

ORIGINAL

EL ATLAS DE LA DESERTIFICACIÓN DE ESPAÑA, UN PRIMER PASO PARA ATAJAR LA DEGRADACIÓN DE LA TIERRA

ATLAS OF DESERTIFICATION IN SPAIN: A FIRST STEP TO TACKLE LAND DEGRADATION.

Jaime Martínez-Valderrama^{1,2}; Emilio Guirado^{2,3}; Jorge Olcina⁴; Elsa Varela⁵; Julia Martínez-Fernández⁶; Manuel Esteban Lucas-Borja⁷; Javier Martí-Talavera⁸; Juanma Cintas¹; Fernando T. Maestre^{3,9}

1. Estación Experimental de Zonas Áridas. CSIC.
2. Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio «Ramón Margalef». Universidad de Alicante.
3. King Abdullah University of Science and Technology (KAUST).
4. Departamento de Análisis Regional y Geografía Física. Universidad de Alicante.
5. Instituto de Políticas y Bienes Públicos, Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CSIC.
6. Fundación Nueva Cultura del Agua.
7. E.T.S. de Ingeniería Agraria, de Montes y Biotechnología. Universidad de Castilla-La Mancha.
8. Instituto Interuniversitario de Geografía, Laboratorio de Climatología, Universidad de Alicante.
9. Miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

RESUMEN

La desertificación es uno de los principales problemas medioambientales de España. Su gravedad y extensión no dejan de aumentar – del mismo modo que se expanden las zonas áridas– debido al proceso actual de cambio climático, a un uso insostenible de los recursos naturales y a la falta de actuaciones efectivas para atajar sus causas. La ambigüedad del concepto de desertificación ha desembocado en la desaparición de los mapas de desertificación del último Atlas Mundial de Desertificación. Sin embargo, es imprescindible conocer qué lugares están desertificados, cuáles se están desertificando y cuáles pueden desertificarse en el futuro. La Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT), auspiciada por la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), es la principal herramienta a nivel institucional para abordar este fenómeno, y en ella se priorizan las actuaciones de prevención. Nuestro objetivo es contribuir al desarrollo metodológico de la cartografía de la desertificación, un reto científico plenamente vigente y expresamente solicitado en la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación de España. Para ello proponemos la elaboración de un Atlas de la Desertificación de España (ADE) a partir de la información biofísica y socioeconómica disponible. Combinando esta información con proyecciones climáticas, «big data» e inteligencia artificial será posible elaborar un mapa de la probabilidad de desertificación. En este artículo se exponen las razones por las cuales los métodos propuestos hasta ahora para abordar la desertificación han fracasado, así como los fundamentos metodológicos de la innovadora metodología que proponemos.

Palabras clave: Zonas áridas; Socioecosistemas; Degradación de la tierra; Mapas; Inteligencia artificial.

ABSTRACT

Desertification is one of Spain's most pressing environmental challenges. Its severity and extent continue to grow—just as arid zones expand—driven by climate change, unsustainable use of natural resources, and a lack of effective action to address its root causes. The ambiguity surrounding the concept of desertification has even led to the removal of desertification maps from the latest World Atlas of Desertification. However, it remains essential to identify which areas are already desertified, which are currently undergoing desertification, and which may be at risk in the future. The concept of Land Degradation Neutrality (LDN),



promoted by the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), is the main institutional framework for addressing this phenomenon, prioritizing preventive action.

Our goal is to contribute to the scientific advancement of desertification mapping, a pressing challenge explicitly identified in Spain's National Strategy to Combat Desertification. To this end, we propose the development of a Spanish Desertification Atlas (ADE) based on available biophysical and socio-economic data. By combining this information with climate projections, big data, and artificial intelligence, we aim to create a probability map of desertification.

In this article, we explain why previous approaches to desertification have fallen short and outline the methodological foundations of the innovative strategy we propose.

Keywords: Drylands; Socio-ecosystems; Land degradation; Mapping; Artificial Intelligence.

Correspondencia

Jaime Martínez Valderrama.

Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA)

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Ctra. de Sacramento S/N, La Cañada de San Urbano, 04120, Almería (España)

E-mail: jaimonides@eeza.csic.es

LA COMPLEJIDAD DE LA DESERTIFICACIÓN Y LA IMPORTANCIA DE LAS ZONAS ÁRIDAS

La desertificación se define por la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) como la «degradación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedo-secas como consecuencia de variaciones climáticas y actividades humanas», entendiendo por degradación «la pérdida de productividad biológica, económica y de biodiversidad» (UNCCD, 1994). Llegar a la actual definición de la CNULD supuso un continuo esfuerzo de conceptualización y discusión que dejó un reguero nada despreciable de más de cien definiciones por el camino (Reynolds y Stafford Smith, 2002). Ello evidencia que ninguna de ellas aprehende todos los matices de un problema complejo y que la discusión sigue abierta. Buena parte de ello se debe a las distintas percepciones del término «degradación», cuyo significado depende de los valores e idiosincrasia de cada sociedad (Meyfroidt, Ryan, et al., 2022). Así, por ejemplo, los pastizales en los que medran los matorrales (por sobrepastoreo o abandono) son tildados de «desiertos verdes» (Perevolotsky & Seligman, 1998) desde el punto de vista de una percepción ganadera (y ciertamente es una pérdida de productividad económica), pero con una visión más ecológica se percibe como una mejora de la condición de la tierra, al aumentar su biomasa y cubierta vegetal, cuestión ratificada por los principales indicadores que se utilizan para evaluar la desertificación (Cowie et al., 2018).

Lastrada por sus orígenes coloniales (Davis, 2016; Reynolds, 2021) y asentada en el imaginario popular –y aún en diversos círculos académicos– la desertificación suele equipararse al avance del desierto (Martínez-Valderrama et al., 2020b), a las sequías (CRSTRA & BeSafeNet, 2023) o a la erosión (Puigdefábregas, 1995). Ello ha conducido al fracaso a muchas de las soluciones que se han ido proponiendo para abordar este grave problema (Prince & Podwojewski, 2019), desde la construcción de «murallas verdes», diseñadas para contener el avance de las dunas y que suelen secarse y restringir aún más el exiguo balance hídrico de esas zonas (Turner et al., 2023), hasta la implantación de regadíos en tierras marginales y naturalmente dispuestas para el pastoreo (Martínez Fernández et al., 2002) a modo de barreras contra la desertificación (Fundación Nueva Cultura del Agua, 2020), que han generado una riqueza efímera a sus habitantes a costa de agotar acuíferos esenciales para la región (Martínez-Valderrama et al., 2023). Sin embargo, como evidencia el sobrepastoreo de las estepas de esparto en el norte de África que ha dado lugar a campos de dunas donde antes había una tupida cubierta vegetal (Hirche et al., 2011; Martínez-Valderrama et al., 2018), el problema no es parar el avance del desierto, sino establecer políticas de uso del suelo que no den lugar a paisajes que se parecen a los desiertos debido a que se esquilda su productividad natural.

El contexto climático en el que se puede desarrollar la desertificación nos da una idea de la magnitud



del problema. Genéricamente, se refiere a las zonas áridas¹, aunque la definición de la CNULD excluye las hiperáridas por considerarlas naturalmente improductivas, lo que es una de esas cuestiones aún abiertas y en debate (Martínez-Valderrama et al., 2020a). La condición de «zona árida» viene determinada por el valor del índice de aridez (IA) – cuya solvencia para determinar lo que es o no árido en el actual contexto del cambio climático también está en duda (Greve et al., 2019; Wang et al., 2022) –, que es la ratio entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial, es decir, da una medida del agua que se puede evaporar en un territorio respecto a la que recibe. La definición de la CNULD se refiere a aquellas zonas áridas en las que el IA está comprendido entre 0,05 y 0,65. En conjunto, ocupan en 45% de la superficie terrestre y son el mayor bioma por su extensión. No es de extrañar, por tanto, que den cobijo a uno de cada tres habitantes de la Tierra (UNCCD, 2022), al 65% de los pastizales y al 35% de las tierras de cultivo (Cherlet et al., 2018). Además de su enorme importancia socioeconómica, desde el punto de vista ecológico resultan fundamentales (Maestre et al., 2021) ya que, por ejemplo, albergan el 36% del carbono orgánico del suelo y sus bosques ocupan 1.283 millones de hectáreas (Guirado et al., 2022). Los ecosistemas áridos son también muy diversos – albergan por ejemplo alrededor del 20 % de los principales centros de diversidad vegetal del mundo e incluyen verdaderos «puntos calientes» de biodiversidad vegetal como el *fynbos* sudafricano (Maestre et al., 2021) –, y constituyen un fascinante laboratorio natural para estudiar la evolución y la adaptación de las especies a condiciones extremas, además de ofrecer servicios ecosistémicos esenciales para el mantenimiento de más de 1000 millones de personas (Middleton et al., 2011). Además de su elevada diversidad vegetal, que en algunos casos es superior a la encontrada en biomas más productivos, los ecosistemas áridos también albergan comunidades microbianas y edáficas muy diversas. Esta biodiversidad es crucial para mantener el funcionamiento de los ecosistemas áridos (Martínez-Valderrama et al., 2022) y del planeta en su conjunto.

