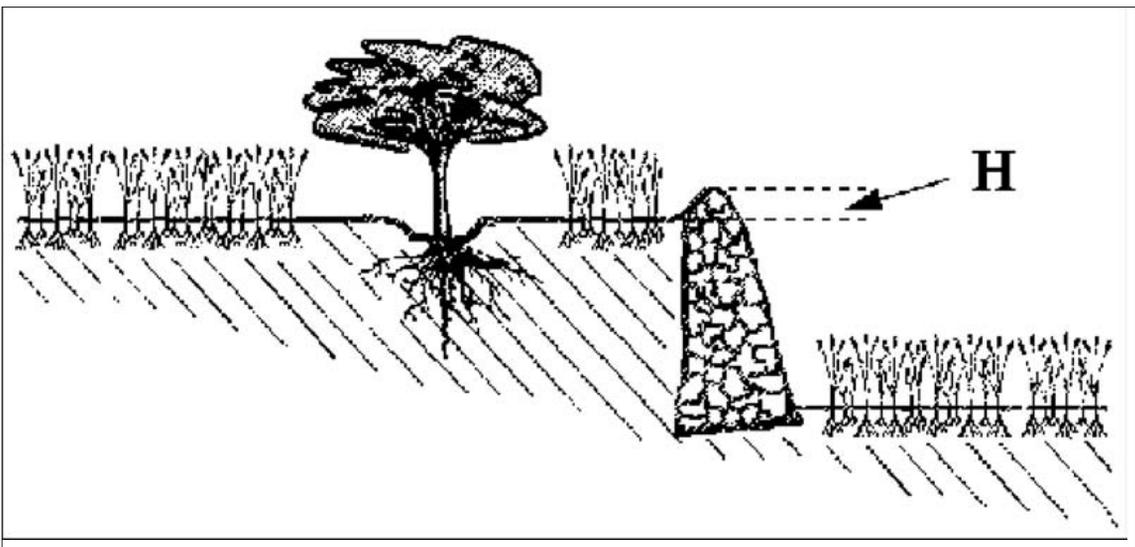


Figura 3 Bancal con su albarrada y su balate de altura H .

Figure 3. Terrace with stone wall and ridge height (H).

impluvio, medidas ambas ajenas a las técnicas habituales utilizadas en el sector forestal).

La ecuación de continuidad, con el fin de conseguir endorreísmo ante una lluvia de intensidad constante y duración D , se escribe:

$$i \cdot D \cdot S \approx f_c \cdot D \cdot S_1 + g_c \cdot D \cdot S_2 + H \cdot S_2$$

$$i \cdot D \cdot S \approx f_c \cdot D \cdot (S_1 + S_2) + H \cdot S_2$$

$$(i - f_c) \cdot D \cdot S \approx H \cdot S_2$$

Luego:

$$H \approx \frac{(i - f_c) \cdot D \cdot S}{S_2} = (i - f_c) \cdot D \cdot \kappa$$

Acudiendo al modelo clásico de Pérdida Uniforme (por ejemplo, en APARICIO 1999), en el cual aparece el concepto de tasa uniforme de pérdidas (o índice de infiltración), al que se suele abreviar por ϕ , podemos escribir:

$$H \approx (i - \phi) \cdot D \cdot \kappa$$

siendo, en todo el desarrollo:

H = Altura de los balates o caballones del microembalse

$v_i(t) = v_i$ = Velocidad de infiltración de agua en el área de impluvio

$w_i(t) = w_i$ = Tasa de infiltración de agua en el área de recepción

t = Tiempo

f_0 = Capacidad de infiltración inicial en el área de impluvio

f_c = Capacidad de infiltración final en el área de impluvio

α = Exponente de decrecimiento para el suelo del impluvio

g_0 = Capacidad de infiltración inicial en el área de recepción

g_c = Capacidad de infiltración final en el área de recepción

β = Exponente de disminución para el suelo en el área de recepción

i = Intensidad de lluvia (constante)

D = Duración del aguacero

$S = S_1 + S_2$ = Tamaño de la unidad sistematizada

S_1 = Superficie del área de impluvio

S_2 = Superficie del área de recepción

κ = Relación entre el tamaño de la unidad sistematizada y el área de recepción (S/S_2)

ϕ = Tasa uniforme de pérdidas (o índice de infiltración) $\approx f_c \approx g_c$

La ecuación deducida en este apartado constituye un caso particular de las ecuaciones generales que rigen el funcionamiento de un microembalse (véase MARTÍNEZ DE AZAGRA 1998).

SERIES PROGRESIVAS Y REGRESIVAS

Si se analizan las tablas del número de curva desde un punto de vista ecológico, se puede apreciar el rango en el que se mueve la naturaleza para una zona geográfica dada. Si la naturaleza tiene proyectado para el lugar en estudio un bosque o un monte arbolado o un matorral como vegetación climática, podemos fijar el intervalo en que se mueve el número de curva. Surge así el concepto de serie progresiva del número de curva (Figura 4), que resulta siempre decreciente.

