

y dinámicos. Estos programas incluyen estudios del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur y otras causas posibles de las sequías meteorológicas y su impacto en los sistemas socioeconómicos. Los programas de la OMM también están tratando de la comprensión de los procesos de la sequía y la desertización y de la realimentación entre los diferentes procesos que podrían contribuir al cambio climático.

Enseñanza y formación profesional, incluida la concienciación del público

A la enseñanza y a la formación se les asignará la máxima prioridad. Mediante misiones de expertos de corta y media duración, seminarios de formación itinerantes, cursos de formación y simposios, la OMM continuará proporcionando formación sobre el puesto de trabajo en agrometeorología operativa, y formación en las técnicas específicas para evaluar y minimizar los efectos de la desertización y la sequía, especialmente en las zonas áridas, semiáridas, subhúmedas y otras zonas propensas a la desertización.

La OMM también concederá más atención a aumentar la concienciación del público y a la comunicación, con el fin de llenar el vacío entre los responsables de la investigación científica en las zonas de sequía y desertización y los usuarios de la información meteorológica, climatológica e hidrológica, y así mejorar la conciencia ambiental y aumentar los efectos de los proyectos.

Transferencia de tecnología

Uno de los principales objetivos de los programas de la OMM ha sido la disponibilidad para los Miembros de la OMM de la adecuada tecnología, equipamiento, materiales y gestión y otros

conocimientos técnicos. Los sectores de transferencia de tecnología van desde los métodos simples de medida a las tecnologías complejas, incluida la utilización de la tecnología de la teledetección e informática.

Conclusión

La OMM ha jugado un importante papel para asegurar que sus Miembros contribuyen de forma efectiva al control de la desertización y a paliar los efectos de las sequías de una manera rentable. El papel futuro de la OMM será el de continuar apoyando a sus Miembros en la mejora de sus capacidades para conocer los complejos procesos de las sequías y de la desertización. La OMM también promoverá la aplicación de la información meteorológica, climatológica e hidrológica a la planificación y gestión de los programas agrícolas y otros relativos a la utilización del suelo y del agua, con el fin de minimizar la degradación del suelo y la desertización y proporcionar ayuda técnica y científica para los proyectos nacionales de desarrollo. También recibirán consideración prioritaria la enseñanza, la formación y la capacitación.

Referencias

- HARE, F. K., 1985 (revisada por L. A. OGALLO, 1993): *Climatic Variations, Drought and Desertification* (Variaciones climáticas, sequía y desertización). OMM-Nº 653, 47 pp.
- PNUMA, 1992(a): *World Atlas of Desertification* (Atlas mundial de la desertización), 69 pp.
- PNUMA, 1992(b): *Desertification Control Bulletin* (Boletín del control de la desertización), 22.

PROCESOS HIDROLOGICOS Y DEGRADACION DE LAS TIERRAS SECAS

Por J. S. WALLACE*

El problema y su escala mundial

La degradación del suelo y de la vegetación está muy extendida en las zonas áridas y constituye un importante problema ambiental mundial. Las zonas de tierras secas constituyen más de la tercera parte del total de la superficie terrestre cubierto por tierras, estando en proceso de degradación gran parte de ellas (véase la tabla de al lado), con graves efectos sobre el medio ambiente, la producción de alimentos y las vidas de cientos de millones de personas. Aunque las ac-

tuales estimaciones de la degradación mundial de las tierras secas varían ampliamente, debido a la falta de acuerdo en los criterios de degradación cuantitativos, la extensión del problema es claramente de una gran magnitud, cubriendo una zona varias veces mayor que las zonas más generalmente reconocidas como sujetas a la desaparición de los bosques tropicales.

A la degradación de las tierras secas se la ha denominado anteriormente "desertización", si bien no se conocen actualmente su verdadera

* Jefe de la División de Procesos Hidrológicos, Instituto de Hidrología, Wallingford, Oxfordshire OX 10 8BB, Reino Unido.