¹ ***En rigor, hay cuatro categorías de aridez (subhúmedo seco, semiárida, árida e hiperárida), pero en castellano solemos hablar de zonas áridas para referirnos a todas ellas, ya que la traducción literal de drylands (tierras secas) puede resultar confusa.***

LOS MAPAS DE DESERTIFICACIÓN

La importancia de las zonas áridas y la magnitud de la desertificación aumentan a medida que se consolidan los efectos del cambio climático – que expanden las zonas áridas (Wu et al., 2023), y y aumentan la demanda de recursos hídricos (Kuang et al., 2024; Mehta et al., 2024)– que, junto con la presión demográfica y los cambios en el estilo de vida, imponen una demanda insaciable de recursos. Sin embargo, la CNULD ha perdido su influencia debido a la ambigüedad que siempre ha rodeado al concepto de desertificación (Martínez-Valderrama, 2024; Reynolds, 2021) y a un asesoramiento científico intermitente (Bauer & Stringer, 2009), aunque este último parece haber cobrado relevancia a partir de la creación de la interfaz ciencia-política en 2013 (Castillo Sánchez, 2022; Chasek et al., 2019). Uno de los hechos más notables en esta errática evolución es la ausencia de mapas de desertificación en el último Atlas Mundial de Desertificación (AMD) (Cherlet et al., 2018).

Los procesos de transformación del espacio geográfico necesitan ser despiezados para su mejor percepción, lectura y asimilación en el proceso de investigación científica. Esta disección, aunque artificiosa, se hace necesaria para comprender la complejidad de un medio natural. La elaboración de cartografía permite sintetizar dicha complejidad (Sancho Comíns & Olcina Cantos, 2020). La sencillez que debe caracterizar a un mapa temático hace posible la aprehensión de los elementos que forman un proceso de desertificación y permite integrarlos en un conjunto de escala superior (región natural) que les otorga sentido.

Los esfuerzos por plasmar cartográficamente dónde tiene lugar la desertificación y cuál es su severidad han sido un reto continuo desde que en 1977 se presentase el primer mapa a escala global. Desde entonces, se han elaborado seis mapas globales sobre desertificación (dos de ellos denominados Atlas), y otros cuatro sobre degradación, esto es, mapas que consideran tanto las tierras secas como las húmedas (Tabla 1). Como podemos ver, los mapas más recientes no son los de desertificación, lo que refleja una tendencia hacia la consideración de la degradación en cualquier ámbito climático. Este es un aspecto importante, ya que atenúa el papel de la aridez en la degradación. Sin embargo, la desertificación, que como hemos visto se refi-

Año	Denominación original	Instituciones involucradas	Referencia
Mapas de desertificación			
1977	Generalized Map of the Status of Desertification in Arid Lands	United Nations Environmental Program (UNEP)	(Dregne, 1977)
1983	Desertification of Arid Lands	Texas Tech University	(Dregne, 1983)
1992	Global Desertification Dimensions and Costs	Texas Tech University	(Dregne & Chou, 1992)
1992	World Atlas of Desertification (1 st Edition) *	International Soil Reference and Information Center (ISRIC), UNEP	(UNEP, 1992)
1997	World Atlas of Desertification (2 nd Edition)	UNEP	(UNEP, 1997)
2005	Synthesis on the Main Areas of Land-Cover and Land-Use Change	Millenium Assessment (MA)	(Lepers et al., 2005)
Mapas globales de degradación			
1991	Global Assessment of Human-induced land Degradation (GLASOD)	ISRIC, UNEP	(Oldeman, Hakkeling, y Sombroek, 1991)
2001	Major Land Resource Stresses and Conditions	United States Natural Resource Conservation	(Beinroth et al., 2001)
2008	Global Assessment of Land Degradation and Improvement (GLADA)	ISRIC, Food and Agriculture Organization (FAO)	(Bai et al., 2008)
2011	Global Land Degradation Information Systems (GLADIS)	FAO	(Nachtergaele et al., 2011)

Tabla 1. Mapas globales de desertificación o degradación a partir de Safriel (2007) y Prince (2016). Nótese que no aparece el Atlas Mundial de Desertificación de 2018 al carecer de mapas de desertificación. *Los Atlas de desertificación de 1992 y 1997 son un subconjunto del mapa de degradación GLASOD, en el que únicamente se consideran las zonas áridas.

ere exclusivamente a las zonas áridas, se diferencia de otros procesos de degradación porque puede llegar a ser irreversible a escala humana, dada la lentitud de los procesos biofísicos en estas zonas. Así, por ejemplo, la recuperación del suelo fértil perdido por erosión, o la recarga de los acuíferos sobreexplotados tienden a reducirse a medida que aumenta la aridez (MEA, 2005).