A la serie progresiva del número de curva cabe asociar una serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera (Figura 5). Basta con recordar la relación existente entre núme-

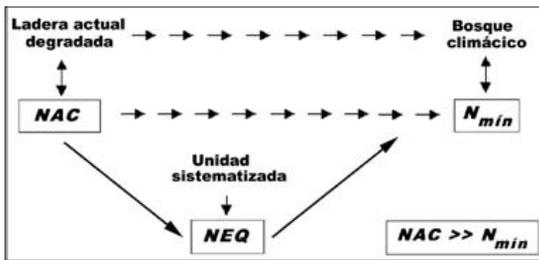


Figura 4 Serie progresiva del número de curva (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996). NAC = Número de curva de la ladera actual degradada; N_{min} = Número de curva final en la ladera restaurada; NEQ = Número de curva equivalente de la unidad sistematizada.

Figure 4. Progressive series of the curve number ((MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996). NAC = Curve number on the current slope; N_{min} = End curve number on the restored slope; NEQ = Equivalent curve number on the systematized unit.

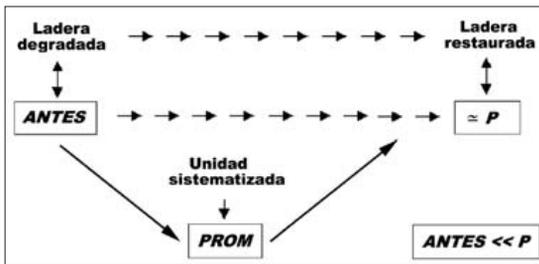


Figura 5 Sucesión progresiva de la infiltración y de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996). ANTES = Disponibilidad hídrica antes de la intervención, PROM = Disponibilidad hídrica promedio en las unidades sistematizadas, P = Precipitación

Figure 5. Progressive succession of infiltration and available water on a degraded slope (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996). ANTES = Available water for the slope without primary systematization, PROM = Average available water for the systematized units, P = Quantity of rainfall

ros de curva y umbrales de escorrentía para comprender el proceso.

Las series progresivas se acompañan de una mayor acumulación de nutrientes en el suelo en cada etapa y ofrecen interesantes modelos que pueden servir de guía para proyectar estas acciones. Desde un punto de vista ecológico avances en las series progresivas producen una segregación cada vez mayor de reactantes en los ecosistemas, al mejorarse los mecanismos homeostáticos que induce la vegetación sobre las propiedades de los suelos para conservar los nutrientes. Por el contrario, avances en las series regresivas (desertificación) conducen a una liberación y fuga de nutrientes.

El rango de variación del número de curva puede ser bastante amplio si se parte de una ladera altamente degradada y se consigue su plena restauración con el paso de los años. De acuerdo con las tablas del número de curva, se obtiene un intervalo máximo de 94-15. No obstante, un intervalo más realista, dentro de un lapso de tiempo habitual (unos 50 años), puede ser el de 94-54, que se corresponde con un barbecho sobre suelo de tipo D ($NAC = 94$) transformado en un bosque con condición hidrológica buena sobre suelo de tipo C ($N_{min} = 54$). Siendo así, no parece acertado crear unas trampas de agua que generen un número de curva equivalente inferior a 54 ($NEQ \geq 54$). A partir de esta consideración, surge un tercer criterio (en este caso de índole ecológica) para fijar el tamaño de los microembalses en una repoblación forestal, basado en las series progresivas de la vegetación de la zona y en sus correspondientes números de curva.

Puesto que a cada número de curva (N) se le puede asignar un umbral de escorrentía (P_0) mediante la ecuación:

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N}$$

se pueden obtener los umbrales de escorrentía para la ladera actual degradada (PAC) y para la ladera restaurada ($P_{máx}$). Estos valores pueden relacionarse con los datos de precipitaciones de la zona y sus correspondientes periodos de recurrencia (véase la Tabla 1).

Si la ladera está muy degradada el umbral resultará tan bajo que t representa el número de veces al año en que se produce escorrentía.

Situación	Número de curva	Umbral de escorrentía	Período de retorno
Ladera actual	NAC	PAC	t
Ladera restaurada	N_{min}	$P_{máx}$	T

Tabla 1. Relación genérica entre números de curva, umbrales de escorrentía y periodos de retorno.

Table 1. Curve numbers, runoff thresholds and return periods relationships.

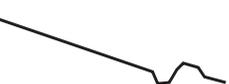
Por el contrario, *T* puede corresponderse con un periodo de retorno muy amplio. En tal caso concluiremos que la ladera restaurada actúa como un perfecto sumidero de agua; es decir, todo lo que llueve se infiltra (o es interceptado), lo que favorece la recarga de acuíferos además de mejorar la dotación de agua del suelo para beneficio directo del ecosistema.

Por ejemplo, si una ladera degradada tiene un número de curva de 94, le corresponde un umbral de escorrentía de 3,2 mm (sólo con que llueva esa cantidad se producirá escorrentía). Por el contrario, con una vegetación más desarrollada, el número de curva puede descender a 54, situándose el umbral de escorrentía en 43,3 mm. Pero si la naturaleza alcanza un número de curva de 15, el umbral será 287,9 mm. En este último caso, que corresponde a

un bosque con condición hidrológica muy buena sobre suelo de tipo A, la formación de escorrentía superficial es altamente improbable: el bosque actúa como una esponja que intercepta, aprovecha o percola todo el agua que precipita, sin producirse escorrentía superficial ni erosión hídrica.

