

Avances recientes y retos en el estudio y evaluación de la desertificación: de la teoría a la práctica

Resumen

La desertificación es uno de los principales problemas ambientales de las zonas de clima árido, semi-árido y seco-subhúmedo, que ocupan aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre. Pese a su importancia, al ingente esfuerzo investigador realizado en las últimas décadas, y a la existencia de una convención internacional para luchar contra este fenómeno, existen numerosas incertidumbres sobre cómo detectar la aparición de la desertificación antes de que sus efectos sean irreversibles, y sobre las distintas medidas de gestión ambiental que se puedan aplicar para evitar y minimizar este complejo fenómeno. En este artículo se revisan de una manera breve los principales avances realizados en el estudio de la desertificación en los últimos años, prestando especial atención a los nuevos desarrollos teóricos y a los progresos que se están realizando en la evaluación y seguimiento de este fenómeno. También se discuten algunos de los principales retos que la desertificación plantea a científicos y gestores del territorio, así como líneas de investigación futuras que permitirán ayudar a mejorar nuestra comprensión de la desertificación y a establecer medidas apropiadas para mitigar sus efectos negativos sobre los territorios afectados.

Fernando Tomás
Maestre Gil

Universidad
Rey Juan Carlos

1. Introducción

Las Naciones Unidas definen la desertificación como la “degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas resultante de varios factores, incluyendo las variaciones climáticas y las actividades humanas” (Reynolds *et al.*, 2005). Las zonas de clima árido, semiárido y seco-subhúmedo –aquéllas que tienen un índice de aridez (IA, obtenido a partir del cociente entre la precipitación anual media y la evapotranspiración potencial media) inferior a 0,65 (Middleton y Thomas, 1997)–, ocupan casi $6.200 \cdot 10^6$ hectáreas, aproximadamente el 47% de la superficie terrestre, y albergan casi al 40% de la población total del planeta (Reynolds *et al.*, 2007a). En muchas de estas zonas, ciertos cambios demográficos, tecnológicos y socioeconómicos se han unido al cambio climático que está ocurriendo en la actualidad para promover una presión excesiva sobre sus recursos naturales, que ha originado una intensa degradación del suelo, la cubierta vegetal y los procesos ecológicos, biogeoquímicos e hidrológicos, provocando una pérdida de productividad biológica y socioeconómica que han derivado en su desertificación (Puigdefábregas 1995, Reynolds 2001).

La desertificación es un problema ambiental de primera magnitud en España, ya que dos tercios de su territorio se encuentran en zonas de clima árido, semiárido y seco-subhúmedo (Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2008). Toda la mitad Sur del país, a excepción de las cadenas montañosas más elevadas, más la meseta Norte, la cuenca del Ebro y la costa catalana presentan este clima, por lo que son susceptibles de desarrollar el fenómeno de la desertificación. De hecho, datos oficiales apuntan a que aproximadamente el 18% del total del territorio español tiene un riesgo alto y muy alto de sufrir procesos de desertificación, mientras que si se incluyen también las zonas con un riesgo medio esta cifra aumenta hasta el 37% (Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2008). Este riesgo es particularmente importante en comunidades como Andalucía, Canarias y Murcia, que tienen más del 50% de su territorio bajo riesgo de sufrir los efectos de la desertificación (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución del nivel de riesgo de sufrir desertificación del territorio de cada comunidad autónoma*

Comunidad Autónoma	Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Andalucía	214.343 (2,45)	2.856.225 (32,60)	1.828.505 (20,87)	2.948.171 (33,65)
Aragón	-	768.605 (16,10)	1.152.608 (24,25)	1.915.579 (40,13)
Asturias	-	-	-	-
Baleares	7.375 (1,48)	16.271 (3,26)	91.574 (18,33)	248.439 (49,73)
Canarias	221.853 (29,98)	352.413 (47,62)	72.076 (9,74)	60.720 (8,20)
Cantabria	-	-	-	-
Castilla La Mancha	206.422 (2,60)	1.777.332 (22,38)	2.698.497 (33,98)	2.915.360 (36,71)
Castilla León	18.575 (0,20)	372.637 (3,95)	870.899 (9,24)	5.363.104 (56,92)
Cataluña	11.448 (0,36)	368.446 (11,44)	477.406 (14,83)	931.038 (28,91)
Extremadura	8.708 (0,21)	373.096 (8,95)	958.476 (23,00)	2.467.763 (59,21)
Galicia	-	-	-	-
La Rioja	-	80.621 (15,99)	81.940 (16,25)	145.101 (28,78)
Madrid	1.116 (0,14)	176.783 (22,04)	173.458 (21,62)	372.622 (46,45)
Murcia	206.601 (18,27)	283.831 (25,10)	419.494 (37,10)	218.051 (19,28)
Navarra	-	44.662 (4,30)	162.079 (15,60)	213.258 (20,53)
País Vasco	-	10.952 (1,52)	17.808 (2,46)	9.264 (1,28)
Comunidad Valenciana	133.076 (5,72)	526.031 (22,61)	713.222 (30,66)	912.672 (39,24)

* Los datos se muestran en hectáreas y, entre paréntesis, en porcentaje respecto al total de superficie de la comunidad.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2008).

La desertificación es un fenómeno que ha traspasado el ámbito científico, ocupando a día de hoy un lugar importante en las agendas políticas de protección del medio ambiente y conservación de los recursos naturales a nivel mundial. Buena prueba de ello lo constituye el hecho de que este fenómeno, al igual que ocurre con otros problemas ambientales de carácter global (como el cambio climático y la pérdida de diversidad biológica), es objeto de una convención internacional auspiciada por la Naciones Unidas, la Convención para la Lucha contra la Desertificación (CLD; <http://www.unccd.int/>). La CLD se puso en marcha en junio de 1994, entrando en vigor el 26 de diciembre de 1996. Su establecimiento supuso el primer acuerdo internacional vinculante que propugna un entendimiento común sobre el problema de la desertificación y los principios, objetivos y áreas de interés para una actuación coordinada que evite sus efectos negativos sobre las personas y el medio ambiente. Su puesta en práctica se hará mediante programas de acción, que abordarán, a nivel nacional, las causas subyacentes de la desertificación, identificando las medidas a tomar para evitar y revertir sus efectos negativos. En la actualidad se han comprometido a aplicar la CLD un total de 185 Estados, entre los que se encuentran España y todos los miembros de la Unión Europea. El instrumento de ratificación de la CLD por parte de España fue publicado en el BOE el 11 de febrero de 1997. Con dicha publicación, la CLD adquirió el rango máximo de Tratado Internacional de obligado cumplimiento para nuestro país, lo que da buena muestra de la importancia de la desertificación y de su importancia política y socioeconómica.

Pese a contar con la CLD y ser un problema ambiental de primera magnitud, existen numerosas incertidumbres en cuanto a cómo abordar el estudio de la desertificación, sobre cómo detectar sus efectos antes de que sean irreversibles, y sobre las distintas medidas de gestión ambiental que se puedan aplicar para evitar y minimizar este complejo fenómeno. En este artículo se revisan de una manera breve los principales avances realizados en el estudio de la desertificación en los últimos años, prestando especial atención a los nuevos desarrollos teóricos y a los progresos que se están realizando en la evaluación y seguimiento de este fenómeno. También se discuten algunos de los principales retos que la desertificación plantea a científicos y gestores del territorio, así como líneas de investigación futuras que permitirán ayudar a mejorar nuestra comprensión de la desertificación y a establecer medidas apropiadas para mitigar sus efectos negativos sobre los territorios afectados. No es el objetivo de este artículo el realizar una revisión exhaustiva de los distintos temas que rodean a la desertificación; los lectores interesados en una discusión en profundidad de la desertificación y su problemática pueden consultar los trabajos de Reynolds (2001), Reynolds *et al.* (2005, 2007a, 2007b), Kassas (1995), Reynolds y Stafford-Smith (2002a), Dregne (2002), Darkoh (1998) y Lé Houerou (1996),

entre otros muchos autores. Aquellos lectores particularmente interesados en la problemática de la desertificación en España deben consultar el informe *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación* (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2008)¹. En dicho informe se presenta una exhaustiva síntesis de la información disponible para el territorio nacional, y se detallan las distintas iniciativas legislativas y de gestión puestas en marcha y planteadas por las distintas administraciones con competencias en la gestión de los recursos naturales.