La fiabilidad de los mapas de desertificación nunca fue muy alta. Los propios autores han cuestiona-

do su validez. Por ejemplo, Dregne y Chou (1992), refiriéndose al Atlas de 1992, afirmaron que: «La base de información sobre la que se hicieron las estimaciones es deficiente: los relatos anecdóticos, los informes de investigación, las descripciones de viajeros, las opiniones personales y la experiencia local proporcionaron la mayor parte de las evidencias utilizadas.» Al contrastarlos con otros datos suelen ofrecer resultados desconcertantes. En el caso de Argelia se estimó, en ese mismo mapa de Dregne y Chou, que el 93% de sus tierras de cultivo

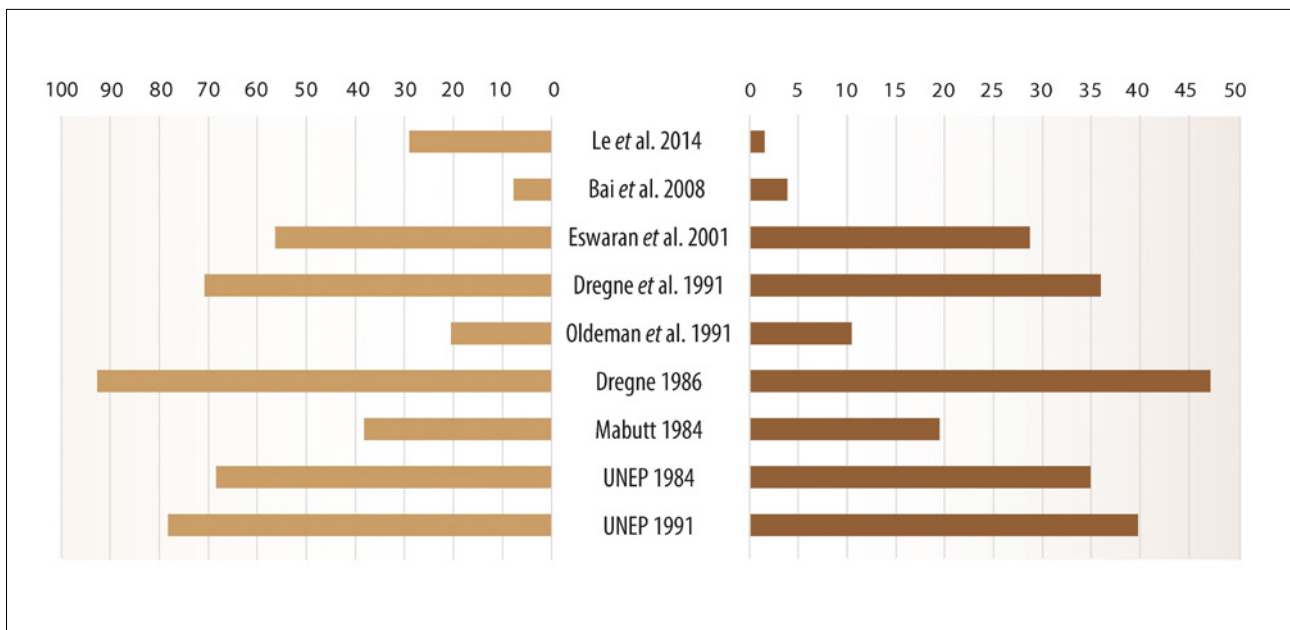


Figura 1. Evaluaciones del alcance de la desertificación en las zonas áridas del planeta. A) Superficie en millones de km²; B) Porcentaje de superficie de zonas áridas desertificada. Adaptado de Sterk y Stoorvogel (2020).

estaban desertificadas, mientras que la FAO mostraba datos de incremento de los rendimientos agrícolas de 400 – 600 kg ha⁻¹ (MEA, 2005).

Como se puede ver en la Figura 1, el área que se estima desertificada fluctúa, según el trabajo consultado, entre los 1,47 y los 47,1 millones de km². Igualmente, se han dado cifras muy variables de la población que sufre las consecuencias de la desertificación, que van desde los 2.700 millones de personas (IPBES, 2018) a los 500 (IPCC, 2019), pasando por los 1.300 millones que dice la CNUCLD (UNCCD, 2017). La crítica no solo se restringe a la falta de consenso entre las distintas aproximaciones, sino también a su incapacidad para ser aplicados, especialmente a escala regional y local, para prevenir y controlar la degradación del suelo (Verón et al., 2006).

