

TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE AGUA Y DE *OASIFICACIÓN* PARA EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA Y LA RESTAURACIÓN FORESTAL EN REGIONES DESFAVORECIDAS

JORGE MONGIL MANSO* Y ANDRÉS MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES**

Recibido: 15-9-06. Aceptado: 14-5-07. BIBLID [0210-5462 (2007-1); 40: 67-80].

PALABRAS CLAVE: Cosechas de agua, *oasificación*, repoblación forestal, desertificación, zonas áridas.

KEY WORDS: Water harvesting, *oasification*, reforestation, desertification, arid zones.

MOTS-CLES: Récolte d'eau, *oasification*, reforestation, désertification, zones sèches.

RESUMEN

Se hace un repaso por los antecedentes históricos de las cosechas de agua, se explica el concepto de las mismas y se describen las principales técnicas, y se presentan algunos ejemplos de desarrollo rural basado en la recolección de agua. Así mismo, se exponen algunos de los avances tecnológicos en estos aspectos, más concretamente el concepto recientemente introducido por los autores de *oasificación* y el modelo hidrológico MODIPÉ (acrónimo de «Modificación de Precipitaciones»), especialmente novedoso pues es el único existente en el mundo que sirve para el correcto diseño de repoblaciones forestales en zonas secas, con las ideas de las cosechas de agua. Esta herramienta informática aparece en 1995 dentro del marco del proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo), del Ministerio de Medio Ambiente.

ABSTRACT

This paper offers a survey of the historical record of water harvesting, an explanation of its concept, a description of the main techniques and also presents several examples of rural development based on water collection. Some of the technological improvements on this matter are presented, specifically the concept *oasification*, that has been recently brought in by the authors, as well as the hydrologic model MODIPÉ (meaning Modificación de Precipitaciones = rainfall alteration), which is specially innovative, as it is the only existing model worldwide suitable for an accurate design of reforestation schemes in arid zones, introducing the concept of water-harvesting. This software-tool appears for the first time with of the project LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo = fight against desertification in the Mediterranean area) carried out by the Spanish Ministry of Environment.

RÉSUMÉ

On fait une révision des précédents historiques de la récolte d'eau, on explique le concept des mêmes, on décrit les technologies principales et on présent quelques exemples de développement

* Grupo de Hidrología y Conservación de Suelos. Universidad Católica de Ávila. Canteros s/n 05005-Ávila. E-mail: jorge.mongil@ucavila.es

** Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Universidad de Valladolid

rural basé sur la récolte d'eau. De même, on expose certaines des avances technologiques dans ces aspects, comme le concept récemment présenté par les auteurs d'*oasification* et le modèle hydrological MODIPÉ («modification des pluies»), particulièrement nouveau puisqu'il est l'unique au monde qui sert pour le plan correcte de reforestations dans des zones sèches, avec les idées de la récolte d'eau. Cet outil informatique apparaît en 1995 dans le projet LUCDEME (Combat contre la Désertification en Méditerranée), Département d'Environnement d'Espagne.

1. INTRODUCCIÓN

En las zonas con escasez de agua, el establecimiento de una vegetación se convierte en un reto difícil que requiere de amplios conocimientos técnicos para aprovechar adecuadamente la exigua precipitación caída y la pequeña escorrentía generada. Cuando el objetivo es establecer un cultivo de subsistencia en países desfavorecidos, las consecuencias de la escasez de agua pueden llegar a ser dramáticas y, por ello, se requiere un mayor esfuerzo en investigación y desarrollo en estos aspectos. Así mismo, en zonas secas los procesos de desertificación cobran mayor gravedad, extendiéndose los terrenos erosionados, perdiéndose un recurso natural escaso como es el suelo y desaprovechando otro no menos escaso que es el agua. En este caso, los trabajos de restauración de una vegetación leñosa contribuyen a frenar estos procesos, a la vez que pueden servir al hombre como combustible o como forraje leñoso para el ganado.

A lo largo del tiempo, en las zonas áridas y semiáridas se han desarrollado diversas técnicas, que pueden agruparse en el nombre genérico de cosecha o recolección de agua, que logran a la vez conservar agua y suelo, y desarrollar cultivos, pastizales y arbolado. Algunas de estas técnicas de cosechas de agua se han establecido tradicionalmente en puntos concretos del planeta situados en zonas muy castigadas por el clima (con escasísimas precipitaciones) y por ello muy empobrecidas. El desierto de Negev (Israel), Afganistán, muchos países africanos (Burkina Faso y Níger, entre otros) o desiertos de América del Sur, han servido como enormes campos experimentales que han aportado a este trabajo innumerable y valiosísima información.