Estimación de la degradación mundial de las tierras secas y comparación con los bosques tropicales

	Area total' (millones de Ha)
Superficie de suelo de la Tierra	13 077
Zona árida	4 480
Tierras secas degradadas (% de la zona árida)	1 040-3 760 (23%-84%)
Ritmo anual de degradación de las tierras secas	~26 ²
Zona tropical	4 815
Bosques tropicales	1 400
Bosques tropicales degradados (% de área de bosques)	~622 (44%)
Ritmo anual de degradación de bosques tropicales	~14

¹ Fuentes de los datos, Le Houérou (en prensa); Myers (1991); PNUMA/GEM/GRID (1991); Verstraete and Schwartz (1991); y WRI/IIED (1989)

² A efectos de comparación, el área total de Gran Bretaña es de 23 millones de Ha

amplitud y sus causas. Se han propuesto numerosas definiciones y la profusión de éstas, conjuntamente con la casi completa carencia de información cuantitativa fiable, ha ayudado a crear la imagen popular de la inexorable expansión de los desiertos naturales existentes, lo que generalmente se considera ahora como un error de concepto. La desertización se percibe actualmente como una degradación de las tierras secas, que tiene lugar mediante un proceso sutil, disperso y continuo, principalmente alejado de las franjas desérticas, teniendo lugar la conversión total de las tierras fértiles en desérticas solamente en los casos extremos. Las actuales definiciones también reconocen que tanto los factores climáticos como humanos pueden contribuir a la degradación de las tierras secas. Sin embargo, cada uno de ellos posee diferentes mecanismos causales y por lo tanto precisan de tratamientos diferentes.

En la figura 1 se ilustra un posible marco para explicar los procesos de la degradación de las tierras secas, donde una reducción en la vegetación puede ser causada por cualquiera (o

por una combinación) de cuatro mecanismos. Las presiones antropogénicas directas tales como el exceso de pastoreo, el sobrecultivo y la deforestación pueden causar una reducción en la vegetación (mecanismo 1). La pérdida de cobertura vegetal puede disparar mecanismos de realimentación que pueden propagar una degradación del suelo vía la realimentación atmósfera-superficie terrestre (mecanismo 2). Este mecanismo tiene lugar cuando una reducción en la evaporación y un aumento en la cantidad de radiación reflejada hacia la atmósfera (albedo) reducen la formación de nubes y la precipitación, causando una realimentación negativa, que puede reducir más la vegetación. Un tercer mecanismo posible que contribuye a la degradación de las tierras secas es el hidrológico (mecanismo 3). Tiene lugar cuando la reducción de la cobertura del suelo asociada con la degradación de la vegetación da lugar a un aumento de escorrentía y a una reducción en el almacenamiento de la humedad del suelo (figura 2). En esta situación, no toda la lluvia que cae sobre el suelo degradado está disponible para el crecimiento y supervivencia de las plantas. La realimentación hidrológica también puede existir en ausencia de cualquier cambio climático (el cuarto mecanismo de la figura 1). Aquí, las influencias "externas" procedentes de las anomalías de la temperatura superficial de los océanos, de la deforestación tropical húmeda o del cambio climático causado por el CO₂ se piensa que están asociadas con la

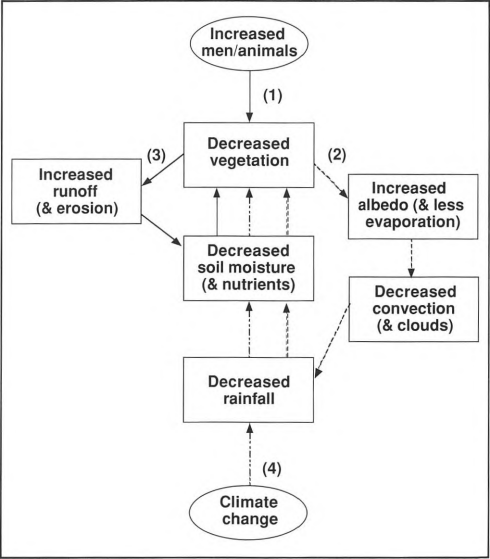


Figura 1 - Marco de los mecanismos posibles de degradación de las tierras secas: (1) antropogénico; (2) realimentación atmósfera-superficie terrestre, (3) realimentación hidrológica; (4) cambio climático.



Figura 2 - En el Sahel, cuando llegan las lluvias, poco frecuentes, se invierten en gran medida en escorrentía en forma de riadas repentinas debido a la corteza de la superficie, dejando muy poca ganancia neta de humedad en el perfil del suelo

sequía y la degradación de las zonas áridas tales como el Sahel de África occidental.