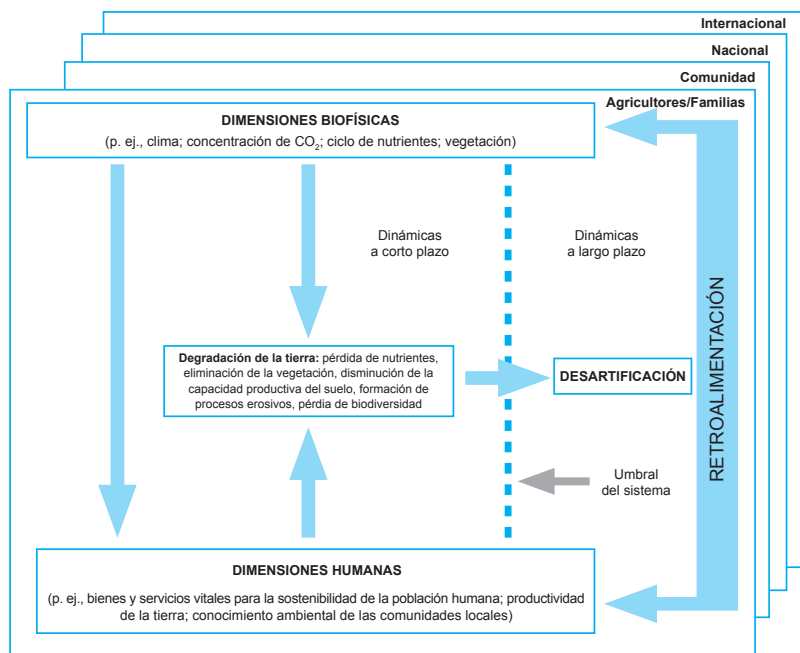
2. Avances conceptuales en el estudio de la desertificación

Si bien es algo obvio que la pérdida de productividad biológica asociada a la desertificación tiene implicaciones tanto para el mantenimiento de los ecosistemas y de la vida que albergan como para la supervivencia y desarrollo de las personas, y que tanto los factores antrópicos como los naturales interactúan para desencadenar los procesos de desertificación (Figura 1), hasta épocas muy recientes todo lo relativo a los aspectos biofísicos y socioeconómicos de este fenómeno ha sido estudiado de forma aislada por científicos de las ciencias naturales (p. ej., ecólogos, climatólogos, botánicos y zoólogos) y sociales (p. ej., sociólogos, economistas, demógrafos y politólogos), respectivamente. Ello ha provocado una notable dispersión de la investigación realizada, ha promovido una duplicación innecesaria de recursos humanos y económicos, y ha impedido el desarrollo de una visión holística que englobe todas las dimensiones de la desertificación. En este sentido, es importante considerar que, si bien frecuentemente se aluden a cambios en variables biofísicas –como la erosión de los suelos y la pérdida de cubierta vegetal– a la hora de describir la aparición de síntomas de la desertificación, interpretar los cambios en estas variables como una degradación real depende de que estos procesos se integren dentro del contexto de las actividades socioeconómicas, particularmente en aquellas regiones donde las personas dependen directamente de la tierra para sobrevivir y desarrollarse (unos 250 millones según estimaciones recientes; Reynolds *et al.*, 2007a). El hecho de que estas actividades frecuentemente no se reconocen ni se incluyen en la toma de decisiones sobre las áreas afectadas por la desertificación ha impedido importantes avances en el estudio de este fenómeno.

Esta situación ha comenzado a cambiar, ya que en la última década se han producido importantes avances en el desarrollo de marcos conceptuales que integren todas las dimensiones de la desertificación. Entre ellos destaca el “Paradigma de

¹ Este informe, así como otra documentación relacionada, está accesible en: http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/desertificacion/programa_desertificacion

Desarrollo de las Zonas Secas” (en lo sucesivo DDP, acrónimo de *Dryland Development Paradigm*; Reynolds *et al.*, 2007a), que a su vez actualizó el “Paradigma de la Desertificación de Dahlem” desarrollado a comienzos del siglo XXI (Stafford-Smith y Reynolds, 2002). El DDP tiene dos características principales que lo diferencia de otros marcos conceptuales desarrollados hasta la fecha: *a)* engloba las distintas interrelaciones existentes entre los aspectos biofísicos y socioeconómicos que originan la desertificación, utilizando para ello un único marco conceptual sintético; y *b)* puede ser evaluado empíricamente, lo que le otorga una naturaleza dinámica y permite que sea revisado y mejorado.



Fuente: Adaptado de Reynolds y Stafford-Smith (2002b).

Figura 1. La degradación del suelo y la desertificación en las zonas áridas, semi-áridas y seco-subhúmedas es el resultado de complejas interacciones entre factores biofísicos (dimensiones físicas y naturales) y socioeconómicos (la dimensión humana de la desertificación). Fracasos pasados a la hora de reconocer el papel único de estas dimensiones y la interacción a través de varias escalas espaciales y temporales –cubriendo desde escalas locales hasta internacionales– han llevado a numerosas equivocaciones y controversias sobre cómo abordar el complejo fenómeno de la desertificación.

Como ocurre con muchos paradigmas, las ideas del DDP no son nuevas en sí mismas, pero la forma en la que se sintetizan y presentan en el mismo proporciona una nueva visión del complejo fenómeno que es la desertificación. El DDP se basa en una serie de principios, que comprenden una visión jerárquica de la degradación de la tierra, recogen todas las escalas de interés en el estudio de la desertificación, enfatizan las relaciones entre los sistemas socioeconómicos y biofísicos a distintas escalas espacio-temporales y destacan la importancia del conocimiento local de la población a la hora de gestionar la desertificación, entre otros aspectos. Los cinco principios en los que se basa el DDP son (véase Reynolds *et al.*, 2007a para una discusión en profundidad de los mismos):

- **Principio 1:** Los sistemas socioeconómicos-ambientales (S-A) están acoplados y son dinámicos, de modo que su estructura, función e interrelaciones cambian con el tiempo. Ello implica que una aproximación integrada, que considere de manera simultánea los atributos biofísicos y socioeconómicos de las tierras secas, es fundamental para comprender la desertificación.
- **Principio 2:** Un número limitado de variables “lentas” son las determinantes críticas de la dinámica de los sistemas S-A. Ello implica que los atributos biofísicos y socioeconómicos que causan la degradación de la tierra en una región dada son invariablemente lentos (p. ej.: nutrientes edáficos) respecto a otros atributos que son de preocupación más inmediata para el bienestar humano (p. ej.: rendimiento de las cosechas). Es necesario distinguir entre variables “lentas” y “rápidas” con el fin de identificar las causas de la desertificación y separarlas de sus consecuencias (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplos de variables biofísicas y socioeconómicas “rápidas” y “lentas”

Tipo de sistema	Rápida	Lenta	Muy lenta
Suelo	Contenido de humedad	Capacidad de retención de agua	Fertilidad
Vegetación de una sabana	Cobertura de herbáceas anuales	Cobertura de herbáceas perennes	Cobertura de arbustos
Explotación agrícola y ganadera a pequeña escala	Producción de grano	Valor del ganado	Estructura genética del ganado
Economía de las fincas familiares	Ingreso disponible neto	Tasas de interés	Riqueza de capital
Economía de Argentina	Tasas de interés	Eficiencia de exportación	Globalización del mercado

Fuente: Sensus Reynolds *et al.* (2007a). Adaptada de Stafford-Smith y Reynolds (2002).