Es necesario recoger este legado técnico de siglos y mejorarlo convenientemente con nuevas ideas y tecnologías, para lograr el desarrollo de extensas zonas rurales desfavorecidas.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La recolección de agua para el consumo humano o animal es una actividad tan antigua como el hombre. Es muy posible que las primeras formas de recoger el agua fueran simples hoyos excavados en la roca, que captarían y almacenarían la escorrentía producida durante las tormentas. El siguiente paso evolutivo probablemente fuera la construcción de muros de desviación para crear un gran área de captación. Existen evidencias de estas estructuras en las montañas de Edom (en el sur de Jordania) datables hace 9.000 años, en Irak hacia el año 4500 a. C. y en la zona situada entre el golfo de Arabia y La Meca (FRASIER,1994). La técnica consistía esencialmente en

la recolección de agua de lluvia y su desviación a estanques naturales o artificiales o a depósitos (BAZZA & TAYAA, 1994).

Una de las instalaciones de cosechas de escorrentía más temprana y perfectamente documentada se localiza en el desierto Negev (Israel). Esta instalación, que fue construida hace unos 4.000 años, ha sido descrita por EVENARI *et al.* (1963, 1964). Las áreas productoras de escorrentía que tenían estos sistemas eran laderas limpias de vegetación y con suelo alisado para incrementar el escurrimiento. Unas zanjas cavadas según curvas de nivel conducían el agua recogida para el riego de los campos. Estos sistemas permitían una agricultura de cereal en zonas con una precipitación anual media de 100 mm.

En Palestina se han descubierto instalaciones que datan del año 2500 al 1800 A.C., que consistían básicamente en cisternas con áreas de captación tratadas para incrementar la escorrentía (NASR, 1999). Otros sistemas de cosechas de agua han sido también utilizados hace 500 años en el suroeste de Estados Unidos, México, India y en África, tanto en la zona subsahariana como en el norte de este continente (FRASIER, 1994; BAZZA & TAYAA, 1994). No se conocen las causas del abandono de estos sistemas, pero algunas hipótesis lo achacan a una excesiva salinización del suelo (FRASIER, 1994), y otras (SHANAN & TADMOR, 1979) lo explican basándose en un cambio climático que obligaría al abandono de los cultivos; sin embargo, FIDELIBUS & BAINBRIDGE (1994) señalan razones políticas más que de tipo ambiental.

Aunque el método tiene una antigüedad significativa, no ha sido tratado por los investigadores hasta mediado el siglo XX. Es a partir de los años cincuenta y sesenta cuando empiezan a aparecer en la bibliografía especializada algunos trabajos localizados en el desierto de Negev en Israel (TADMOR *et al.*, 1957; SHANAN *et al.*, 1958) y en el desierto de Sonora en Arizona (CADOT, 1989).

A pesar del abandono temporal de las técnicas de cosechas de agua antes mencionado, recientemente se aprecia un renovado interés, provocado por el incremento de la demanda de productos agrícolas y los altos costes energéticos. De esta forma, en Arizona y Australia están siendo experimentadas técnicas innovadoras en los campos del consumo doméstico y la jardinería (BAZZA & TAYAA, 1994). En la actualidad, las cosechas de agua son practicadas intensamente en las zonas áridas de muchos países para cultivos agrícolas (México, Botswana, India, Afganistán, Pakistán, Australia, Israel, Kenia, Túnez, etc.). El sistema más común es el de las microcuencas. En Afganistán, por ejemplo, se estima que unas 70.000 ha se benefician de esta técnica (BAZZA & TAYAA, 1994).

3. LAS COSECHAS DE AGUA. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

Para una primera aproximación a las cosechas de agua (*water harvesting* en inglés, *Wasserernten* en alemán y *récolte d'eau* en francés), se recomienda acudir a la recopilación bibliográfica realizada por BOERS & BEN-ASHER (1982). Según estos autores, la cosecha de agua es un método para inducir, recoger, almacenar y conservar escorrentía local y superficial para la agricultura en regiones áridas y semiáridas.

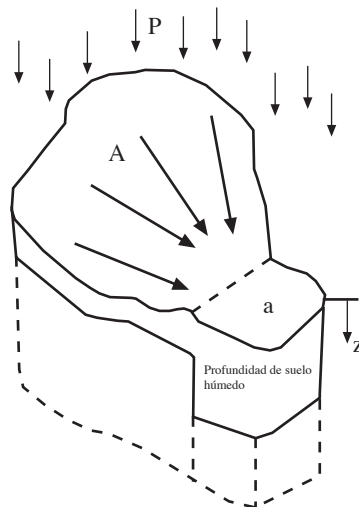
En sentido más amplio, CRITCHLEY & SIEGERT (1991) definen cosecha de agua como la recolección de escorrentía para su uso productivo. La escorrentía puede recogerse desde tejados y superficies del suelo (cosecha de agua de lluvia o *rainwater harvesting*), o desde cursos de agua intermitentes y efímeros (cosecha desde cursos de agua o *floodwater harvesting*).