RAZONES DE SU INSOLVENCIA Y ALTERNATIVAS

A pesar de la ausencia de mapas de desertificación, el AMD presenta mapas sobre una gran cantidad de variables relacionadas con la desertificación. Esta es, precisamente, una de las principales razones que explican el fracaso de este tipo de mapas. La degradación incluye demasiados procesos, y no todos de

índole biofísica, como bien señala la definición de desertificación. El problema recurrente con el que se topa la cartografía de la desertificación es la falta de reconocimiento de que la desertificación no es un único fenómeno (Gibbs y Salmon, 2015), y que por tanto no se concreta en una única variable que se pueda medir. Es aquí donde la CNUCLD muestra sus fisuras respecto a sus convenciones hermanas, la de Cambio Climático y la de Biodiversidad. En la primera, el problema se puede monitorizar mediante un indicador muy simple, las partes por millón de CO₂ en la atmósfera. Además, las diferencias regionales son innecesarias, puesto que el cambio climático se refiere a la condición media de la atmósfera. En la segunda, pueden manejarse diversos indicadores, que pueden tener más o menos sentido según el lugar al que se refiera. Pero todos apuntan a la misma dirección, que es medir la biodiversidad y el grado de conservación de hábitats.

Concentrar los diversos procesos de desertificación en un solo indicador ha sido, hasta el momento, un obstáculo insalvable, que se ha tratado de superar mediante diversas aproximaciones. Todas ellas tratan de agregar una colección de variables muy diversas entre sí. Por ejemplo, el mapa de riesgo de desertificación de España (Figura 2), que presentó el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) de 2008 (MAGRAMA, 2008), aplica

la metodología MEDALUS (EC-European Commission, 1999). En concreto, este mapa es una simple operación de álgebra para sumar el efecto de cuatro factores (aridez, erosión, uso de acuíferos y superficie quemada por incendios forestales), excluyendo la posibilidad de una sinergia entre ellos (Martínez-Valderrama et al., 2021). Por ejemplo, en un territorio con mayor aridez, y por tanto con menores tasas de productividad, la pérdida de suelo tiene un mayor impacto que en zonas menos áridas, puesto que las tasas de formación de suelo son menores. Este tipo de interacciones no son consideradas con la metodología utilizada en el PAND, que también ignora las causas del problema. Así, el mapa de riesgos del PAND no incluye ninguna variable que represente la evolución de la superficie de regadío, que causa el deterioro de las masas de agua subterránea (De Stefano y Lopez-Gunn, 2012), ni se considera ningún otro uso del suelo o variable que pueda explicar los motivos de la desertificación (Cherlet et al., 2018). Las cuatro variables utilizadas se baremaron según

criterios subjetivos. Por ejemplo, cuando la erosión del suelo estimada por el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) está comprendida entre 12 y 25 t ha⁻¹ año⁻¹, el peso del factor erosión es 2. Si en ese píxel, además, hay una masa de agua subterránea sobreexplotada, se añade un punto, y si el porcentaje de superficie acumulada recorrida por el fuego durante 10 años (variable un tanto intrincada) supera el 10%, tenemos otro punto. Por último, el grado de aridez añade un punto si es semiárido y dos si es árido (el sub-húmedo seco no penaliza). Como se puede deducir, a más puntos, más riesgo de desertificación. El mayor mérito de este tipo de aproximaciones es que consiguen dar una cifra para cada píxel del territorio. Sin embargo, este tipo de mapas han de tomarse como los primeros intentos para abordar y acotar el problema, pero requieren profundas reformas conceptuales para dar una idea precisa del problema. Las nuevas herramientas metodológicas y el enorme caudal de datos disponibles pueden aportar luz al problema de cartografiar de la desertificación.