MEJORA DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL SUELO

Las preparaciones del terreno que se vienen utilizando habitualmente en el sector forestal español (ahoyado con alcorques, microcuencas, acaballonado profundo, acaballonado superficial, aterrazado en contrapendiente, subsolado lineal, subsolado pleno, laboreo

Labor	Esquema	Números de curva ¹	CAPA ²
Ladera inalterada		NI = NR = NAC	0
Ayoyado con alcorque; Microcuencas		NI = NAC NR ≠ NAC	> 0
Acaballonado según curvas de nivel; Subsulado con rejón modificado		NI = NAC NR ≠ NAC	> 0
Acaballonado superficial		NI > NAC NR ≠ NAC	> 0
Aterrazado en contrapendiente		NI > NAC NR ≠ NAC	> 0
Subsolado lineal; Subsolado pleno		NI = NAC NR < NAC	≈ 0
Laboreo pleno según curvas de nivel		NI = NR > NAC	≈ 0

¹ NI = Número de curva del área de impluvio
NR = Número de curva del área de recepción
NAC = Número de curva de la ladera actual
² CAPA = Capacidad de la trampa de agua (microembalse)

Tabla 2. Efectos hidrológicos de diferentes preparaciones del terreno utilizadas para la repoblación forestal (según MODIPÉ).

Table 2. Hydrological effects of some current procedures followed in the preparation of the soil for reforestation (according to MODIPÉ).

pleno según curvas de nivel) hacen variar el número de curva de la ladera degradada original. En cualquier labor practicada hay que distinguir tres números de curva diferentes: el correspondiente a la ladera original (*NAC*), el del área de impluvio (*NI*) y el del área de recepción (*NR*). En la Tabla 2 se realiza un análisis comparativo de estos tres números de curva para las distintas preparaciones del suelo, basado en el modelo hidrológico MODIPÉ (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996).

Desde el punto de vista de la economía hídrica y para favorecer la recolección de agua en el área de recepción, la preparación ideal del suelo de una ladera desertizada queda definida mediante estas tres inecuaciones:

$$NAC > NR \text{ y } NI > NR \text{ y } NI \geq NAC$$

debiendo tener el alcorque –además– un tamaño (*CAPA*) suficiente para evitar la escorrentía fuera de la unidad sistematizada ($E_{s2} = 0$ mm).

Una situación en la que se satisfagan las dos primeras desigualdades pero en la que el número de curva del área de impluvio sea menor que el de la ladera degradada ($NI < NAC$), resulta aún más propicia para conseguir la *oasificación* de la ladera. Sin embargo, las aportaciones del área productora serán inferiores con lo que las cosechas de agua resultarán menos copiosas para el repoblado en su primera etapa de arraigo y crecimiento.

RECOLECCIÓN DE SUELO Y DE NUTRIENTES

Como se ha indicado anteriormente, la oasificación no sólo contempla la recolección de agua sino también la recolección de suelo y de nutrientes. Recoger partículas de suelo en las trampas de agua significa conservar el suelo, es decir, luchar contra la erosión. Para evaluar la cantidad de sedimentos que llegan al microembalse puede utilizarse cualquier modelo que estime la emisión de sedimentos o las pér-

«Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasificación»

didias de suelo (USLE, RUSLE, WEPP, EUROSEM, etc.). Este cálculo también puede servir para comprobar cómo el microrrelieve creado artificialmente se atenúa en pocos años, asegurando de esta manera que el impacto paisajístico producido con la preparación del suelo sea reversible en breve tiempo.

Una sencilla ecuación, derivada de la USLE (WISCHMEIER & SMITH 1978), que sirve para calcular la recolección de suelo es la siguiente:

$$R_s = 1000 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot S_1 \cdot (1 - C_e)$$

con:

R_s = recolección de suelo en el área de recepción (en $\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}$)

R = factor de erosividad de la lluvia (en $\text{hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)

K = factor de erosionabilidad del suelo (en $\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

L = factor de longitud del área de impluvio (adimensional)

S = factor de pendiente del área de impluvio (adimensional)

C = factor de cubierta vegetal en el área de impluvio (adimensional)

S_1 = superficie del área de impluvio (en ha)

C_e = coeficiente de emisión de sedimentos (que escapan fuera del microembalse) (adimensional)

Todos los factores son conocidos del modelo USLE. El único término que merece una atención especial es el coeficiente de emisión de sedimentos. Dicho coeficiente es nulo siempre que los aguaceros que participen en el cálculo del factor R sean todos inferiores a la precipitación límite ($P2$) de la sistematización primaria.

Para un aguacero concreto (P_i), su coeficiente de emisión de sedimentos (C_{ei}) puede estimarse mediante el cociente:

$$C_{ei} \approx \frac{E_{s2}}{E_{s1}}$$

siendo: E_{s1} la escorrentía superficial generada en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción.

E_{s2} la escorrentía que se va del área de recepción (de la unidad sistematizada), valor que es nulo para aguaceros menores que la precipitación límite ($E_{s2} = 0$ si $P_i \leq P_2$). Nótese que en la última ecuación se ha utilizado el símbolo de aproximadamente igual: la igualdad estricta sólo será cierta en el caso de que la concentración de sedimentos coincida en el flujo de entrada (E_{s1}) y en el de salida (E_{s2}).

Para cada aguacero que supere la precipitación límite (si los hubiere) hay que estimar las escorrentías que provoca (E_{s1} y E_{s2} , en litros) así como su contribución en el factor R de la USLE, para así obtener el término C_e convenientemente ponderado dentro de la ecuación que estima la recolección de suelo (R_s).