Obviamente, y con el fin de especificar las medidas paliativas adecuadas, es importante determinar en qué grado están conectados los diferentes factores descritos con la degradación de las tierras secas. Por ejemplo, si la degradación se debiese enteramente al exceso de pastoreo, entonces el control del forraje almacenado en la zona podría permitir que la vegetación se regenerase, mientras que si el cambio climático ha tenido lugar por factores externos, podría no ser así. Es, por tanto, un desafío científico conocer el funcionamiento de los ecosistemas de las tierras secas, de forma que seamos capaces de reconocer y distinguir entre los cambios resultantes de la variabilidad climática natural (p.e., las sequías), de la actividad humana (p.e., sobrecultivo y pastoreo excesivo) y del cambio climático inducido "internamente" por la degradación del suelo a gran escala, o "externamente" por las anomalías de la temperatura superficial del agua de los océanos, por la deforestación tropical o por el aumento de la concentración de CO_2 en el ambiente. Sin embargo, cualquiera que sea la causa originaria, es evidente que el mecanismo central de todos los procesos asociados es un cambio radical en el ciclo hidrológico. A medida que estos procesos se comprendan mejor, se llegará a una mejor definición de los indicadores cuantitativos de la degradación que pueden utili-

zarse para evaluar de forma más precisa la amplitud y el ritmo del cambio de degradación en las zonas de tierras secas.

Mecanismos de degradación de las tierras secas

Los mecanismos de realimentación atmósfera-superficie terrestre que pueden estar asociados con la degradación de las tierras secas han sido estudiados por los modelizadores de la circulación general y en experimentos de campo en dos zonas del mundo amenazadas por la desertización. En la parte central de España, donde la degradación de la vegetación y la reducción en los recursos de aguas subterráneas están originando una creciente preocupación, el Instituto de Hidrología del Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural, del Reino Unido, ha participado en el Experimento de Campo Europeo en una Zona Amenazada de Desertización (EFEDA). Este experimento tuvo lugar durante el verano de 1991 en Castilla-La Mancha y participaron más de 30 equipos científicos multidisciplinarios de toda Europa y de los EE.UU. para estudiar los procesos de transferencia de agua y de energía entre el suelo, la vegetación y la atmósfera en condiciones semiáridas. Las medidas se realizaron desde la escala de una hoja individual hasta la escala compatible con los modelos de la circulación general (MCG), es decir, varios cientos de

kilómetros, utilizando los sensores más modernos situados tanto sobre aviones como en tierra. La fuerte reducción estacional en la vegetación que tuvo lugar durante el EFEDA fue seguida mediante los datos de satélite tomados por el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR). La interpretación de este cambio estacional normal de la cubierta vegetal y sus cambios asociados en los flujos superficiales de calor y de evaporación contribuirán a una mejor comprensión de la conexión entre la degradación del suelo y el clima.

También se han estudiado las realimentaciones atmósfera-superficie terrestre bajo las condiciones semiáridas más extremas y extensas en el Sahel de África occidental. Esta zona del mundo es quizá el ecosistema de tierras secas más delicado y el que se está enfrentando a un mayor grado de degradación del suelo. Los hidrólogos desempeñaron un papel principal en la organización y en la participación del mayor y más ambicioso estudio a gran escala de las interacciones de la superficie terrestre que jamás se haya hecho: el HAPEx-Sahel (Experimento Piloto Atmosférico Hidrológico en el Sahel). Este experimento se realizó entre 1991 y 1993 y participaron más de 170 científicos africanos, americanos y europeos en 66 estudios diferentes, todos ellos en un cuadrado de 100 km² en Níger, África occidental (figura 3). El medio ambiente del Sahel se caracteriza por la escasa y errática precipitación; y se está de acuerdo en que se ha venido

reduciendo a lo largo de los dos últimos decenios. Los intentos para comprender esta reducción de la precipitación y si está relacionada con la degradación del suelo han sido uno de los sectores más activos de aplicación de los MCG. Sin embargo, existe una aguda necesidad de datos y del desarrollo de técnicas de modelización y de medida que se puedan utilizar para cuantificar la interacción de este paisaje tan variado con la atmósfera situada encima en escalas de varios cientos de kilómetros.