Más recientemente, FRASIER (1994) aúna ambos conceptos, definiendo la cosecha de agua como el proceso de recolección y almacenamiento de agua para su posterior uso, desde un área tratada para incrementar la escorrentía. Por consiguiente, un sistema de cosecha de agua sería aquel que facilita la recolección y almacenaje de agua de escorrentía, que puede utilizarse para abastecimiento doméstico o para cultivos. Cuando un sistema de cosecha de agua está específicamente diseñado para suministrar agua para el crecimiento de las plantas, recibe el nombre de «cultivo con escorrentía» (*runoff farming* en la bibliografía anglosajona) (véase la figura 1).

Todas las técnicas de cosechas de agua existentes tienen en común las siguientes características:

- 1) Son aplicadas en zonas áridas y semiáridas, donde la escorrentía tiene un carácter intermitente.
- 2) Dependen de un agua de origen local, como puede ser la escorrentía superficial, el caudal de un arroyo o de un manantial efímeros.
- 3) Son operaciones a pequeña escala, en cuanto al área de captación, al volumen de almacenamiento y al capital invertido.

Figura 1. *Modelo conceptual de las cosechas de agua, según oweis et al. (1999)*



P = Precipitación; A = Área de captación; a = Área de cultivo; z = Profundidad efectiva de la zona radical.

La recolección de escorrentía puede realizarse de dos formas bien diferentes (BOERS & BEN-ASHER, 1982):

- a) Cosechas de agua con microcuencas (*microcatchment water harvesting*). Es un método para recoger la escorrentía superficial desde un área de contribución que conduce el flujo a una distancia inferior a 100 m y almacenarlo para uso consuntivo en la zona radical adyacente a una poceta de infiltración.
- b) Cultivo por cosecha de agua (*runoff farming water harvesting*). Es un método para recoger la escorrentía superficial desde un área de captación, utilizando canales, presas y sistemas de desviación, y almacenarla en un depósito de superficie o en la zona radical de un área de cultivo para un uso consuntivo directo.

Existen muchas técnicas de cosechas de agua, para muy diversas aplicaciones. Las que se emplean para la producción vegetal, tanto de cultivos como de pastos y árboles, pueden agruparse, según CRITCHLEY & SIEGERT (1991), en tres categorías:

- 1) Microcuencas (*microcatchments*). Son sistemas de cosecha de agua de lluvia (*rainwater harvesting*). Sus principales características son:
 - Se recogen aguas que escurren por la superficie del suelo desde áreas de captación de corta longitud.
 - La longitud del área de captación suele ser de 1 a 30 m.
 - La escorrentía recogida se almacena en el perfil del suelo.
 - La relación entre el área de impluvio y el área de recepción (*AI:AR*) es normalmente de 1:1 a 3:1.

Algunos ejemplos son las microcuencas *Negarim* (indicadas para árboles), caballones según curvas de nivel para árboles o para cultivos herbáceos y caballones semicirculares (recomendados para pastizales y matorrales).

- 2) Sistemas de captación externa (*external catchment systems*). Constituyen una técnica de cosecha de agua de lluvia (*rainwater harvesting*) y de larga pendiente. Sus principales características son:
 - Se recoge el agua que fluye por la superficie del suelo.
 - La escorrentía recogida se almacena en el perfil del suelo.
 - El área de captación tiene una longitud de 30 a 200 m.
 - La relación área de impluvio/área de recepción es normalmente de 2:1 a 10:1. Como ejemplos pueden mencionarse los caballones trapezoidales y los caballones de piedra según curvas de nivel, ambos indicados para cultivos agrícolas.
- 3) Cosechas de aguas de inundación (*floodwater farming*). Son una técnica de cosecha desde corrientes de agua (*floodwater harvesting*). Sus principales características son:
 - El flujo de un arroyo efímero es recogido por desviación o por extensión dentro del lecho o del fondo del valle.
 - La escorrentía se almacena en el perfil del suelo.
 - El área de captación es grande (puede llegar a ser de varios kilómetros).
 - La relación área de impluvio/área de recepción está por encima de 10:1.

Los principales sistemas que se pueden citar como ejemplos son los riegos de boquera, los diques permeables de roca y los caballones de extensión de agua, que se emplean para cultivos agrícolas.

Los sistemas de cosechas de agua constan de dos zonas bien diferenciadas:

- 1) Área de captación, área de impluvio o colectora. Que recoge y concentra la escorrentía superficial.
- 2) Área de recepción o de cultivo. En la que el agua se almacena, bien en el perfil del suelo (lo que sucede en el denominado «*runnoff farming*» para la implantación de cultivos o árboles) o en depósitos creados al efecto, si se trata de abastecer de agua a personas o animales (aljibes o alchubes).