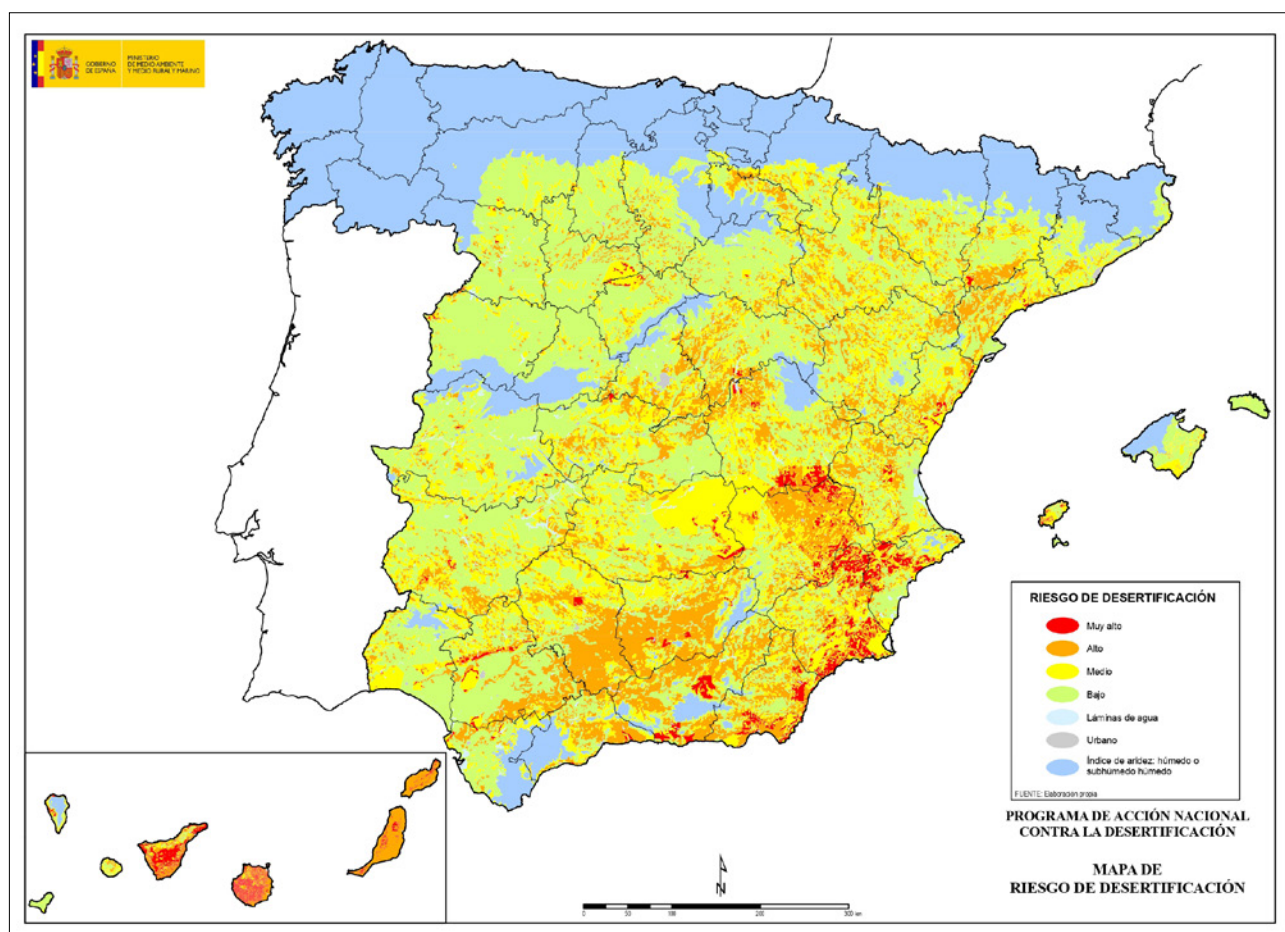


Figura 2. Mapa de riesgo de desertificación de España (MAGRAMA, 2008).



Además de la dificultad para medir la desertificación, ya se han apuntado otros puntos débiles de la cartografía disponible. Estos atlas se basan en su mayoría en evaluaciones subjetivas de expertos, por lo que serían difíciles de aplicar en otros lugares o por diferentes observadores, y considerarse como condición basal para evaluar cambios futuros (Prince, 2016). Asimismo, muchas de las magnitudes que se miden a escala local resultan muy difíciles de estimar a mayor escala. En muchos lugares faltan datos de campo, con lo que esos «huecos» deben rellenarse con estimaciones. La erosión del suelo, que es una de las principales variables consideradas en la caracterización de la desertificación, ilustra este problema. Así, las mediciones en parcelas resultan costosas y es imposible contar con este tipo de datos en grandes territorios. En su defecto se emplean modelos matemáticos (como el mencionado RUSLE, que fue concebido a escala de parcela y por tanto no puede aplicarse a escala de paisaje) que se enfrentan a una de las principales características de la erosión, como es su impredecibilidad. En efecto, en la erosión es clave la coincidencia de suelo desnudo (como consecuencia de un incendio forestal o de las labores agrícolas) y lluvias torrenciales. Un modelo suele sobreestimar la tasa de erosión si no se da esta coincidencia, o subestimarla, si se da, puesto que utiliza valores medios. Aunque los modelos de erosión se han ido perfeccionando, su estima depende completamente de una acertada predicción climática, que localice temporal y espacialmente los eventos de precipitación torrenciales.