La figura 4 muestra el equipo micrometeorológico utilizado por el Instituto de Hidrología del Reino Unido para la adquisición de los datos de intercambio energético necesarios para contrastar los tipos de suelo del Sahel: sabana sin cultivar con espesa vegetación y bosques de tierras secas con cobertura sólo parcial. Estos estudios micrometeorológicos proporcionaron información detallada de zonas de hasta un kilómetro cuadrado; de forma efectiva, solamente un punto de medida en función de las necesidades de datos de entrada de un MCG. En consecuencia, deberán desarrollarse métodos para trasponer estas medidas puntuales a las zonas mucho más grandes asociadas con los MCG. La posibilidad de utilizar datos de teledetección para extrapolar desde un punto a las escalas regionales es un tema central del HAPEx-Sahel. Se han obtenido resultados esperanzadores hasta ahora utilizando los datos del infrarrojo térmico del LANDSAT

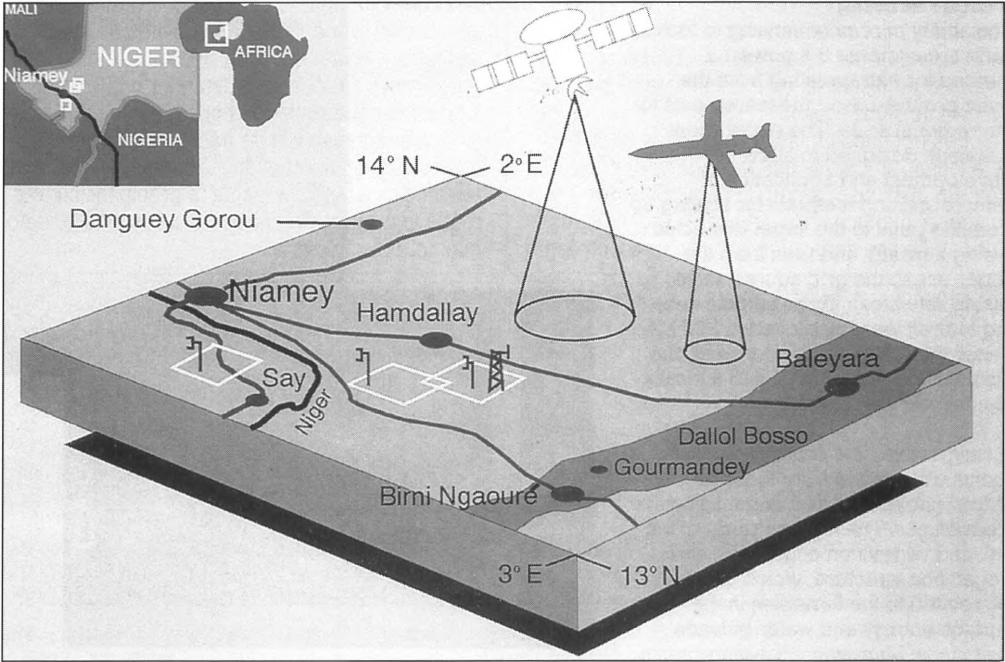


Figura 3 - El cuadrado experimental del HAPEx-Sahel

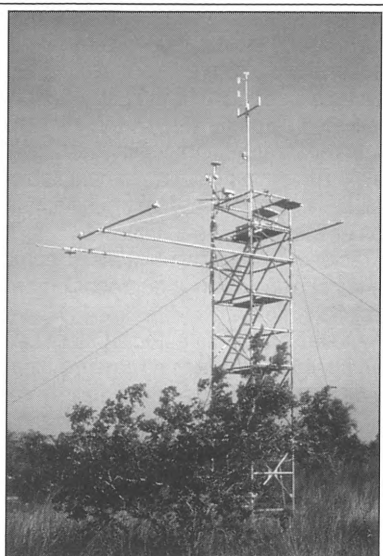


Figura 4 - Medidas en el Sahel de intercambio de energía de (izquierda) tierra cubierta parcialmente con vegetación (arbustos tigre) (véase también la figura 5) y (derecha) tierra cubierta de abundante vegetación (sabana sin cultivar)

para representar la variación de la evaporación en una zona de unos 15 x 15 km.