4. TÉCNICAS DE COSECHAS DE AGUA

Existen un gran número de técnicas de recolección de agua que están siendo utilizadas en las regiones áridas y semiáridas de todo el mundo. SIEGERT (1994) hace una clasificación de las mismas y propone algunos criterios para seleccionar la más adecuada (véanse las figuras 2 y 3). Un cuadro resumen de las técnicas se expone en la tabla 1.

Figura 2. Clasificación de las técnicas de recolección de agua; según Siegert (1994)

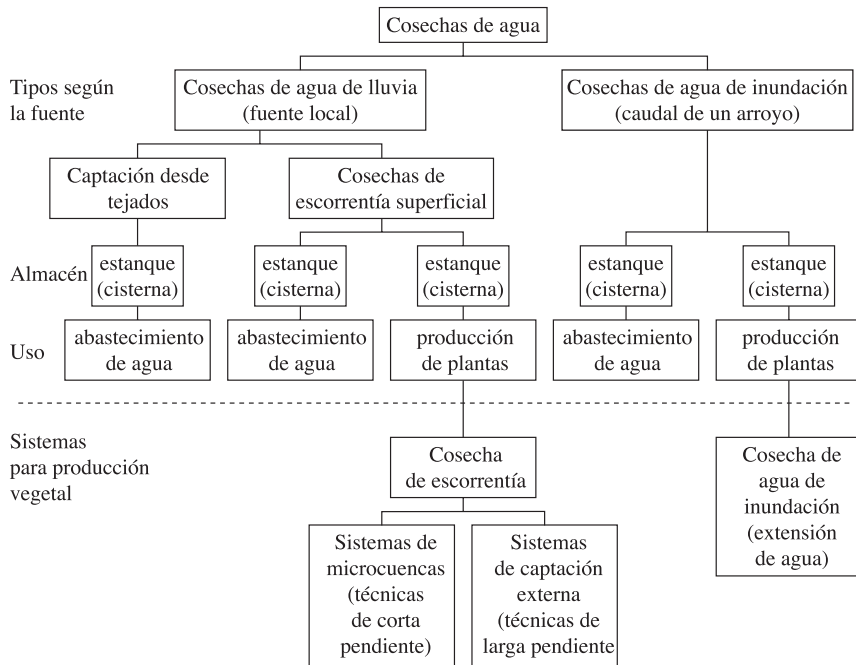
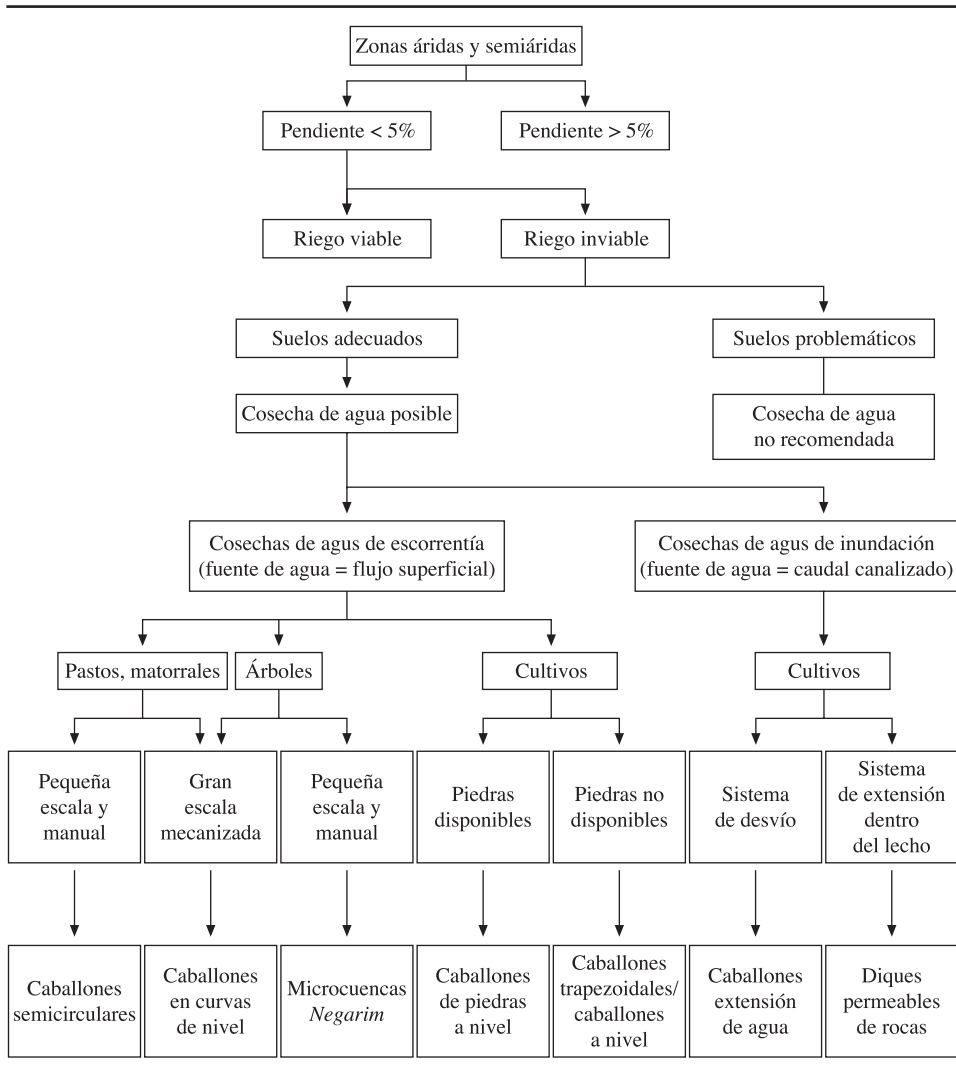