- Principio 3:** Umbrales en las variables “lentas” definen los diferentes estados de los sistemas S-A, a menudo con procesos de control diferentes. Los umbrales representan puntos críticos en las variables lentas (sean biofísicos o socioeconómicos), más allá de los cuales un sistema S-A se mueve a un estado nuevo o condición. Una vez cruzado un umbral crítico el sistema no puede volver a su estado inicial sin ayuda externa, lo que incrementa los costos de intervención de forma exponencial. Por ejemplo, si se sobreexplota un acuífero que abastece a una zona de regadío dada, será necesario traer agua desde otra zona si se quiere seguir manteniendo esta en cultivo, lo que desde el punto de vista económico y social es muy costoso. Los umbrales son dinámicos y pueden cambiar con el tiempo (Figura 2).

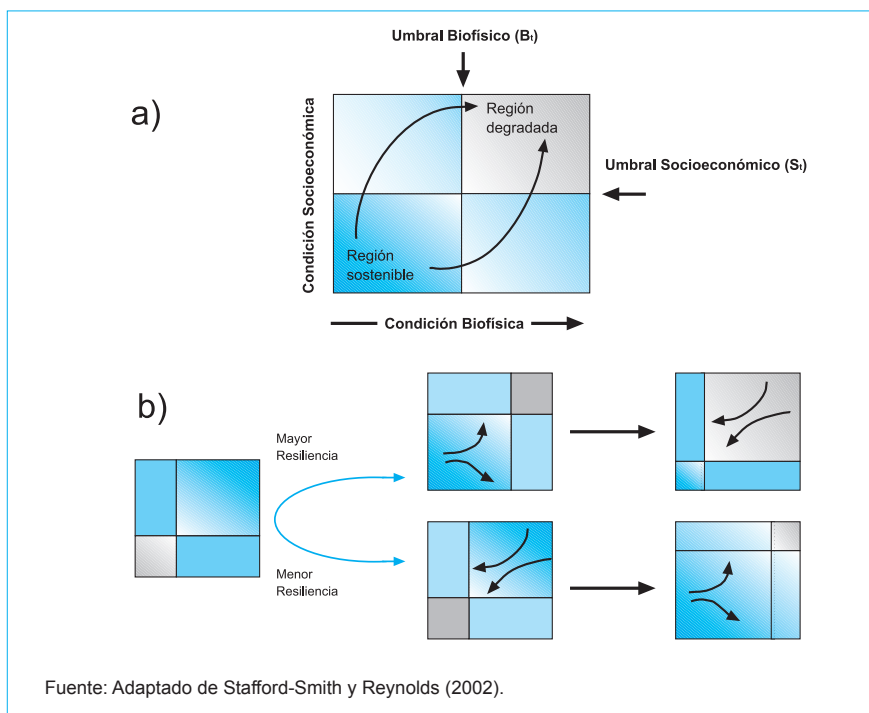
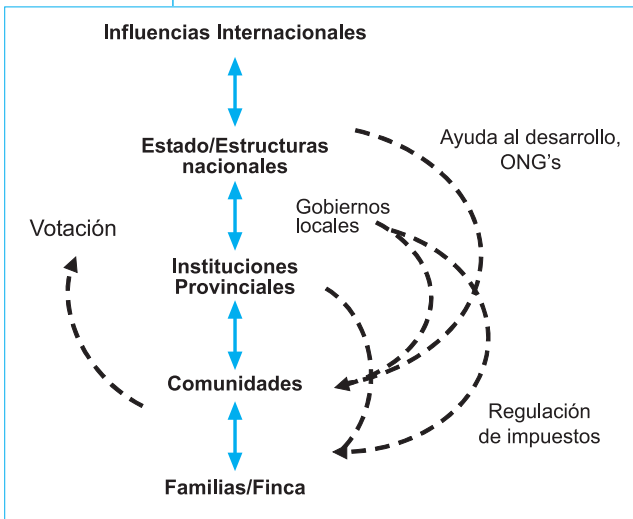


Figura 2. a) El estudio de la desertificación debe incluir simultáneamente tanto las dimensiones biofísicas como las socioeconómicas (ejes x e y, respectivamente). Los diferentes estados de un sistema son sombreados en verde como sostenibles, en amarillo como insostenibles, y en rojo como permanentemente degradado (una vez que se han cruzado los umbrales biofísicos y socioeconómicos, B_i y S_i respectivamente). **b)** Los umbrales pueden cambiar en el tiempo, de modo que el riesgo de cruzar un umbral puede variar de un año a otro; también pueden ser modificados para hacer el sistema más resiliente a la degradación y la desertificación.

- Principio 4:** Los sistemas acoplados S-A son jerárquicos, anidados y están entrelazados a distintas escalas espacio-temporales (Figura 3). Un problema importante de numerosas zonas áridas, semi-áridas y seco-subhúmedas, particularmente evidente en numerosas zonas de África, Asia y América Latina, es que los lugares donde se toman las decisiones a nivel político están invariablemente alejados de los lugares donde se desarrolla la vida de millones de personas que dependen directamente de la tierra para sobrevivir (Reynolds *et al.*, 2007a). Debido a ello, a la hora de abordar el estudio de la desertificación en estas zonas es importante seleccionar cuidadosamente las escalas de observación para desarrollar un conocimiento que sea capaz de interpretarse en la escala de interés (por ejemplo, grupos familiares), evitando los errores que indudablemente ocurrirán si se intenta extrapolar el conocimiento obtenido a escalas mayores (por ejemplo, tratar de predecir que pasara a nivel familiar en una zona dada basándonos en observaciones hechas en una escala nacional).

Figura 3. Ejemplo de las relaciones jerárquicas existentes entre sistemas socioeconómicos de interés en el estudio de la desertificación, mostrando algunas de las relaciones existentes y los mecanismos que las regulan.

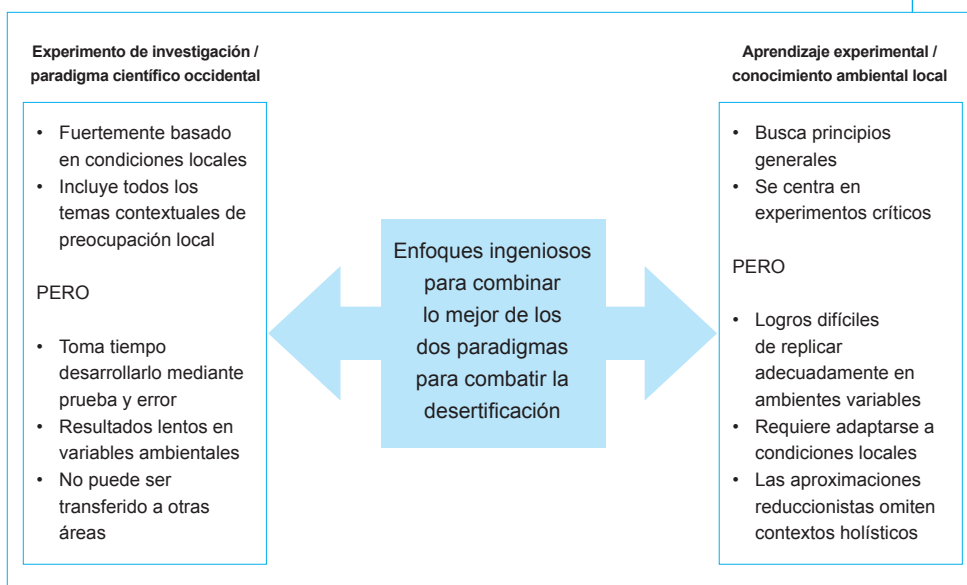


- Principio 5:** El mantenimiento de un cuerpo de conocimiento ambiental local (CAL; aquel que se transmite de generación en generación y que se genera a través de la experiencia de las personas que viven y trabajan en un lugar dado) actualizado es clave para el mantenimiento de sistemas S-A y mejorar la gestión de los lugares afectados por la desertificación. Sin embargo, en la actualidad el CAL se está perdiendo en muchas zonas debido a cambios en variables biofísicas (p. ej., invasión de especies exóticas, cambios de clima) y socioeconómicas (p. ej., el

Fuente: Adaptado de Stafford-Smith y Reynolds (2002).

crecimiento de la población, cambios tecnológicos y nuevas demandas económicas). La adquisición de nuevo CAL a través de la experiencia es un proceso lento, de manera que es importante acelerar su adquisición mediante la incorporación de herramientas y conocimientos derivados de la investigación científica (Figura 4).