Los datos recopilados por el Instituto de Hidrología en África occidental se han utilizado para desarrollar un modelo de balance energético de dos fuentes para vegetación dispersa, que ya ha mejorado la parametrización de la sabana tropical en el modelo de la circulación general de la *Meteorological Office* del Reino Unido. Este modelo físicamente realista admite flujos simultáneos (e igualmente importantes) de calor y evaporación procedentes del suelo desnudo y de la vegetación y las interacciones entre ambos. Puesto que más del 70 por 100 de la vegetación mundial se puede definir como dispersa, esto constituye un paso hacia delante significativo.

Los bosques de las tierras secas también se encuentran bajo la amenaza de la degradación. En ellos se originan la madera y el forraje y su sobreexplotación puede alterar los recursos hídricos de una zona influyendo en la escorrentía

de los temporales y en la recarga de los acuíferos subterráneos. Un bosque natural habitual en la región del Sahel es el de *arbusto tigre* (véanse las figuras 4 y 5), llamado así porque la vegetación crece en bandas densas separadas por suelo completamente desnudo. Las medidas del balance hídrico realizadas en este tipo de terreno indican que, aunque los arbustos sólo cubren el 33 por 100 de la zona, son capaces de utilizar más del 70 por 100 de la precipitación en los años secos. Esto proporciona una prueba clara de una forma natural de "cosechar agua" por la vegetación procedente de las zonas de suelo desnudo y lleva a la conclusión de que estos lugares son incapaces de mantener una vegetación densa de arbolado sobre toda su superficie sino que, en ausencia de intervención humana, las bandas de vegetación se pueden ajustar a las tendencias a largo plazo de la precipitación alterando la proporción entre suelo desnudo y suelo con cobertura vegetal.

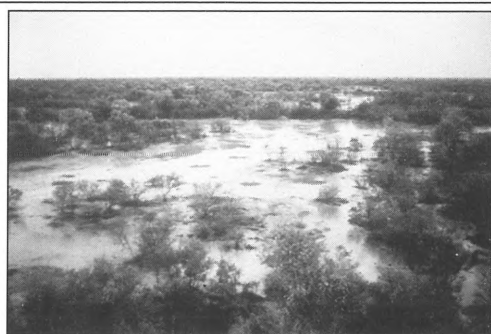


Figura 5 - Tierra cubierta parcialmente de vegetación (típicamente menos de 50 por 100) conocida en el Sahel como *arbusto tigre* (izquierda). Durante las precipitaciones intensas el agua escurre hacia las bandas con vegetación, debido a la corteza de suelo muy impermeable (derecha)

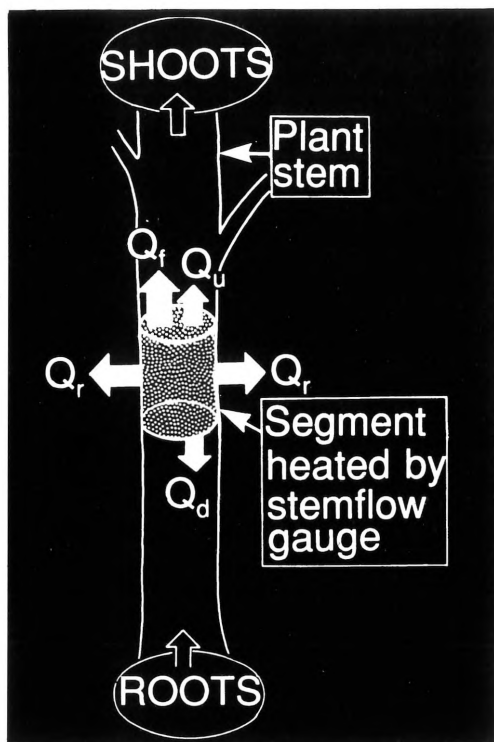


Figura 6 - El principio del balance de calor en el tallo para medir el flujo de savia en el tallo de la planta. Una cantidad conocida de calor aplicada en el tallo se pierde por conducción radial (Q_r), conducción vertical (Q_u y Q_d) y en el flujo de la savia (Q_p). Este dispositivo es relativamente sencillo de instalar y se puede dejar durante varias semanas en la planta. Una ventaja adicional es la posibilidad de registrar las magnitudes automáticamente mediante dispositivos de estado sólido