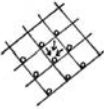

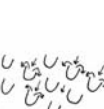
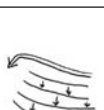
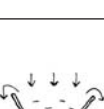



Figura 3. Selección del sistema de cosecha de agua; según Siegert (1994)



Las técnicas de cosechas de agua más conocidas y empleadas las describen con detalle CRITCHLEY & SIEGERT (1991) y ROOSE (1994), y son:

- Microcuencas *Negarim*. Son estructuras de forma cuadrada o romboidal, rodeadas por pequeños caballones de tierra y con un hoyo de infiltración en el vértice inferior de cada una de ellas, en el que se sitúa la planta. Se utilizan principalmente para la implantación de árboles y arbustos.

Tabla 1. Cuadro resumen de técnicas de cosechas de agua; según Critchley & Siebert (1991)

Técnica	Clasificación	Usos	Descripción	Lugar Adecuado	Limitaciones	Croquis
MICROCUENCAS NEGARIM (Negarim microcatchments)	Microcuenca	Árboles y pastos	Rejilla de forma romboidal o "V" formadas por pequeños caballones de tierra con hoyos de infiltración	Para plantación de árboles donde el terreno es quebrado o hay pocos árboles plantados	Difícil de mecanizar, por tanto limitado a pequeña escala. Difícil cultivar entre líneas de árboles	
CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA ÁRBOLES (Contour bunds)	Microcuenca	Árboles y pastos	Caballones de tierra según curvas de nivel cada 5 ó 10 m con surco encima y bandas perpendiculares	Para plantación de árboles a gran escala, especialmente mecanizada	No adecuada para terreno demasiado quebrado	
CABALLONES SEMICIRCULARES (Semicircular bunds)	Microcuenca	Pastos, matorrales, árboles	Caballones de tierra de forma semicircular, según curvas de nivel. En series calonadas de caballones.	Para resembrar pastos, forrajeras o plantación de árboles en terrenos degradados	No puede mecanizarse por lo que está limitado a zonas con suficiente mano de obra	
CABALLONES SEGÚN CURVAS DE NIVEL PARA CULTIVOS (Contour ridges)	Microcuenca	Cultivos	Pequeños caballones de tierra según curvas de nivel separados 1,5-3 m con surcos encima y bandas perpendiculares	Cultivos en zonas semiáridas especialmente con suelos fértiles y fáciles de trabajar	Requiere nueva técnica de preparación del terreno y plantación, por lo que puede tener problemas de aceptación	
CABALLONES TRAPEZOIDALES (Trapezoidal bunds)	Cuenca externa	Cultivos	Caballones de tierra de forma trapezoidal que captura la escorrentía desde una cuenca externa y desbordando por unos vertederos	Adecuado (en gran variedad de diseños) para cultivos en zonas áridas y semiáridas	Labor intensiva para escorrentías de diferentes cuantías	
DIQUES DE PIEDRA SEGÚN CURVAS DE NIVEL (Contour stone bunds)	Cuenca externa	Cultivos	Caballones de pequeñas piedras según curvas de nivel y espaciadas 15-35 m, que ralentizan y filtran la escorrentía	Sistema versátil para cultivos en gran variedad de situaciones. Fácil de construir por agricultores de pocos recursos	Sólo posible donde haya abundantes piedras sueltas	
DIQUES PERMEABLES DE ROCAS (Permeable rocks dams)	Técnica de inundación de tierras	Cultivos	Represas de roca, bajas y largas, a través de valles que frenan y dispersan el agua de inundación, también sirven para estabilizar barrancos	Adecuado en valles de pendiente suave que empiecen a abarrancarse y donde se requiera una mejor dispersión del agua	En sitios específicos y necesidad de gran cantidad de piedras o transportarlas de otros sitios	
CABALLONES DE EXTENSIÓN DE AGUA (Water spreading bunds)	Técnica de inundación de tierras	Cultivos, pastos, matorrales	Caballones de tierra colocados a lo largo de la pendiente, con forma de "L", que dispersan y desvían el agua de inundación	Para zonas áridas donde el agua es desviado desde los cauces hasta cultivos o forrajes	No recoge mucho agua. Mantenimiento necesario en etapas tempranas después de la construcción	