Figura 4. Las fortalezas del sistema del conocimiento científico tradicional y del conocimiento ambiental local (CAL) tienen potencial para complementarse y permitir un aprendizaje del CAL más efectivo en las zonas áridas, semi-áridas y seco-subhúmedas, donde los cambios socioeconómicos y ambientales ocurren a una velocidad tal que impiden que dicho aprendizaje se realice de forma rápida.



Fuente: Adaptado de Stafford-Smith y Reynolds (2002).

El DDP tiene dos propósitos fundamentales: a) suministrar un marco conceptual sintético y holístico que englobe los principales avances realizados en el estudio de la desertificación y el desarrollo humano, notablemente dispersos en la literatura; y b) proporcionar un marco conceptual testable, donde sus principios pueden ser evaluados de forma empírica en una región dada, de modo que este ejercicio permita avanzar en la comprensión de las causas que originan la desertificación y en las actuaciones que se pueden llevar a cabo para minimizar sus efectos negativos. El enfoque integrado que propone el DDP es muy importante, no solo por la sinergia

que existe entre los componentes de los sistemas S-A (Galvin *et al.*, 2006), sino porque muchas políticas de gestión de la desertificación ocasionan conflictos entre los componentes biofísicos y socioeconómicos de estos sistemas si se estudian de forma separada (Turner, 1997).

El DDP ha sido desarrollado dentro de ARIDnet (*Assessment, Research and Integration of Desertification network*), una red internacional de investigación² que está desarrollando cuatro tareas específicas:

- *Evaluación del DDP.* Mediante la realización de congresos y simposios realizados en distintas partes del mundo, ARIDnet está desarrollando y mejorando los contenidos del DDP gracias a la participación de la comunidad internacional de científicos y gestores del territorio.
- *Estudios de caso.* Distintos grupos de trabajo se han creado para evaluar estudios de caso en distintas regiones del globo, en los cuales se está aplicando el DDP siguiendo un protocolo estandarizado. Estos estudios de caso utilizarán datos disponibles y han sido seleccionados para recoger un amplio rango en las condiciones biofísicas y socioeconómicas existentes en las zonas áridas, semi-áridas y seco-subhúmedas. Hasta la fecha se ha evaluado distintos estudios en México (Huber-Sannwald *et al.*, 2005), Honduras, Bolivia y Chile.
- *Síntesis.* Los distintos estudios de caso se englobarán en una evaluación cuantitativa de aquellos aspectos más relevantes de la desertificación. Esta síntesis se centrará en las interacciones entre las dimensiones biofísicas y socioeconómicas de este fenómeno.
- *Trabajo en grupo.* ARIDnet pretende fomentar la participación de una gran variedad de investigadores de distintos ámbitos científicos y países en sus actividades, así como la interacción entre científicos, gestores del territorio y usuarios del mismo.

No hay que ver el DDP como una *varita mágica* que permita comprender y mitigar la desertificación en todo el planeta, sino como una herramienta que proporciona un enfoque efectivo y eficiente para entender los sistemas S-A de las zonas áridas, semi-áridas y seco subhúmedas. El DDP es como un marco analítico a través del cual los problemas específicos de cada zona pueden ser identificados, siendo éste un primer paso fundamental para poder establecer medidas de gestión y mitigación de la desertificación que tenga en cuenta la capacidad de las comunidades locales y de los sistemas políticos de cada región afectada.

² Para más información, véase la página web <http://www.biology.duke.edu/aridnet> y Reynolds *et al.* (2003).

3. Avances en la evaluación y seguimiento de los procesos de desertificación

Si bien su generalización permitiría ahorrar numerosos recursos económicos (que podrían ser destinados a otras acciones), las acciones encaminadas a prevenir la aparición de la desertificación son bastante escasas. Pueden distinguirse entre aquéllas centradas en los factores antrópicos y naturales que originan este fenómeno. Entre las primeras, que son fuertemente dependientes de las características socioeconómicas de cada país, pueden citarse el uso de subsidios económicos para promover cambios en el uso de la tierra (algunas políticas que se están implementando en España con la Política Agraria Común de la UE, como el mantenimiento de cubiertas verdes en los olivares, son un buen ejemplo de ello); la diversificación de las actividades humanas (Pamo, 1998) y el establecimiento de programas para mejorar la educación y el bienestar de las personas (Vogel y Smith, 2002). Esta última actuación es de vital importancia, ya que una de las principales causas de la desertificación en los países en vías de desarrollo es el aumento de la presión sobre los recursos naturales derivada de la elevada tasa de natalidad que presentan (Le Houérou, 1996; Geist y Lambin, 2004), estando esta tasa directamente relacionada con el nivel educativo, particularmente de las mujeres (Akman, 2002). Existen numerosos ejemplos de lugares donde se ha conseguido controlar la natalidad y promover el desarrollo de sistemas de producción sustentables en zonas desertificadas (Arkutu, 1995; Vogel y Smith, 2002), que indican que con los recursos apropiados y con voluntad política pueden controlarse algunos de los principales agentes causales de la desertificación. Por lo que respecta a los factores naturales, éstos son mucho más difíciles de controlar, pero se pueden citar como ejemplo todas las iniciativas internacionales encaminadas a reducir las emisiones de efecto invernadero y a minimizar el cambio climático, como las que se están llevando a cabo en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático³. Si son efectivas, estas políticas contribuirán a reducir los efectos de la desertificación, ya que la aridificación del clima, prevista para muchas zonas semiáridas en todo el planeta (IPCC, 2007), es un factor clave que está detrás de la aparición de este fenómeno (Le Houérou, 1996; Puigdefábregas, 1998).

Debido a la dificultad que entraña en la mayor parte de los casos establecer medidas preventivas, las actividades de muestreo y evaluación de los procesos naturales y socioeconómicos están siendo cada vez más importantes en la gestión

³ <http://unfccc.int/2860.php>

de las zonas afectadas por la desertificación. El establecimiento de programas de seguimiento a largo plazo es una manera efectiva de evaluar el estado de los recursos naturales y la evolución de variables “lentas” (Tabla 2) que puedan indicar la aparición de la desertificación. Estos programas son de gran utilidad para detectar cambios tempranos en la estructura y funcionamiento de los sistemas S-A asociados a la desertificación. En este sentido, en los últimos años se ha dedicado un esfuerzo creciente a la búsqueda de indicadores de “alerta temprana” de los procesos de desertificación, que permitan anticipar la presencia de desertificación antes de que se puedan cruzar umbrales de degradación irreversibles, ya que si éstos se cruzan los costes de actuación para revertir el proceso se hacen económicamente inviables en la mayor parte de casos (Fernández *et al.*, 2002).