Mejora o prevención de la degradación en las zonas propensas

La puesta en práctica de medidas preventivas en tierras que o bien todavía no están degradadas o que están sólo ligeramente degradadas constituye una prioridad que no puede esperar hasta que se comprendan totalmente todos los procesos que hay tras la degradación. Todos los ejemplos de los tipos de medidas que se pueden tomar llevan aparejados una mejora en la eficiencia con la que se utilizan los recursos naturales (especies, suelo, agua, nutrientes, etc.) e incluyen una mejora en la gestión de los bosques y de las praderas, en la agrosilvicultura y en los cultivos de las tierras secas. Esos sistemas no pueden gestionarse de forma sostenible sin la información básica sobre los recursos naturales que consumen. Los hidrólogos han contribuido a desarrollar y a aplicar nuevas técnicas de modelización y de medida que se requieren para tratar en

su complejidad estos sistemas mixtos de utilización del suelo.

Por ejemplo, se han aplicado nuevas técnicas para medir la utilización del agua por parte de arbustos leñosos y de árboles en la sabana natural y en los bosques de las tierras secas típicos del sur de la India y de Níger. Un componente clave de las sabanas de África occidental es el arbusto leñoso *Guiera senegalensis*. El Instituto de Hidrología ha estado probando un nuevo instrumento que, cuando se aplica al tallo del arbusto, es capaz de medir directamente la cantidad de agua transpirada (figura 6). Los datos procedentes de este instrumento, que tiene la ventaja de que se obtienen automáticamente, muestran el dramático aumento en la utilización del agua por parte de este arbusto que acompaña a la rápida expansión de la parte foliácea estimulada por la precipitación (figura 7).

También se han utilizado métodos hidrológicos nuevos para vigilar la utilización del agua en las plantaciones de *eucalyptus* en el sur de la India. En este caso, se inyecta óxido de deuterio en los árboles y se mide su concentración en las hojas a lo largo de varios días, con lo cual puede calcularse la variación media del flujo del agua en los árboles. Los datos obtenidos de esta técnica muestran que los eucaliptos no consumen más agua que los bosques autóctonos del sur de la India donde el nivel freático es muy profundo. En una zona análoga, se encontró que otra plantación de *eucalyptus* estaba utilizando más agua que la disponible por precipitación. Una posible explicación de este resultado inicialmente sorprendente era que los árboles estaban extrayendo agua de capas subterráneas cada vez más profundas. Obviamente, éste es un ejemplo de un sistema no sostenible. Con el conocimiento adicional de en qué medida permiten la recarga los sistemas de agricultura tradicional, sería posible sin embargo diseñar rotaciones de árboles y cul-

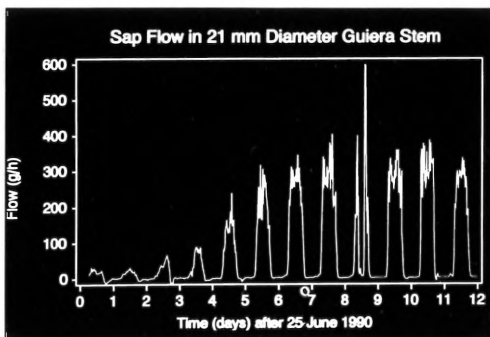


Figura 7 - Variación de la transpiración en un arbusto de *Guiera* después de las primeras lluvias de la estación lluviosa de 1990: el súbito decrecimiento en el ritmo del flujo alrededor del mediodía del día 8 fue debido a una tormenta de lluvia

tivos, de forma que las aguas profundas extraídas por los árboles se rellenasen por recarga cuando hubiese cultivos. La duración de cada parte de la rotación podría ajustarse para diferentes regímenes de precipitación o para cambios climáticos.