- Caballones según curvas de nivel. Esta técnica consiste en la construcción, generalmente mecanizada, de caballones de tierra siguiendo curvas de nivel. De esta manera se compartimenta la ladera en unidades más pequeñas. Tradicionalmente se realizan también unos caballones más pequeños, perpendiculares a los anteriores y separados varios metros, que delimitan las microcuencas. Se han utilizado tanto para cultivos como para la plantación de árboles. Este método es similar a los acaballonados utilizados frecuentemente en España para repoblaciones forestales (por ejemplo, acaballonado con desfonde).
- Caballones semicirculares. Este tipo de caballones, también denominados medias-lunas, son unos bancales de tierra de forma semicircular, cuyos extremos se sitúan sobre curvas de nivel. Se emplean para el establecimiento de árboles y arbustos, pastos e incluso cultivos.
- Caballones trapezoidales. Estas estructuras son similares a los caballones semicirculares, aunque en este caso su forma es trapezoidal, con un caballón base que sigue curvas de nivel, conectado a otros caballones laterales con un ángulo de 135°. Los cultivos se instalan en el área cerrada por los caballones. Para la utilización forestal de esta técnica, es necesario reducir los tamaños tradicionalmente recomendados para lograr una mayor densidad de repoblación, o bien crear bosquetes de árboles en cada caballón.
- Caballones de piedras según curvas de nivel. Los caballones de piedra según curvas de nivel son utilizados para frenar y filtrar la escorrentía, incrementando la infiltración y capturando sedimentos. El agua y los sedimentos recogidos se conducen a los cultivos implantados. Esta técnica es adecuada para su aplicación en pequeñas fincas y, según la disponibilidad de piedras, puede ser desarrollada de forma rápida y barata.
- Diques permeables de roca. Las presas permeables de roca son una técnica de cosechas de agua donde las escorrentías son extendidas en los fondos del valle para que puedan desarrollarse cultivos. Al mismo tiempo, se corrigen los barrancos existentes. Las estructuras típicas son diques largos y bajos que cruzan el cauce y el valle de lado a lado. Esta técnica puede considerarse como una forma de «wadis aterrizados», aunque este término se emplee normalmente para estructuras utilizadas en cursos de agua de zonas más áridas.
- Caballones de extensión de agua. Los caballones de extensión de agua se aplican frecuentemente en situaciones donde los caballones trapezoidales no son apropiados, normalmente porque el volumen de escorrentía es tan elevado que puede causarles daños, o porque los cultivos pueden llegar a ser anegados temporalmente, lo cual es característico de los caballones trapezoidales. La principal característica de este sistema es que, como su nombre indica, esparcen el agua y no la estancan. Son normalmente utilizados para desparramar el agua de inundación que ha sido desviado de un curso de agua o derramado de forma natural por la llanura de inundación. Los caballones, hechos normalmente de tierra, frenan el flujo de agua y lo extienden por la tierra que va a ser cultivada, para facilitar su infiltración.
- Terrazas. Las terrazas son estructuras que consisten en un surco o canal y el correspondiente lomo o caballón, generalmente construido de tierra o piedra,

trazados según curvas de nivel, de manera que intercepten la escorrentía, provocando su infiltración o evaporación, o desviándola a un lugar determinado debidamente protegido y con una velocidad controlada que no ocasione erosión en el canal (LÓPEZ CADENAS, 2003). Este método de preparación del terreno es bien conocido en España y en otros países del área mediterránea, tanto para la plantación de frutales como de especies forestales. Por este motivo, aquí sólo se van a mencionar algunos aspectos de su utilización.

5. ALGUNOS EJEMPLOS DE DESARROLLO SOCIAL Y ECONÓMICO

Un caso reciente de utilización de técnicas de cosechas de agua es el de la aldea de Ranawa en Burkina Faso (LANGE, 2003). Las tierras de labor de esta zona se habían ido abandonado, pues estaban endurecidas y yermas debido a la escasez de agua. Algunos campesinos, apoyados por agencias de cooperación, decidieron probar algo nuevo. Hicieron caballones de piedras siguiendo curvas de nivel y, de esta manera, se frenó la escorrentía y se consiguió plantar árboles y cereales, obteniéndose buenas cosechas.

Las microcuencas *Negarim* se han utilizado en Israel para el establecimiento de árboles frutales, con resultados positivos. Lo mismo se ha hecho en Rajasthan y en India, donde la especie elegida ha sido la jojoba (*Ziziphus mauritiana*). Por otra parte, en la región de Baringo (Kenia), los caballones según curvas de nivel han permitido el desarrollo de pastizales para alimento del ganado (CRITCHLEY & SIEGERT, 1991).