Entre los indicadores propuestos en los últimos años se encuentran distintos atributos de la vegetación, como la distribución espacial de la vegetación y su cobertura. Kéfi *et al.* (2007) proponen el uso de la distribución espacial de la vegetación como un indicador universal de la aparición temprana de procesos de desertificación. Apoyados en un modelo matemático y en un trabajo de campo realizado en varias zonas de España, Marruecos y Grecia, estos autores proponen que cuando la vegetación de una zona determinada zona pasa de poder caracterizarse con una distribución potencial⁴ a una distribución potencial truncada⁵, el riesgo de desertificación es inminente (véase también Kéfi *et al.*, 2011 para una discusión en mayor profundidad de los aspectos teóricos de esta idea). Estudios realizados en zonas semiáridas de China (Lin *et al.*, 2010) apoyan la idea de utilizar estas distribuciones como indicadores de aparición de procesos de desertificación inducidos por el pastoreo, pero otros realizados en España no (Maestre y Escudero, 2009). Tras caracterizar la distribución espacial de la vegetación, y analizar la fertilidad del suelo y la capacidad del ecosistema de reciclar la materia orgánica en nutrientes asimilables por las plantas en una serie de 29 parcelas de espartal, en un gradiente desde el Centro al Sudeste de la Península Ibérica, Maestre y Escudero (2009) demostraron que la distribución espacial de la vegetación en todas las parcelas se caracterizó desde el punto de vista estadístico por seguir una distribución potencial truncada, lo que puede ocurrir cuando se pierden las manchas de vegetación de mayor tamaño. A pesar de ello, las parcelas estudiadas mostraron una gran variación en variables tan importantes como el contenido de nitrógeno y el fósforo,

⁴ Ecuación del tipo $N(S) = CS^{-\gamma}$, donde N es el número de manchas de vegetación de un determinado tamaño S, C es una constante y γ es un exponente que se ajusta a los datos.

⁵ Ecuación del tipo $N(S) = CS^{-\gamma} e^{-\frac{S}{S_x}}$, donde S_x es el tamaño de las manchas de vegetación por encima del cual el número de manchas [N] decrece más rápidamente que en una ecuación potencial.

y muchas de ellas no presentaban ningún síntoma de estar sufriendo procesos de desertificación. Asimismo, los investigadores encontraron que la cobertura total de la vegetación estaba relacionada positiva y significativamente con la fertilidad del suelo, mientras que el patrón espacial, caracterizado por el exponente de la ecuación potencial truncada (γ), mostró una relación mucho menor y difícil de interpretar. Estos resultados contradictorios han iniciado un debate sobre la idoneidad de utilizar el patrón espacial de la vegetación como indicador de alerta temprana de desertificación (Kéfi *et al.*, 2010; Maestre y Escudero, 2010; Pueyo, 2011), que está lejos de ser resuelto aún.

Independientemente de su idoneidad, el uso del patrón espacial de la vegetación plantea importantes problemas desde el punto de vista de la gestión, ya que requiere conocimientos técnicos muy elevados (véase Pueyo, 2011 para una discusión sobre las complejidades matemáticas de esta aproximación), que muchas veces los técnicos de la administración no poseen por su formación, particularmente en países en vías de desarrollo. Así pues, se hace necesario establecer métodos basados en indicadores⁶ sencillos de medir y fácilmente interpretables, que preferiblemente aporten información sobre variables “lentas” como puedan ser la fertilidad del suelo (Tabla 2). En las últimas dos décadas se ha producido un impulso muy importante a este tipo de métodos, basados en la toma de datos sobre atributos de la vegetación y el suelo (p. ej. cobertura, patrón espacial, resistencia a la penetración y textura), clave a la hora de determinar la resiliencia del ecosistema frente a la erosión y su capacidad de retener y reciclar el agua y los nutrientes (Tongway, 1995; Tongway y Hindley, 1995; Pyke *et al.*, 2002; Herrick *et al.*, 2005). Un objetivo común de los distintos métodos propuestos es el de minimizar los conocimientos y recursos materiales necesarios para su aplicación, de modo que puedan ser ampliamente utilizados tanto en los países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo con un mínimo de conocimientos y material.

Entre los diferentes métodos basados en indicadores propuestos hay que destacar la metodología *Landscape Functional Analysis* (LFA), desarrollada en Australia por David Tongway y colaboradores (Tongway, 1995; Tongway y Hindley, 1995; Tongway y Hindley, 2004). Esta técnica evalúa el estado de funcionalidad del suelo basándose en tres índices (estabilidad, infiltración y reciclado de nutrientes)

⁶ Según Tongway y Hindley (2004), un indicador es una parte simple de información que actúa como sustituto de una variable medioambiental o de un proceso. Los indicadores deben cumplir las siguientes características: a) deben ser sensibles y poder ser medidos sin ambigüedades; b) su evaluación debe ser rápida, sencilla y barata; c) deben poder ser medidos de forma constante en el tiempo y por distintos observadores; d) son aplicables a una amplia gama de tipos de paisaje; y e) proporcionan un conocimiento predictivo de las variables a las que reemplazan.

que se obtienen mediante la observación de 11 indicadores de la superficie del suelo (Tabla 3). La idea básica de esta metodología es la evaluación del ecosistema en función de su capacidad para retener o perder recursos, de forma que un ecosistema que tienda a perder recursos a lo largo del tiempo es un ecosistema que funcionalmente se está deteriorando, y, en consecuencia, los procesos erosivos y degradativos se harán cada vez más evidentes. Por el contrario el ecosistema que sea capaz de retener sus recursos (suelo, agua y nutrientes), e incluso incrementarlos, experimentará una gradual mejora hasta llegar a su óptimo funcional. El método LFA reúne todas las condiciones que los métodos basados en indicadores deberían cumplir para ser útiles en zonas áridas, semiáridas y seco-subhúmedas (Whitford, 2002): refleja el estado de procesos ecosistémicos críticos; puede utilizarse en ecosistemas diferentes; y su aplicación en condiciones de campo es rápida, sencilla y barata. Asimismo, los índices LFA permiten obtener información sobre variables “lentas” relacionadas con la fertilidad, infiltración y estabilidad del suelo, atributos que determinan su capacidad productiva.

Tabla 3. Variables edáficas superficiales evaluadas para estimar los índices LFA (Landscape Function Analysis)

Variable	Significado	Índice(s) en que se emplea
Cobertura total	Estima la vulnerabilidad a la erosión por las gotas de lluvia	Estabilidad
Cobertura basal de especies herbáceas y arbustivas	Evalúa la contribución de la biomasa de raíces a los procesos de reciclaje de nutrientes	Infiltración Reciclaje de nutrientes
Cobertura de hojarasca, origen y grado de descomposición	Indica la disponibilidad de materia orgánica superficial para la descomposición y el reciclaje de nutrientes	Infiltración Reciclaje de nutrientes
Cobertura de costra biológica (formada por cianobacterias, musgos y líquenes)	Indicador de la estabilidad de la superficie del suelo, de su resistencia a la erosión y de la disponibilidad de nutrientes	Reciclaje de nutrientes
Grado de fragmentación de la costra	Mide la cantidad de costra superficial disponible para la erosión hídrica o eólica	Estabilidad
Tipo y grado de erosión	Estima la naturaleza y severidad de los procesos erosivos actuales	Estabilidad
Materiales depositados	Evalúa la cantidad de depósitos aluviales	Estabilidad
Microtopografía	Indicador de la rugosidad de la superficie del suelo en base a su capacidad para retener agua, sedimentos y semillas	Infiltración Reciclaje de nutrientes
Resistencia a la perturbación	Estima la probabilidad de perder suelo por una perturbación mecánica	Estabilidad
Test de humectación	Evalúa la estabilidad/dispersión de los agregados del suelo cuando está húmedo	Estabilidad Infiltración
Textura	Indicador de la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua	Infiltración