Una de las formas más prometedoras de reducir la degradación de las tierras secas y de lograr una utilización sostenible del suelo en los trópicos semiáridos es mediante el uso de comunidades mixtas de plantas que puedan hacer un uso más eficiente de los recursos naturales tales como la precipitación. La agrosilvicultura es un buen ejemplo, puesto que la mezcla de árboles y cultivos ha demostrado ser valiosa tanto en términos de conservación del suelo como de mejora de la productividad. El éxito de las diferentes opciones de árboles y cultivos depende, sin embargo, del grado en el que los componentes de la mezcla son complementarios en su empleo de la luz, del agua y de los nutrientes. Los Institutos de Hidrología y Ecología Terrestre del Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural, del Reino Unido, ha participado recientemente en proyectos de silvicultura en Kenia y en Nigeria que están específicamente diseñados para mejorar nuestro conocimiento de los principios en que se basa el reparto de los recursos y para desarrollar técnicas de medida y modelos de utilización del agua por parte de árboles y de cultivos que crezcan conjuntamente. Estos sistemas hidrológicos son muy complejos y constituyen un desafío científico, puesto que todavía no se dispone de muchas de las técnicas de medida y de modelización y se requieren comprobaciones y desarrollos sustanciales. Sin embargo, los cálculos iniciales indican que no se utiliza toda la precipitación en los sistemas tradicionales de cultivo en las zonas áridas y que el resto puede ser suficiente para permitir el crecimiento de plantaciones de árboles muy valiosas.

El futuro papel de la hidrología

Puesto que está claro que los mecanismos hidrológicos constituyen el núcleo de muchos temas clave relativos a la degradación de las tierras secas, los hidrólogos tendrán un papel cada vez más importante tanto en su estudio como en las recomendaciones resultantes de medidas paliativas. Hay tres sectores de importancia clave para la degradación de las tierras secas en las que tendrán que centrarse los futuros trabajos hidrológicos. Primeramente, en los estudios de los procesos hidrológicos fundamentales asociados a la degradación de las tierras secas. Por ejemplo, las realimentaciones atmósfera-superficie terrestre y los impactos hidrológicos y ecológicos de una cubierta ve-

getal reducida y de los cambios en el uso de la tierra. En segundo lugar, vía el desarrollo de indicadores cuantitativos de la degradación, especialmente (pero no de forma exclusiva) los que pueden detectarse utilizando técnicas de teledetección. Estas pueden incluir la utilización de los sensores espaciales de nueva generación (p.e., los sensores pasivos de microondas y los radiómetros de barrido de los dos satélites ERS, altímetros láser, etc.) para detectar el tipo de suelo, las características de humedad e infiltración, la cantidad de vegetación dispersa, especialmente las especies leñosas perennes y la erosión del suelo. En tercer lugar se centrará en estudiar la eficiencia en el uso básico del agua y en el crecimiento de las plantas en las zonas áridas. Esta información se necesita para comprender la supervivencia de las plantas en los medios ambientes áridos y cómo las diferentes especies de plantas pueden optimizar la producción en relación con el abastecimiento de agua (y de nutrientes). Muchos de estos estudios requieren del desarrollo ulterior de nuevas técnicas y modelos de los mecanismos hidrológicos relacionados. Los sistemas específicos en los cuales se necesitan estos estudios incluyen a los cultivos en tierras secas, los intercultivos, la agrosilvicultura, las praderas naturales y los bosques.

La escala del problema puede que sea grande, pero es obvio el desafío y la oportunidad para la aplicación y dedicación de los conocimientos hidrológicos. Simplemente, no será posible diseñar sistemas sostenibles de gestión para las regiones con tierras secas sin un conocimiento mayor de los procesos hidrológicos en estas zonas.

Referencias

- LE HOUÉROU, H. N., 1992: An overview of vegetation and land degradation in world arid lands. *In: Degradation and restoration of arid lands.* Texas Technical University, 127-163.
- MYERS, N., 1991: *Deforestation rates in tropical forests and their climatic implications.* Friends of the Earth Trust, Londres.
- PNUMA/GEMS/GRID, 1991: *Technical Expert Consultation on Global Data on the Extent of Arid Lands and Desertification.* Actas de una reunión que se celebró en Roma el 3 y el 4 de abril de 1991. PNUMA/GEMS, Nairobi, 8 pp.
- VERSTRAETE, M. M. y S. A. SCHWARTZ, 1991: Desertification and global change. *Vegetation* **91**, 3-13.
- WRI/IIED, 1989: *World Resources 1988-89.* An assessment of the resource base that supports the global economy. WRI/IIED/PNUMA. Basic Books, Inc. Nueva York.