Respecto a la recolección de nutrientes, temática más amplia y compleja que la recolección de suelo, queremos señalar que los territorios en fase progresiva de oasisificación desempeñan tres acciones trascendentes: la fertirrigación, la creación de sumideros de nutrientes y la depuración de las aguas superficiales y subterráneas.

La fertirrigación del área de recepción se produce como consecuencia de la exportación de nutrientes, desde el área de impluvio, disueltos en el agua de escorrentía (E_{s1}) y por la infiltración de los nutrientes adsorbidos en los sedimentos que se hayan depositado en las áreas de recepción (R_s). La acumulación de nutrientes en las áreas receptoras, transportados por los sedimentos o por las aguas de escorrentía, tiene como efecto la provisión de los mismos a la vegetación implantada en el área de recepción. Esta concentración adicional de nutrientes desempeña un papel básico en la posibilidad de

supervivencia de la vegetación y en el crecimiento de las primeras etapas de desarrollo, por citar recientes estudios en vegetación autóctona mediterránea: en *Pinus halepensis* Mill. (OLIET *et al.*, 2004), en *Pinus pinea* L. (VILLAR *et al.*, 2000), y en *Quercus ilex* L. (VILLAR *et al.*, 2001) y en *Quercus suber* L., *Q. ilex* L., *Q. coccifera* L., *Pinus pinea* L., *P. halepensis* Mill. y *Juniperus thurifera* L. (VILLAR *et al.*, 2005)

En fases avanzadas de evolución de los ecosistemas terrestres, la progresiva implantación de vegetación en las áreas de impluvio hace que se produzca una paulatina disminución de la cantidad de nutrientes exportados desde el área de impluvio que son compensados por la creciente acumulación de residuos vegetales y materia orgánica, fruto de la actividad vegetal en las áreas de recepción.

La depuración de las aguas de escorrentía y de la fracción infiltrada, debida al movimiento de nutrientes y acumulación de sedimentos, es la tercera acción a considerar. La imitación de este proceso constituye la base del diseño de numerosos sistemas de depuración blandos de aguas residuales y sistemas de biorretención (filtros verdes, lechos de juncos, o praderas de desbordamiento).

Cuando se produce una disfunción del paisaje y el proceso natural de oasisificación se ve comprometido, el fenómeno de la desertificación desencadena dos conocidos procesos: la creación de un medio oligotrófico, tanto en las áreas de impluvio como en las áreas de recepción (que terminan desdibujándose y desapareciendo), y la temida contaminación difusa. Ambas circunstancias contribuyen de forma decisiva a la disminución de la productividad neta de los ecosistemas. La repercusión de este fenómeno trasciende al ámbito geográfico de origen.

Cabe establecer un criterio químico para dimensionar los tamaños del área de recepción e impluvio (S_2 y S_{1r} , respectivamente) desde la perspectiva de la fertilización y la depuración.

En consonancia con lo expuesto anteriormente, puede afirmarse que las acciones de restau-

ración restablecen tres importantes funciones desempeñadas por nuestros bosques: fertilizar la vegetación, acumular nutrientes en el suelo y depurar las aguas.

La prolija y dilatada creación y desarrollo de modelos para explicar la circulación de nutrientes en los ecosistemas es signo de la creciente preocupación que despierta este asunto en la sociedad. Su elaboración se ha abordado por la comunidad científica desde tres grandes perspectivas:

- La contaminación difusa (BORAH 2003, LEON *et al*; 2001)
- La depuración de las aguas (ROUSSEAU *et al*; 2004)
- La erosión del suelo (GAO *et al*; 2004, GAO *et al.*, 2005)

Todos los modelos consideran la acción de dos sumandos en la simulación del transporte de nutrientes en el paisaje: la fracción soluble en la escorrentía superficial y la que se encuentra adsorbida en los sedimentos que son arrastrados. Su descripción y desarrollo particularizados a una unidad sistematizada escapan del objetivo de este artículo.

UN MÉTODO TRADICIONAL DE OASIFICACIÓN EMPLEADO EN ESPAÑA

Un claro ejemplo de sistema tradicional de recolección de agua, suelo y nutrientes (y por lo tanto de *oasificación*) empleado en España con profusión hasta fechas recientes, es el denominado riego de boqueras o riego de turbias (LLOBET 1958; VILÁ 1961; NAVARRO 1968; MORALES 1969; etcétera). Se trata de un riego por gravedad mientras está lloviendo y hasta que termine la escorrentía en la rambla. Consiste en derivar las aguas turbias que circulan por la rambla y extenderlas a cuantas más paratas y bancales mejor, a través de boqueras y sangradores (Figura 6).

«Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasificación»

En el riego de boqueras, la dosis de riego queda fijada por la altura (H) que media entre la base del terreno y la cota del vertedero (sangrador). En bancales destinados a un cultivo mixto (herbáceo y arbóreo) alrededor de los troncos se solía perfilar una poceta con la que retener e infiltrar más agua (MARTÍN 1988). Véase la Figura 3.

El riego de boqueras propiciaba una importante reducción del caudal de avenida final de la rambla, por lo que las consecuencias perniciosas actuales de las temidas gotas frías se mitigaban y se transformaban en efectos muy beneficiosos para los cultivos (MORALES 1989).

Merece la pena, destacar el hecho de que el Español cuenta con una amplia terminología tradicional sobre recolección de agua y suelo, lo que no ocurre en otras lenguas desarrolladas bajo climas lluviosos, tales como el Alemán, el Francés o el Inglés. Por su interés, vamos a enumerar dichos términos y a definirlos (Figura 7).