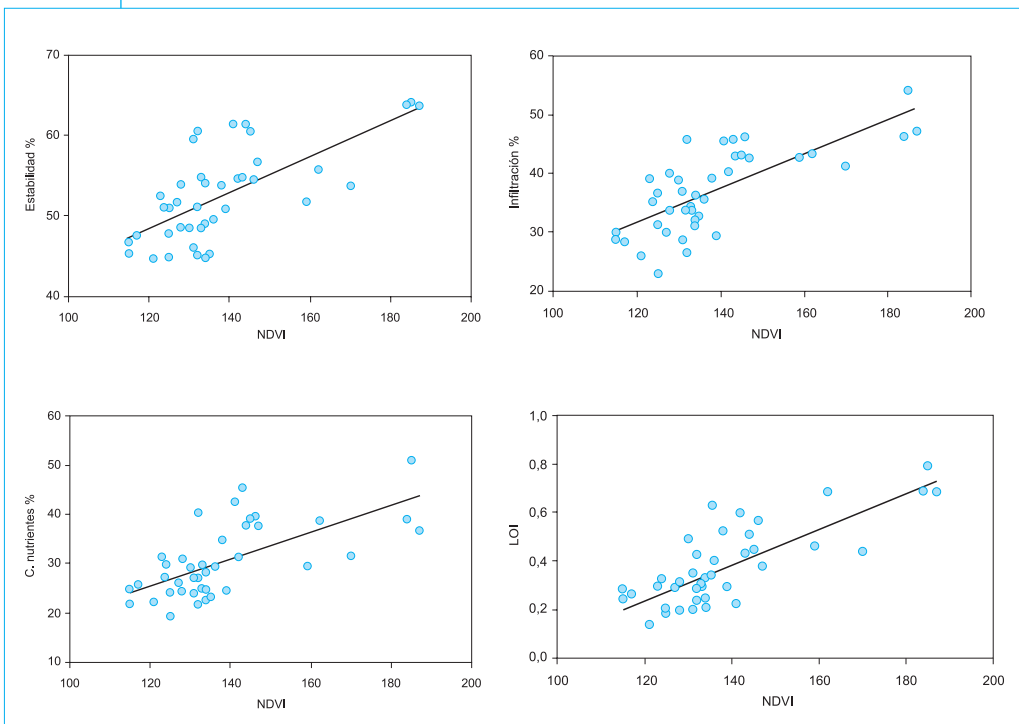
Fuente: Véase Tongway y Hindley (1995 y 2004) para una descripción más completa del método, del protocolo de muestreo de estas variables y de los cálculos que se realizan para obtener dichos índices.

El primer paso de la utilización del método LFA en condiciones de campo consiste en evaluar la organización del paisaje a escala de ladera. Para ello se recoge información a partir de transectos orientados en la dirección dominante del flujo de recursos (Figura 5). En estos transectos se registran todas aquellas características del paisaje que contribuyen a interrumpir, desviar o absorber la escorrentía superficial y los materiales transportados, denominados sumideros (ramas secas depositadas en el suelo, arbustos, especies herbáceas perennes, etc.). A partir de aquí, se diferencian zonas de ganancia relativa de recursos (sumideros) y zonas de pérdida relativa (zonas situadas entre sumideros), y se evalúa su importancia relativa. Estos datos sirven de base para calcular diversos índices de organización del paisaje, además de para proporcionar *mapas* de los transectos lineales. En una segunda fase, cada tipo de zona o cubierta identificadas previamente es caracterizada a partir de 11 indicadores de la superficie del suelo (Tabla 3). Con cierta práctica, cada medida puede suponer unos 5 segundos. Por otra parte, las medidas no son complejas, por lo que pueden ser realizadas por personas no expertas (incluyendo gestores o estudiantes). Las 11 variables que definen el estado del suelo, se combinan entonces en tres índices (Tabla 3), que proporcionan información sobre los siguientes aspectos de la funcionalidad del suelo: 1) estabilidad o resistencia a la erosión; 2) infiltración o capacidad para almacenar agua; y 3) reciclaje de nutrientes. Estos índices no permiten clasificar de manera automática un determinado ecosistema en base a su estado de degradación; su utilización tiene sentido para comparar lugares con distinto grado de funcionalidad (e.g., una zona degradada frente a una zona del mismo ecosistema en buen estado; véase Maestre y Cortina, 2004 para un ejemplo), o para evaluar los cambios en el estado del suelo a lo largo del tiempo (Oliva *et al.*, 2009). Los valores de estos índices se presentan en forma de porcentaje y su valor es inversamente proporcional al estado de deterioro de una determinada función del ecosistema.

Si bien se desarrolló en Australia, la metodología LFA se ha utilizado también con éxito en países como Irán (Ata Rezaei *et al.*, 2006), Túnez (Derbel *et al.*, 2009), España (Maestre y Cortina, 2004; Maestre *et al.*, 2006; Mayor, 2008; Maestre y Puche, 2009; Maestre y García, 2011) y Argentina (Oliva *et al.*, 2009). De hecho, en este último país se ha establecido como estándar en un programa piloto de seguimiento de los procesos de desertificación en zonas de pastizal y matorral árido y semi-árido (programa MARAS; Oliva *et al.*, 2009). En el caso de España, recientes estudios realizados en formaciones semiáridas de esparto (*Stipa tenacissima* L.) han demostrado que los índices LFA se encuentran altamente relacionados con variables “lentas” del suelo que pueden utilizarse para monitorizar los procesos de desertificación, como la respiración, fertilidad (contenidos de nitrógeno, fósforo y carbono), permeabilidad y compactación de la superficie (Maestre y Puche, 2009;

Mayor, 2009). Asimismo, un reciente estudio (García-Gómez y Maestre, 2011) ha puesto de manifiesto cómo los índices LFA pueden ser satisfactoriamente evaluados utilizando imágenes de satélite. En concreto, estos autores calcularon el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), un índice que constituye una buena medida de la actividad fisiológica de las plantas (Paruelo *et al.*, 2004), obtenido a partir de datos del sensor ASTER⁷, y relacionaron este índice con los índices LFA y la cobertura de la vegetación. Estos autores encontraron una relación positiva y significativa entre los valores de NDVI y estas variables (Figura 5). Los resultados de este estudio indican que el NDVI puede ser utilizado como un indicador de funcionamiento de los ecosistemas semiáridos en las estepas del centro de España, y por lo tanto

Figura 5. Relaciones entre los índices LFA y la cobertura de la vegetación (LOI, en tanto por uno) y el índice NDVI obtenido a partir de imágenes de satélite en espartales de *Stipa tenacissima* de la Comunidad de Madrid.



Fuente: Adaptado de García Gómez y Maestre (2011).

⁷ Acrónimo de *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Estas imágenes son tomadas por el satélite Terra (<http://www.jpl.nasa.gov/>).

puede ser un índice útil para evaluar el estado funcional de estos ecosistemas y monitorizar los procesos de desertificación en los mismos. La utilización de imágenes de satélite como ASTER, que son muy económicas y tienen una buena resolución espacio-temporal, brinda nuevas posibilidades a la utilización de herramientas como la metodología LFA, ya que permite evaluar la funcionalidad del ecosistema sobre grandes extensiones de terreno, así como establecer un programa de monitorización de zonas en riesgo de degradación con un coste mínimo y sin la necesidad de realizar costosos muestreos de campo.

4. Mirando hacia el futuro: retos en el estudio de la desertificación y la gestión de áreas desertificadas

Durante las últimas décadas se han producido innegables avances en nuestro conocimiento sobre los ecosistemas áridos, semiáridos y seco-subhúmedos, así como sobre las complejas interrelaciones existentes entre los componentes biofísicos y socioeconómicos de estos ambientes. Asimismo, se han desarrollado numerosos métodos que tienen un gran potencial para ayudar a los gestores del territorio a monitorizar la aparición de procesos de desertificación y luchar contra sus efectos negativos. También existen importantes iniciativas a nivel político, legislativo y administrativo para hacer efectiva esta lucha (la CLD y toda la normativa sobre desertificación desarrollada en los últimos años son buenos ejemplos de ello).