Finalmente, otra de las grandes dificultades, tanto conceptuales como metodológicas, es determinar cuantitativamente el umbral que separa el estado no-degradado, del degradado. Para determinar que un lugar se ha desertificado necesitamos tener una referencia de cómo es (o era) el lugar sin degradar, y así estimar cuanto se aleja de ese umbral la variable, o variables, que hayamos elegido para evaluar la desertificación. Esta es otra cuestión espinosa que requiere, como decíamos, consensuar cuál es el estado no degradado. Podemos pensar que el ideal es un ecosistema prístino, y comparar el estado actual con esa referencia un tanto utópica. En ese caso, y si estamos en el ámbito mediterráneo, donde los ecosistemas han sufrido transformaciones y adaptaciones desde hace miles de años, prácticamente todo el territorio puede considerarse degradado; no queda nada del Edén original. A modo de ejemplo, en el Oranesado argelino existían amplias extensiones de esparto que se consideraban

un ejemplo de buena conservación, hasta que el sobrepastoreo propiciado por el incremento de la cabaña ganadera y la desaparición del pastoreo nómada lo degradaron (Martínez-Valderrama et al., 2018). Sin embargo, esta era, a su vez, la versión degradada del pinar que había en la región antes de que los romanos lo talaran.

Como consecuencia de las dificultades metodológicas y los pobres resultados alcanzados, el AMD presenta una alternativa a los mapas de desertificación, la denominada «Convergencia de Evidencias». Consiste en identificar aquellos lugares más proclives a la degradación al coincidir en ellos una serie de factores (biofísicos, climáticos y socioeconómicos) que amenazan el equilibrio entre el uso de recursos y su regeneración. El enfoque de la convergencia es muy acertado, aunque no novedoso. En efecto, encontramos antecedentes metodológicos de esta propuesta en nuestro PAND (Martínez-Valderrama et al., 2022). Los paisajes de desertificación propuestos por el PAND tienen su origen en el proyecto de investigación SURMODES (Puigdefábregas & del Barrio, 2000), que detectó a nivel provincial, a partir de información climática y económica, los «puntos calientes» de la desertificación en España. Tras la publicación del PAND, se han hecho dos esfuerzos metodológicos en nuestro país para tratar de acotar el problema de la desertificación (Figura 3).

Por un lado, se ha construido un mapa sobre la condición de la tierra y su tendencia (del Barrio et al., 2010; Sanjuán et al., 2014) a partir del concepto de Uso Eficiente de la Lluvia (Le Houerou, 1984), que compara la productividad primaria de un lugar considerando la productividad esperada de acuerdo con la lluvia que recibe. Aunque este mapa no incluye muchas de las variables relacionadas con la desertificación, la productividad primaria neta, que suele aproximarse con el Índice utilizando como variable proxy el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Tucker et al., 1986; NDVI en inglés), forma parte de la triada de indicadores de la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT) (Cowie et al., 2018), el reciente paradigma para abordar la desertificación propuesto por la CNULD. De este mapa –elaborado para el período 2000-2010– se obtuvo la cifra que actualmente se maneja en España sobre el alcance del problema. Se estimó que el 73,8% del territorio es susceptible de desertificación (es decir, son zonas áridas), que el 20% del territorio está degradado, y que el 1% se está degradando activamente (Martínez-Valderrama et al., 2016; Sanjuán et al., 2014). La