Otros muchos ejemplos pueden consultarse en FAO (1994) para África y Oriente Próximo y Medio, y en VELASCO-MOLINA (1991) para México.

6. OASIFICACIÓN CONTRA DESERTIFICACIÓN

El deterioro de las condiciones hídricas de una ladera (regresión hídrica) conduce 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 vegetación y sin suelo). 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 (lo ideal sería que se infiltrara todo lo que lloviese), 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

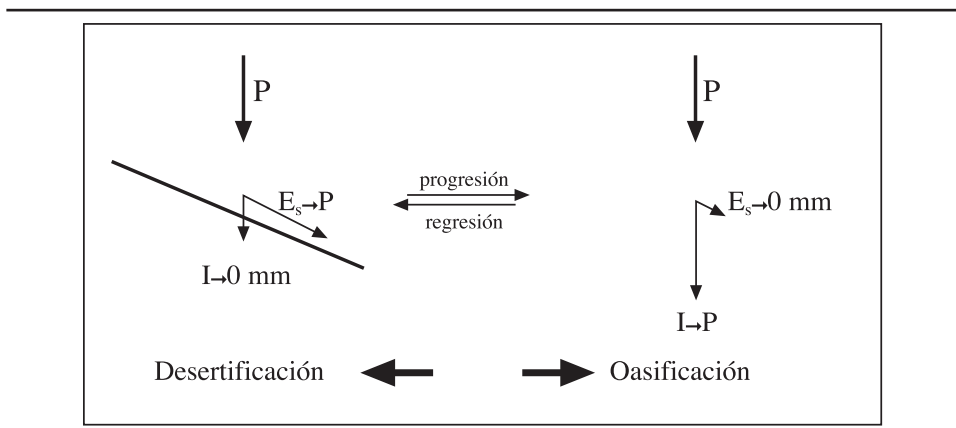
formaciones vegetales protegen al suelo frente a la erosión y le aportan materia orgánica, facilitando su evolución hacia un perfil más fértil, profundo y maduro.

Ambos procesos, el retroceso desde los tres puntos de vista mencionados (que pueden agruparse en el término desertificación) y el avance hacia situaciones más favorables (*oasificación*), se explican gráficamente en la figura 4.

En la mayoría de los casos, la desertificación por aridez edáfica puede revertirse mediante sencillas operaciones individuales a pequeña escala que terminan por resolver el problema a escala regional y global. Un uso agroforestal adecuado por parte de cada propietario, de cada lugareño, resulta crucial para evitar procesos de desertificación. 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.

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 ectomicorizas productoras de hongos silvestres comestibles (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.

Figura 4. Oasificación *contra* desertificación



P = Precipitación; E_s = Escorrentía superficial; I = Infiltración.

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.

7. EL MODELO HIDROLÓGICO MODIPÉ

MODIPÉ (acrónimo de Modificación de Precipitaciones) es un modelo hidrológico que sirve para calcular las disponibilidades hídricas (infiltración) en un punto de una ladera, originada por un aguacero o por una serie de aguaceros. Ha sido creado especialmente para el diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas o semiáridas, con criterios de recolección de agua (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1995, 1996).

MODIPÉ ha sido concebido como una herramienta auxiliar para el diseño técnico de repoblaciones forestales en zonas mediterráneas, que sirve de apoyo al ingeniero para su toma de decisiones a la hora de restaurar una ladera. Muchos de los métodos de preparación del suelo llevan siendo ensayados con éxito desde hace muchos años pero carecen de un cuerpo de doctrina que los refrende. Son métodos bien arraigados y experimentados en el quehacer cotidiano del ámbito forestal, a los que MODIPÉ puede dar una mayor validez técnica, puede reforzar su uso y orientar acerca de algunas mejoras y precisiones. También puede desechar algunos métodos de preparación del suelo en relación a su eficacia hidrológica.

MODIPÉ sirve, igualmente, para diseñar la preparación del suelo en taludes originados por obras públicas y minería a cielo abierto. También puede ser de utilidad en arboricultura de secano en laderas pronunciadas (olivares, almendrales, viñedos, algarrobales, etc.).

Las principales aplicaciones del modelo MODIPÉ son las que se mencionan seguidamente:

- 1) Sirve para caracterizar microclimas de ladera, cuantificando el volumen de agua que se infiltra en cada uno de sus puntos).
- 2) Ayuda a comprender los procesos de desertificación por aridez edáfica.
- 3) Permite simular el comportamiento hidrológico de cualquier unidad sistematizada (área de impluvio y área de recepción del microembalse).