Pese a los avances obtenidos, los numerosos programas que se han puesto en marcha para luchar contra la desertificación no han sido todo lo efectivos que se esperaba en muchas regiones (p. ej., Le Houérou, 1996; Chen y Tan, 2005). Existen muchas razones para ello, incluyendo el establecimiento de medidas sin sólida base científica, la falta de seguimiento de las actuaciones realizadas, las limitaciones tecnológicas, la falta de participación de la gente directamente implicada, el aumento de la aridez en numerosas zonas y el continuo debate sobre todo lo que rodea a la desertificación, que se ha visto alimentado por la falta de un marco conceptual coherente e integrador (Chasek y Corell, 2002; Corell, 1999; Toulmin, 2001; Reynolds y Stafford Smith, 2002a). El DDP constituye un marco conceptual sintético y pluriescalar idóneo para abordar los aspectos biofísicos y socioeconómicos de la desertificación que puede ayudar a superar las limitaciones de las aproximaciones que se han venido empleando hasta la fecha. Pese a que todavía se encuentra en su infancia –y ciertamente tiene limitaciones–, tiene un gran potencial para avanzar en el conocimiento de la desertificación, lo que últimamente proporcionará a los

gestores del territorio con herramientas apropiadas para gestionar las zonas desertificadas en las distintas regiones del planeta. A su vez, metodologías como el LFA representan una oportunidad evidente para crear sistemas informatizados de alerta temprana frente a la desertificación a distintas escalas espaciales, así como para el establecimiento de programas de seguimiento del éxito o fracaso de las actuaciones de lucha contra la desertificación. La generalización de su uso supondría un paso adelante fundamental en el establecimiento de programas efectivos de lucha contra la desertificación y de gestión efectiva de zonas desertificadas.

Uno de los principales avances realizados durante la última década en el estudio de la desertificación es el considerar que los aspectos biofísicos (que afectan a los ecosistemas naturales) y socioeconómicos (que afectan a las personas) de este fenómeno deben estudiarse y abordarse de forma conjunta. Una vez que la importancia de esta visión integrada está asumida por parte de la comunidad científica, los gestores y los políticos, el reto es ponerla en práctica. Para ello es necesario que los futuros estudios que se hagan sobre la desertificación evalúen las dimensiones biofísicas y socioeconómicas simultáneamente, algo que sólo puede conseguirse mediante el establecimiento de grupos de trabajo multidisciplinares que incluyan científicos de las ciencias sociales y naturales, gestores, técnicos de la administración e interesados. Así pues, un paso fundamental que hay que dar consiste en construir los puentes necesarios para mejorar la comunicación entre científicos pertenecientes a distintas disciplinas, así como para permitir un diálogo fluido entre científicos, gestores y usuarios. Si bien este reto es considerable, se están llevando a cabo distintas iniciativas exitosas al respecto (la red alemana *DesertNet* [<http://www.desertnet.de/index.php>] o la ya mencionada red *ARIDnet* son buenos ejemplos de ellos), que deben servir de motivación para fomentar estos grupos de trabajo multidisciplinares. Al respecto, es fundamental incrementar el diálogo entre los científicos y gestores implicados en todo lo que rodea a la desertificación. Los investigadores deben tener en cuenta las limitaciones del mundo real y las actuaciones reales de gestión deben ser evaluadas para evaluar las teorías y conocimientos actuales. La investigación en desertificación es un área particularmente idónea para aplicar técnicas de gestión adaptativa y, por consiguiente, los vínculos entre la investigación y la gestión deben ser fuertes. También debe tenerse en cuenta que el establecimiento de medidas de gestión apropiadas para combatir la desertificación requiere del esfuerzo conjunto de científicos de las ciencias sociales y naturales, quienes tradicionalmente han estudiado las dimensiones socioeconómicas y biofísicas de la desertificación por separado, así como la colaboración internacional entre los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo.

En materia del seguimiento de los procesos de desertificación, se hace necesario profundizar en la caracterización de los umbrales de degradación, con el fin de conocer los valores de variables biofísicas y socioeconómicas asociados a estos umbrales en distintas regiones del planeta. Si bien el concepto de umbral está bien estudiado desde el punto de vista teórico, desconocemos los valores umbrales de variables “lentas” que nos puedan indicar que un área dada se está desertificando. A modo de ejemplo, no sabemos los umbrales de contenido de nitrógeno en el suelo que determinan una pérdida de fertilidad que lleve a la desertificación de una zona determinada. En los últimos años se están haciendo importantes esfuerzos para recopilar umbrales que han sido documentados empíricamente, existiendo en la actualidad algunas bases de datos accesibles por Internet⁸. No obstante, se hacen necesarios más estudios de campo que comparen el estado de degradación y funcionalidad de las zonas áridas, semi-áridas y seco-subhúmedas a lo largo de un amplio abanico de condiciones ambientales y socio-económicas, con el fin de determinar valores umbrales para un rango de variables “lentas” que puedan ser utilizadas de forma rutinaria en el establecimiento de programas de seguimiento de la desertificación. Dadas las relaciones entre los índices LFA y variables “lentas” de gran importancia a la hora de determinar la fertilidad del suelo (Maestre y Puche, 2009), estos estudios deberían estimar también estos índices, ya que la generalización de su uso es más factible en países en vías de desarrollo que el uso de otras variables que requieran conocimientos técnicos elevados o técnicas analíticas de laboratorio complejas.

Como se ha podido constatar a lo largo de este artículo, la desertificación es un fenómeno complejo que es difícilmente abordable utilizando aproximaciones sencillas. Si bien el uso de aproximaciones como el DDP plantea ciertas dificultades, y el establecimiento de equipos de trabajo plenamente multidisciplinares, es un reto tanto para científicos como para gestores y políticos, se hace imprescindible considerar estos aspectos para avanzar en nuestro conocimiento sobre la desertificación. Dichos avances son fundamentales y necesarios para poder minimizar e incluso revertir los efectos negativos de un problema ambiental que amenaza la subsistencia de millones de personas en las zonas más pobres del planeta, así como el mantenimiento del estado de vida actual de aquéllas que viven en áreas más desarrolladas.

⁸ Véase www.resalliance.org/index.php/thresholds_database para un buen ejemplo.

Agradecimientos

Esta revisión ha sido posible gracias a una beca *Starting Grant* otorgada a FTM por el *European Research Council*, financiado por el *European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013)*; *ERC Grant agreement nº 242658 (BIOCOM)*.

Referencias bibliográficas

- > Akmam, W. (2002): "Women's education and fertility rates in developing countries, with special reference to Bangladesh"; en *Eubios Journal of Asian and International Bioethics* (12); pp. 138-143.
- > Ata Rezaei, S.; Arzani, H. y Tongway, D. (2006): "Assessing rangeland capability in Iran using landscape function indices based on soil surface attributes"; en *Journal of Arid Environments* (65); pp. 460-473.
- > Arkutu, A. (1995): "Family planning in Sub-Saharan Africa, pp. Present status and future strategies"; en *International Journal of Gynecology and Obstetrics* (50); pp. S27-S34.
- > Batterbury, S. P.; Behnke, R. H.; Döll, P. M.; Ellis, J. E.; Harou, P. A.; Lynam, T. J. P.; Mtimet, A.; Nicholson, S. E.; Obando, J. A. y Thornes, J. B. (2002): "Responding to desertification at the national scale, pp. detection, explanation, and responses"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 357-386.
- > Chasek, P. y Corell, E. (2002): "Addressing desertification at the international level: the institutional system"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 275-296.
- > Chen, Y. y Tang, H. (2005): "Desertification in north China: background, anthropogenic impacts and failures in combating it"; en *Land Degradation & Development*, (16); pp. 367-376.
- > Corell, E (1999): *The Negotiable Desert: Expert Knowledge in the Negotiations of the Convention to Combat Desertification*. Linköping Studies in Arts and Science No. 191. Linköping University, Linköping, Suecia.