– Riego de boqueras: Riego por gravedad mientras está lloviendo y hasta que finaliza la escorrentía en la rambla = Riego de turbias. Riego con aguas turbias, ricas en légameos y nutrientes (*¡oasificación!*). Por añadidura: sistema magnífico de laminación de avenidas. Antes del desmantelamiento de estos sistemas tradicionales de riego, la llegada de gotas frías con sus turbiones era bienvenida. Ahora –en cambio– tienen un carácter peyorativo en el SE de España: avisos de alerta roja por riesgo de fuertes lluvias difundidos por la radio y la televisión.

– Boquera: Boca, puerta de piedra o túnel que se hace en el caz o cauce de una rambla para regar las tierras. Por extensión se utiliza también como sinónimo habitual de agüera. Para facilitar la derivación del agua desde la rambla a la boquera se construyen rudimentarias presas en el lecho del barranco.

– Agüera: Canal hecho para encaminar el agua llovediza a las heredades, en especial a los bancales y paratas = Boquera.

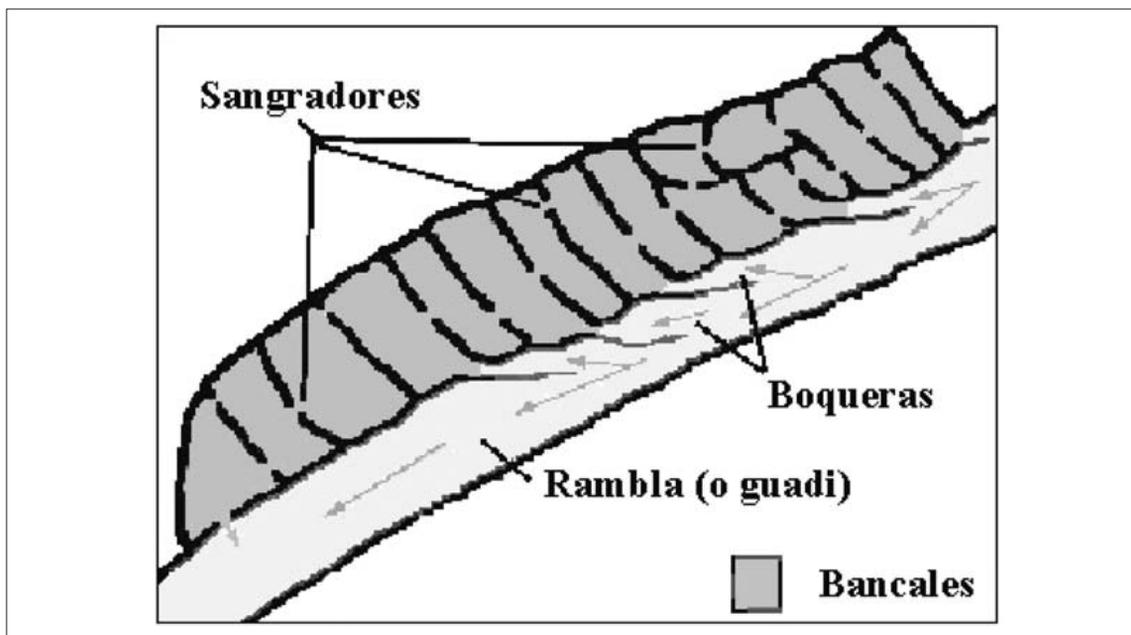


Figura 6. Una técnica de oasisificación tradicional utilizada por los agricultores en el Sureste Español: el riego de boqueras o riego de turbias (Fuente: NAVARRO 1968).

Figure 6. A traditional oasisification technique used in Spain, called «riego de boqueras» or «riego de turbias» (Source: NAVARRO 1968).

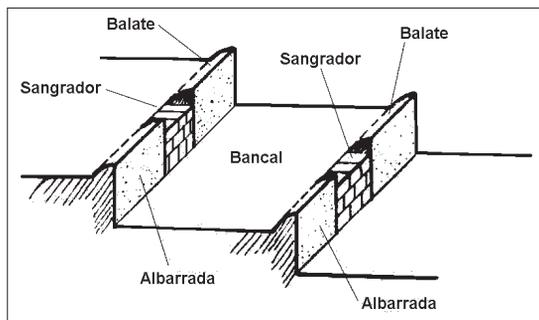


Figura 7. Riego a través de boqueras y sangradores (Fuente: MORALES 1969).

Figure 7. Irrigation through *boqueras* and *sangradores* (Source: MORALES 1969).

– **Bancal:** Rellano de tierra que los agricultores de antaño formaban y conservaban mediante paredes de piedras con el fin de cultivar en ellos olivos, almendros, algarrobos, vides, jerbos, higueras, moreras, cereales y legumbres.

– **Parata:** Bancal, generalmente pequeño y estrecho, en laderas poco pronunciadas, por lo que no precisa de muros de piedra para ser estable.

– **Balate (o albalate):** Margen elevado de una parata o de un bancal. Este margen es de tierra en las paratas y de piedras (pedrizas, albarradas, calicantos) en los bancales. Al balate también se le denomina caballón, mota o margen en otras regiones españolas.

– **Sangrador:** Vertedero entre dos bancales o paratas para extender las aguas sobrantes a nuevas parcelas de cultivo.