- 4) Evalúa el efecto hídrico que tienen los distintos procedimientos de preparación del suelo en repoblaciones forestales (microcuencas, acaballonados, aterrizados, etc.).
- 5) Posibilita el diseño técnico de trampas de agua con las que incrementar la infiltración en una ladera, con el principal objetivo de disminuir el número de marras por estrés hídrico.
- 6) Permite calcular el volumen mínimo de tierras a remover en una ladera degradada para invertir el proceso de desertificación por aridez edáfica (*oasificación* mediante cosechas de agua).

En resumen, se trata de una herramienta muy útil para el correcto diagnóstico y para la acertada toma de decisiones del técnico encargado de restaurar taludes y laderas degradadas en zonas mediterráneas. Es deseable que todo proyecto de restauración incorpore un estudio hidrológico serio sobre la preparación del suelo planteada, especialmente si se centra en climas áridos o semiáridos. Para tal fin el modelo MODIPÉ resulta, hoy por hoy, insustituible tanto desde el punto de vista conceptual como a nivel práctico.

8. BIBLIOGRAFÍA

- BAZZA, M.; TAYAA, M. (1994). «Operation and management of water harvesting techniques». *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports FAO, 3.
- BOERS, TH. M.; BEN-ASHER, J. (1982). «A review of rainwater harvesting». *Agric. Water Manage.*, 5: 145-158.
- CADOT, P.D. (1989). *Development of a model for design of water harvesting systems in small scale rainfed agriculture*. Ann Arbor: University of Arizona. U.M.I.
- CRITCHLEY, W.; SIEGERT, K. (1991). *Water harvesting*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- EVENARI, M. (1987). *Und die Wüste trage Frucht. Ein Lebensbericht*. Gerlingen: Bleicher.
- 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*. Rehovot: Ed. The National and University Institute of Agriculture.
- EVENARI, M.; SHANAN, L.; TADMOR, N.H. (1964). *Runoff-farming in the Negev desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects 1962-1963*. Rehovot: Ed. The National and University Institute of Agriculture.
- FAO. (1994). *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports 3. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations.
- FIDELIBUS, M.W.; BAINBRIDGE, D.A. (1994). «Microcatchment water harvesting for desert vegetation». In: *Restoration in the Colorado Desert: Management Notes*.
- FRASIER, G.W. (1994). «Water harvesting/runoff farming systems for agricultural production». *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports FAO, 3.
- GONZÁLEZ ALONSO, S.; ENCINAS, A. (1995). «Ecotonos forestales: la importancia de las fronteras». *Quercus*, 117: 18-21.
- LANGE, K.E. (2003). «El desierto retrocede». *National Geographic*, vol. 13, núm. 11.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. (1995). *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera. III. Particularización al modelo de escorrentía de los complejos hidrológicos. Modelo MODIPÉ*. Informe inédito para el proyecto LUCDEME (ICONA). Palencia.

- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A (1996). *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Madrid: Ed. Mundi-Prensa.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; ORIA DE RUEDA, J.A. (1996). «Hacia una silvicultura fúngica para los hongos silvestres de Castilla y León». *Medio Ambiente en Castilla y León*, nº 6: 13 - 21.
- MONTERO DE BURGOS, J.L.; GONZÁLEZ REBOLLAR, J.L. (1983). *Diagramas bioclimáticos*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Instituto para la Conservación de la Naturaleza).
- NASR, M. (1999). *Assessing desertification and water harvesting in the Middle East and North Africa: Policy implications*. Bonn: ZEF.
- ORIA DE RUEDA, J.A. (1989). «Silvicultura y Ordenación de montes productores de hongos micorrizógenos comestibles». *Boletín de la Sociedad Micológica de Madrid*, volumen nº 13; 175 – 188
- OWEIS, TH.; HACHUM, A.; KIJNE, J. (1999). *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas*. Colombo: SWIM Papers.
- ROOSE, E. (1994). «Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)». *Bulletin Pédologique de la F.A.O.*, 70.
- SHANAN, L.; TADMOR, N.H.; EVENARI, M. (1958). «The ancient desert agriculture of the Negev. II. Utilization of runoff from small watersheds in the Abde (Ovdat) Region». *Ktavim*, 9: 107-128.
- SHANAN, L.; TADMOR, N.H. (1979). *Micro-catchment systems for arid zones development; a handbook for design and construction*. Jerusalén: Hebrew University.
- SIEGERT, K. (1994). «Introduction to water harvesting: some basic principles for planning, design and monitoring». *Water harvesting for improved agricultural production*. Water Reports FAO, 3.
- TADMOR, N.H.; EVENARI, M.; SHANAN, L.; HILLEL, D. (1957). «The ancient desert agriculture of the Negev. I. Gravel mounds and gravel strips near Shivta (Sbeita)». *Ktavim*, 8: 127-151.
- VELASCO-MOLINA, H.A. (1991) *Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo*. México D.F.: Ed. Limusa.