- > Darkoh, M. B. (1998): "The nature, causes and consequences of desertification in the drylands of Africa"; en *Land Degradation & Development* (9); pp. 1-20.
- > Derbel, S.; Cortina, J. y Chaieb, M. (2009): "*Acacia saligna* plantation impact on soil surface properties and vascular plant species composition in central Tunisia"; en *Arid Land Research and Management* (23); pp. 28-46.
- > Dregne, H. E. (2002): "Land degradation in the drylands"; en *Arid Land Research and Management* (16); pp. 99-132.
- > Fernández, R. J.; Archer, E. R.; Ash, A. J.; Dowlatabadi, H.; Hiernaux, P. H.; Reynolds, J. F.; Vogel, C. H.; Walker, B. H. y Wiegand, T. (2002): "Degradation and recovery in socio-ecological systems: a view from the household/farm level"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 297-324.
- > Galvin, K. A.; Thornton, P. K.; De Pinho, J. R.; Sunderland, J. y Boone, R. B. (2006): "Integrated modeling and its potential for resolving conflicts between conservation and people in the rangelands of East Africa"; en *Human Ecology* (34), pp.155-183.
- > García-Gómez, M. y Maestre, F. T. (2011): "Remote sensing data predict indicators of soil functioning in semi-arid steppes, central Spain"; en *Ecological Indicators*, en prensa.
- > Herrick, J. E.; Van Zee, J. W.; Havstad, K. M. y Whitford, W. G. (2005): *Monitoring Manual for Grassland, Shrubland, and Savanna Ecosystems. Volume II: Design, Supplementary Methods and Interpretation*. USDA-ARS, Las Cruces, Estados Unidos. Disponible en http://usda-ars.nmsu.edu/Monit_Assess/monitoring.php
- > Huber-Sannwald, E.; Maestre, F. T.; Herrick, J. E. y Reynolds, J. F. (2005): "Applying a new desertification paradigm linking biophysical and socioeconomic elements: The Amapola, Mexico case study"; en *Hydrological Processes* (20); pp. 3395-3411.
- > IPCC (2007): *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- > Kassas, M. (1995): "Desertification: a general review"; en *Journal of Arid Environments* (30); pp. 115-128.

- > Kéfi, S.; Rietkerk, M.; Alados, C. L.; Pueyo, Y.; Papanastasis, V. P.; ElAich, A. y de Ruiter, P. C. (2007): "Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems"; en *Nature* (449); pp. 213-217.
- > Kéfi, S.; Alados, C. L.; Chaves, R. C.; Pueyo, Y. y Rietkerk, M. (2010): "Is the patch size distribution of vegetation a suitable indicator of desertification processes?: Comment"; en *Ecology* (91); pp. 3739-3742.
- > Kéfi, S.; Rietkerk, M.; Roy, M.; Franc, A.; de Ruiter, P. C. y Pascual, M. (2011): "Robust scaling in ecosystems and the meltdown of patch size distributions before extinction"; en *Ecology Letters* (14); pp. 29-35.
- > Le Houérou, H. N. (1996): "Climate change, drought and desertification"; en *Journal of Arid Environments* (34); pp. 133-185.
- > Lin, Y.; Han, G.; Zhao, M. y Chang, S. X. (2010): "Spatial vegetation patterns as early signs of desertification: a case study of a desert steppe in Inner Mongolia, China"; en *Landscape Ecology* (25); pp. 1519-1527.
- > Maestre, F. T. y Cortina, J. (2004): "Insights on ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes"; en *Restoration Ecology* (12); pp. 494-502.
- > Maestre, F. T. y Escudero, A. (2009): "Is the patch-size distribution of vegetation a suitable indicator of desertification processes?"; en *Ecology* (90); pp. 1729-1735.
- > Maestre, F. T. y Escudero, A. (2010): "Is the patch size distribution of vegetation a suitable indicator of desertification processes?: Reply"; en *Ecology* (91); pp. 3742-3745
- > Maestre, F. T. y Puche, M. D. (2009): "Indices based on surface indicators predict soil functioning in Mediterranean semiarid steppes"; en *Applied Soil Ecology* (41); pp. 342-350.
- > Mayor, A. G. (2008): *El papel de la dinámica fuente-sumidero en la respuesta hidrológica, a varias escalas, de una zona mediterránea semiárida*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- > Middleton, N. J. y Thomas, D. S. (1997): *World Atlas of Desertification*, UN Environment Programme, Edward Arnold, Nueva York.
- > Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2008): *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid.

- > Oliva, G.; Gaitán, J.; Bran, D.; Nakamatsu, V.; Salomone, J.; Buono, G.; Escobar, J.; Frank, F.; Ferrante, D.; Humano, G.; Ciari, G.; Suarez, D. y Opazo, W. (2009): *Manual para la Instalación y Lectura de Monitores MARAS*. INTA, Santa Cruz.
- > Pamo, E. T. (1998): "Herders and wildgame behaviour as a strategy against desertification in northern Cameroon"; en *Journal of Arid Environments* (39); pp.179-190.
- > Paruelo, J.; Garbulsky, M. F.; Guerschman, J. P. y Jobbagy, E. G. (2004): "Two decades of normalized difference vegetation index changes in South America: identifying the imprint of global change"; en *International Journal of Remote Sensing* (25); pp. 1-14.
- > Pueyo, S. (2011): "Desertification and power laws"; en *Landscape Ecology* (26); pp. 305-309.
- > Puigdefábregas, J. (1995): "Desertification: Stress beyond resilience, exploring a unifying process structure"; en *Ambio* (24); pp. 311-313.
- > Puigdefábregas, J. (1998): "Ecological impacts of global change on drylands and their implications for desertification"; en *Land degradation & Development* (9); pp. 393-406.
- > Pyke, D. A.; Herrick, J. E.; Shaver, P. L. y Pellant, M. (2002): "Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment"; en *Journal of Range Management* (55); pp. 584-597.
- > Reynolds, J. F. (2001): "Desertification"; en Levin, S. A., ed.: *Encyclopedia of Biodiversity*. Academic Press, San Diego; vol. 2, pp. 61-78.
- > Reynolds, J. F.; Stafford Smith, D. M.; Lambin, E. F.; Turner II, B. L.; Mortimore, M.; Batterbury, S. P. J.; Downing, T. E.; Dowlatabadi, H.; Fernández, R. J.; Herrick, J. E.; Huber-Sannwald, E.; Leemans, R.; Lynam, T.; Maestre, F. T.; Ayarza, M. y Walker, B. (2007a): "Global desertification: Building a science for dryland development"; en *Science* (316); pp. 847-851.
- > Reynolds, J. F.; Maestre, F. T.; Kemp, P. R.; Stafford-Smith, D. M. y Lambin, E. (2007b): "Natural and human dimensions of land degradation in drylands: causes and consequences"; en Canadell, J.; Pataki, D. y Pitelka, L. F., eds.: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Springer-Verlag, Berlín; pp. 247-258.
- > Reynolds, J. F.; Maestre, F. T.; Huber-Sannwald, E.; Herrick, J. E. y Kemp, P. R. (2005): "Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación"; en *Ecosistemas* (14); pp. 3-21.

- > Reynolds, J. F. y Stafford Smith, D. M., eds. (2002a): *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín.
- > Reynolds, J. F. y Stafford Smith, D. M. (2002b): "Do humans cause deserts?"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 1-22.
- > Stafford Smith, D. M. y Reynolds, J. F. (2002): "The Dahlem Desertification Paradigm: A new approach to an old problem"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 403-424.
- > Tongway, D. J. (1995): "Monitoring soil productive potential"; *Environmental Monitoring and Assessment* (37); pp. 303-318.
- > Tongway, D. J. y Hindley, N. (1995): *Assessment of soil condition of tropical grasslands*. CSIRO Ecology and Wildlife, Canberra.
- > Toulmin, C. (2001): *Lessons from the theatre: Should this be the final curtain call for the Convention to Combat Desertification?* WSSD Opinion Series. International Institute for Environment and Development. Disponible en <http://www.iied.org>.
- > Turner, B. L. II (1997): "The sustainability principle in global agendas: Implications for understanding land-use/cover change"; en *Geographical Journal* (163); pp. 133-140.
- > Vogel, C. H. y Smith, J. (2002): "Building social resilience in arid ecosystems"; en Reynolds, J. F. y Stafford Smith, M., eds.: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlín; pp. 149-166.