El riego de boqueras ha estado muy extendido en el sureste español hasta la década de los años sesenta del siglo pasado. Es una técnica muy similar al «runoff farming», practicado por los Nabateos en el desierto Negev y descrito por EVENARI *et al.*, 1963. Muy probablemente, el riego de boqueras –o riego de «alfayt», en terminología árabe citada por MORALES 1969 adscrita a una obra del rey Alfonso X– haya sido practicado desde muy antiguo en España, seguramente desde tiempos prehistóricos (CHAPMAN 1978).

ESPECIES LEÑOSAS PARA LA OASIFICACIÓN DEL SURESTE ESPAÑOL

Un tema trascendental, que lleva al éxito o conduce al fracaso de una intervención forestal es la acertada elección de las espe-

cies y ecotipos con que repoblar en las áreas de recepción de agua, suelo y nutrientes creadas con la sistematización primaria. Tiene un gran interés elaborar y divulgar este tipo de información práctica para los gestores y técnicos en restauración y ordenación del territorio. En la Tabla 3 se presentan las especies de mayor interés para el árido

Especie ¹	GX ²	T ³	C ⁴	PS ⁵	VP ⁶	VF ⁷	IS ⁸	VA ⁹	MI ¹⁰
<i>Atriplex halimus</i>	X	1	R	2 - 3	A	MA	B	B	S, P
<i>Cedrus atlantica</i>	MX	15	M	3	MA	---	M	---	P
<i>Ceratonia siliqua</i>	MX	7	L	4	MA	A	B	B	S, P
<i>Chamaerops humilis</i>	X	2	L	1	A	B	M	A	S,P
<i>Colutea arborescens</i>	MX	3	M	3	M	A	B	M	S,P
<i>Crataegus monogyna</i>	MX	4	M	4	M	B	B	M	P
<i>Cupressus sempervirens</i>	X	10	L	2 - 3	A	B	M	---	S
<i>Ephedra fragilis</i>	X	1	M	3	A	M	B	---	S,P
<i>Genista ramosissima</i>	X	1	M	2	A	---	B	M	S, P
<i>Genista spartioides</i>	X	1	M	2	MA	---	B	M	S, P
<i>Juniperus oxycedrus</i>	X	5	L	3	MA	B	B	B	P
<i>Juniperus phoenicea</i>	X	4	ML	3	MA	B	B	B	P
<i>Juniperus thurifera</i>	X	10	ML	3	MA	B	M	B	P
<i>Olea europaea</i>	X	5	L	4	M	A	A	B	P
<i>Ononis speciosa</i>	X	1	M	3	MA	A	B	A	S, P
<i>Periploca laevigata</i>	XX	2	M	3 - 4	A	MA	B	B	P
<i>Pinus halepensis</i>	X	15	M	2-3	MA	---	A	---	S, P
<i>Pinus pinea</i>	MX	16	M	3	MA	B	A	---	S, P
<i>Pistacia lentiscus</i>	X	5	L	2 - 3	A	M	B	B	S, P
<i>Prunus dulcis</i>	X	8	M	4	M	B	B	A	P
<i>Quercus coccifera</i>	X	2	M	2 - 3	MA	M	A	B	S, P
<i>Quercus ilex</i>	MX	10	L	4	MA	A	A	B	S, P
<i>Retama sphaerocarpa</i>	X	2	M	2 - 3	A	B	B	M	S, P
<i>Rhamnus lycioides</i>	X	1	M	3	M	B	B	B	S
<i>Salsola genistoides</i>	XX	1	L	1	A	B	B	---	S
<i>Sorbus domestica</i>	MX	7	M	4 - 5	A	M	B	A	P
<i>Spartium junceum</i>	MX	3	R	2 - 3	A	M	B	A	S, P
<i>Tetraclinis articulata</i>	X	6	L	3	A	M	B	---	P
<i>Ziziphus lotus</i>	XX	2	M	2 - 3	A	A	B	B	P
<i>Acacia cyanophylla*</i>	X	5	R	3	A	B	B	A	P
<i>Acacia cyclops*</i>	X	4	R	3	A	B	B	A	P
<i>Eucalyptus brockwayi*</i>	X	16	R	3	A	M	A	M	P
<i>Maytenus senegalensis*</i>	XX	2	L	1	M	M	B	B	P
<i>Robinia pseudacacia*</i>	MX	14	M	4	A	A	M	M	S,P

¹ Nombre científico de la especie

² Grado de xerofilia: XX = hiperxerófila; X = xerófila; MX = mesoxerófila

³ Talla: valor medio en condiciones semiáridas (en metros); T ≥ 1 m

⁴ Crecimiento: MR = muy rápido; R = rápido; M = medio; L = lento; ML = muy lento

⁵ Profundidad de suelo requerida (en metros)

⁶ Valor protector: MA = muy alto; A = alto; M = medio; B = bajo

⁷ Valor forrajero: MA = muy alto; A = alto; M = medio; B = bajo

⁸ Interés setero: A = alto; M = medio; B = bajo

⁹ Valor apícola: MA = muy alto; A = alto; M = medio; B = bajo

¹⁰ Método de implantación: S = siembra; P = plantación

* Especies exóticas

Tabla 3. Árboles y arbustos apropiados para la restauración de zonas áridas en el Sureste Español.

Table 3. Drought resistant trees and shrubs for afforestation in SE-Spain.

sureste español, junto con un resumen de sus características más importantes (altura, crecimiento, grado de xerofilia, valor protector, valor agrícola y forestal, y método de forestación). La relación de especies ha sido elaborada por los autores a partir de los trabajos de WEISS 1987, FAO 1989, ORIA DE RUEDA 1990, CARRERAS *et al.*, 1996, GARCÍA BALAGUER *et al.*, 1998, y a partir de su propia experiencia. Se trata de una relación exhaustiva pero en modo alguno completa, pues omite –entre otras– a todas las especies herbáceas (algunas de las cuales pueden tener un gran interés restaurador, como es el caso de *Stipa tenacissima* y *Lygeum spartium*).

Para *oasificar* interesan especies perennes, longevas y leñosas, ya que contribuirán a que las soluciones sean estables en el tiempo (ésta es la propuesta forestal frente a la desertización). También son muy recomendables especies que mejoren el suelo al poco de estar instaladas (gracias a su aportación de abundante hojarasca y pinocha, o a la fijación de nitrógeno) y que crezcan con rapidez. Conviene introducir especies útiles desde el punto de vista social y económico (frutos comestibles, hongos comercializables, madera valiosa, ramoneo, forraje, materias industriales, interés apícola, etc.), y especies con raíces fuertes, leñosas, amplias, tupidas, extensas y profundas, capaces de formar ectomicorrizas productoras de hongos silvestres comestibles, por ejemplo de los géneros *Terfezia*, *Tuber*, *Amanita*, *Boletus*, *Cantharellus*, *Hydnum*, *Hygrophorus*, *Lactarius*, *Russula*, *Suillus* o *Tricholoma*, por citar los de mayor interés (ORIA DE RUEDA 1989; MARTÍNEZ DE AZAGRA & ORIA DE RUEDA 1996). Otras características importantes a considerar se refieren al tiempo de espera hasta la entrada en producción de la especie implantada y a su capacidad futura de regeneración natural.

La introducción de especies exóticas sólo será interesante si pueden aportar alguna utilidad que no ofrezcan otras especies nativas, y haciendo siempre estudios previos

minuciosos (fitoclimáticos, edafológicos, hidrológicos, socioeconómicos) (MONTERO DE BURGOS 1990). Además, deben establecerse las máximas garantías de cuarentena para no introducir nuevas y peligrosas plagas o enfermedades.

No sólo mediante el establecimiento de un bosque denso se consigue la restauración de una ladera degradada y erosionada en una zona árida o semiárida, sino que en muchas ocasiones y bajo ciertas condiciones puede resultar mucho más efectiva y estable la instalación de oquedales o dehesas. También puede dar buenos resultados la combinación de varios tipos de formaciones de estructuras y espaciamientos diferentes, creando unos mosaicos de vegetación en el territorio con infinidad de ecotonos forestales (GONZÁLEZ & ENCINAS 1995). Además de los bosques huecos mencionados, repoblaciones de árboles aislados o repoblaciones por bosquetes resultan muy interesantes para *oasificar* un territorio degradado.

CONCLUSIONES

Como imagen opuesta y positiva de desertificación por aridez edáfica, proponemos el concepto de *oasificación*, término que engloba tanto la recolección de agua como la recolección de suelo y de nutrientes.

El punto de partida para lograr una progresión hídrica, edáfica y vegetal en una ladera degradada bajo clima árido, consiste en realizar una buena preparación del terreno creando microcuencas endorreicas o cuasi endorreicas. Para el diseño de estas pequeñas estructuras de tierra que recogen e infiltran la escorrentía, conviene utilizar un modelo hidrológico (p. ej.: MODIPÉ). Para poder pronosticar su evolución temporal hay que aplicar un modelo sobre pérdidas de suelo (p. ej.: USLE) y un modelo sobre migración de nutrientes. De esta forma se consigue modelar el proceso completo de la *oasificación*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APARICIO MIJARES, F.J. 1999. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México.
- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Societe d'Editions Geographiques et Coloniales. Paris.
- BORAH, D. K. & BERA, M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE*. 46(6): 1553-1566.
- CARRERAS EGAÑA, C.; GARCÍA VIÑAS, J. I.; ORTI MORIS, M. & RUIZ DE LA TORRE, J. Manual de la Flora para la Restauración de Áreas Críticas y Diversificación en Masas Forestales. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Sevilla.
- CHAPMAN, R.W. 1978. The evidence for prehistoric water control in south-east Spain. *Journal of Arid Environments* 1: 261-274.
- EVENARI, M.; SHANAN, L. & TADMOR, N.H. 1963. Runoff-farming in the Negev Desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects for the years 1958 - 1962. The National and University Institute of Agriculture. Rehovot (Israel).
- FAO 1989. Arid zone forestry. A guide for field technicians. Food & Agriculture Organization de las Naciones Unidas. Roma.
- GAO, B., WALTER, M.T., STEENHUIS, T.S., HOGARTH, W.L. & PARLANGE, J.-Y. 2004. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: theory and experiments. *Journal of Hydrology* 295 (1-4): 291-304.
- GAO, B., WALTER, M.T., STEENHUIS, T.S., PARLANGE, J.-Y, RICHARDS, B.K., HOGARTH, W.L. & ROSE, C.W. 2005. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff. *Journal of Hydrology* 308: 313-320.
- GARCÍA BALAGUER, M. L.; SCHWARZER, H. & CUETO ROMERO, M. 1998. Plantas autóctonas del Sureste Mediterráneo. Producción intensiva con fines ornamentales y paisajísticos. Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Sevilla.
- GONZÁLEZ ALONSO, S. & ENCINAS ESCRIBANO, A. 1995. Ecotonos forestales. La importancia de las fronteras. *Quercus* (noviembre 1995): 18-21
- HORTON, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings* 5: 399-417.
- LEON, L. F., SOULIS, E. D., KOUWEN N. & FARQUHAR, G. J. 2001. Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach. *Water. Research* 35 (4): 997-1007.
- LLOBET, S. 1958. Utilización del suelo y economía del agua en la región semiárida de HuercaOvera (Almería). *Estudios Geográficos* 1: 5-21.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. 2001. El riesgo de desertificación. En: Martín de Santa Olalla, F. (ed.) Agricultura y desertificación. Editorial Mundi-Prensa. Madrid.
- LUDWIG, J.; TONGWAY, D.; FREUDENBERGER, D.; NOBLE, J. & HODGKINSON, K. 1997. Landscape ecology. Function and management. CSIRO. Collingwood (Australia).
- MARTÍN GALINDO, J.L. 1998. Almería: Paisajes agrarios. Espacio y sociedad. De la agricultura morisca a los enarenados actuales. Universidad de Valladolid. Valladolid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Mundi-Prensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 1998. Desarrollo de un modelo sobre recolección de agua aplicable a la restauración forestal. *Ecología* 12: 93-104.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 1999. El modelo hidrológico MODIPÉ. *Montes* 55: 77-82.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 2002. Principles for designing endorheic microcatchments. En: J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins & V. Andreu (eds.). Third International Congress 2000. Man and Soil at the Third Millennium; tomo I: 507-520. Valencia.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. & ORIA DE RUEDA, J. A. 1996. Hacia una selvicultura fúngica para los hongos silvestres de Castilla y León. *Medio Ambiente en Castilla y León* 6: 13-21.

- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. & MONGIL, J. 2001. Algunos criterios para el diseño de sistemas de recolección de agua en repoblaciones forestales. Actas III Congreso Forestal Español; Mesa 3: 272-277. Granada.
- MONTERO DE BURGOS, J. L. 1990. El eucalipto en España (Comentarios a un problema). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MORALES GIL, A. 1969. El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia 1: 167-183.
- MORALES GIL, A. 1989. Abandono y desorganización de los sistemas de riegos de turbias. Su incidencia en la escorrentía. En: López Gómez, A. (ed.) Los paisajes del agua. Universidad de Valencia y Universidad de Alicante. Valencia.
- NAVARRO, C. 1968. Problemas agrarios en un sector de clima semiárido: Campo de Aguilas. Revista de Geografía III: 5-39.
- OLIET, J., PLANELLES, R., SEGURA, M.L., ARTERO, F. & JACOBS, D.F. 2004. Mineral nutrition and growth of containerized *Pinus halepensis* seedlings under controlled-release fertilizer. *Scientia Horticulturae*. 103: 113-129.
- ORIA DE RUEDA SALGUEIRO, J.A. 1989. Silvicultura y ordenación de montes productores de hongos micorrizógenos comestibles. Boletín de la Sociedad Micológica de Madrid 13: 175-188.
- ORIA DE RUEDA SALGUEIRO, J.A. 1990. Impactos ecológicos y utilidad de las plantaciones de *Eucalyptus* en la provincia de Almería. *Montes* 24: 34-39.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. 1995. Erosión y desertificación en España. *El Campo* 132: 63-83.
- ROUSSEAU, D.P.L., VANROLLEGHEM, P.A. & DE PAUW, N. 2004. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Water Research*. 38(6): 1484-1493.
- SCOTT, C.A., WALTER, M.F., NAGLE, G.N., WALTER M.T. , SIERRA, N.V. & BROOKS, E. 2001. Residual phosphorus in runoff from successional forest on abandoned agricultural land: 1. Biogeochemical and hydrological processes. *Biogeochemistry* 55: 293-309.
- UNCCD. 1994. United Nations Convention to Combat Desertification. Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Bonn.
- VILÁ VALENTÍ, J. 1961. La lucha contra la sequía en el sureste de España. Seminario de Geografía de la Universidad de Murcia; 25-44.
- VILLAR, P., DOMÍNGUEZ, S., PEÑUELAS, J.L., CARRASCO, I., HERRERO, N., NICOLÁS, J.L. & OCAÑA, L. 2000. Plantas grandes y mejor nutridas de *Pinus pinea* tienen mejor desarrollo en campo. Actas del 1er Simposio sobre el pino piñonero 1: 219-227. Valladolid
- VILLAR, P., PLANELLES, R., ENRÍQUEZ, E., PEÑUELAS, J.L. & ZAZO, J. 2001. Influencia de la fertilización y el sombreado en el vivero sobre la calidad de la planta de *Quercus ilex* L. y su desarrollo en campo. Actas del III Congreso Forestal Español; Mesa 3: 770-776. Granada.
- VILLAR, P., PUÉRTOLAS, J., PEÑUELAS, J. L., & PLANELLES, R. 2005. Effect of nitrogen fertilization in the nursery on the drought and frost resistance of Mediterranean forest species. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 14(3): 408-418.
- WEISS, E. 1987. Guide to plants tolerant of arid and semi-arid conditions. Nomenclature and potential uses. Margraf Scientific Publishers. Weikersheim (Alemania).
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook, n° 537.