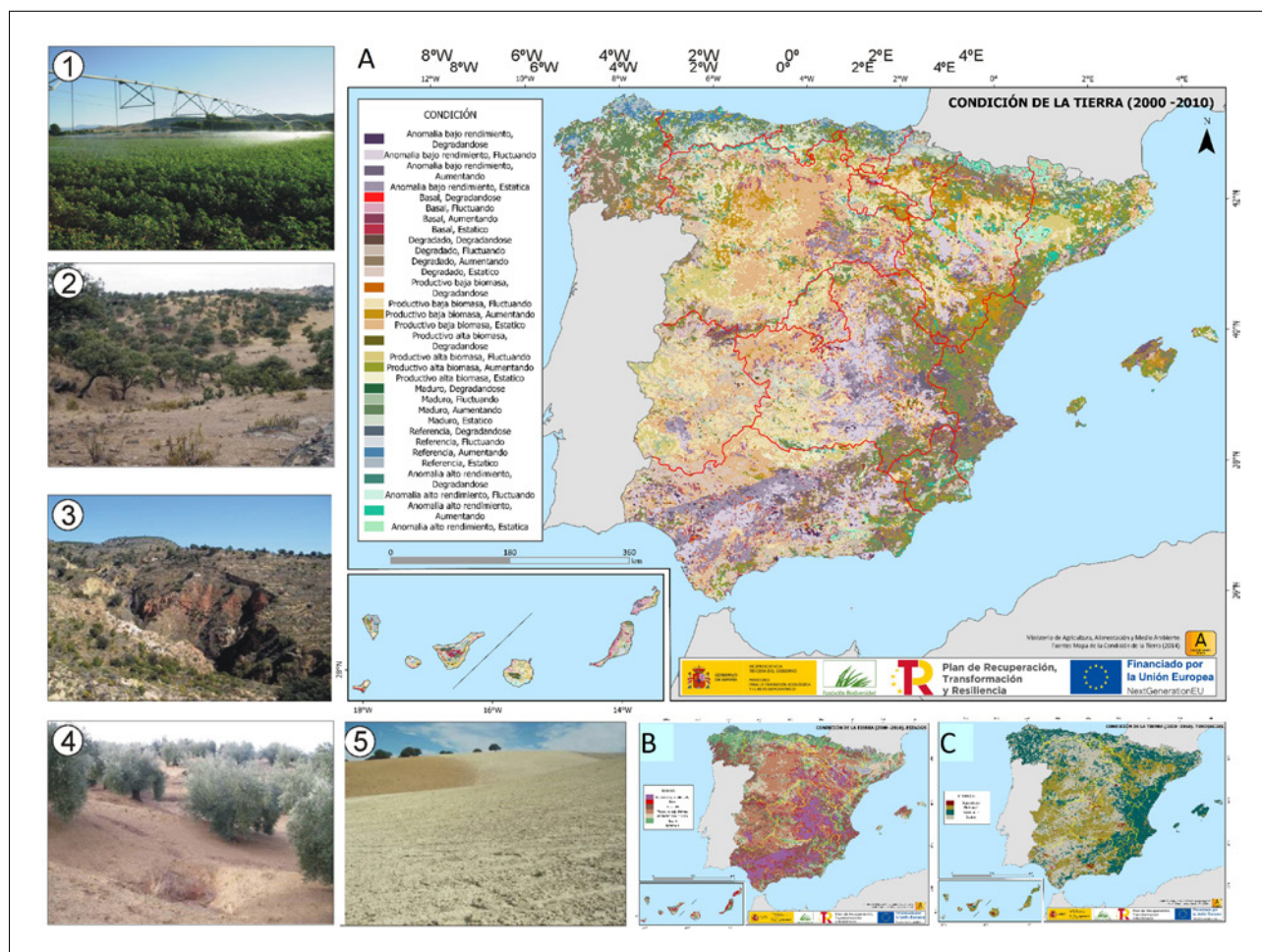


Figura 3. Mapa de condición de la tierra de España (Sanjuán et al., 2014) y paisajes de desertificación del PAND (MAGRAMA, 2008): (1) Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación; (2) Sistemas agro-silvo-pastorales afectados por sobrepastoreo; (3) Matorrales degradados y eriales; (4) Cultivos leñosos afectados por la erosión; (5) Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión. Fuente: Martínez-Valderrama et al. (2016)

segunda iniciativa fue establecer modelos dinámicos para cada uno de los paisajes considerados, con el fin de estimar la probabilidad de desertificación (Ibáñez et al., 2008) dadas las condiciones climáticas y de uso del suelo vigentes. A pesar de estos avances, tanto en la caracterización de la degradación actual como en el riesgo de que ocurra, existe un vacío conceptual, metodológico y de gestión que es preciso abordar. El problema no será la ausencia de mapas, sino que ante la necesidad de precisar dónde ocurre el problema y monitorizar su avance, la Administración utilice mapas desactualizados, con poca validez científica o que incluso tergiversen una vez más el problema (por ejemplo, el mapa de aridez se ha utilizado como equivalente del de desertificación, y los niveles de aridez como sinónimos de la intensidad de degradación).

UNA OPORTUNIDAD CIENTÍFICA Y UNA NECESIDAD POLÍTICA.

Tras más de cuatro décadas intentando cartografiar la desertificación, el veredicto del AMD ha dejado en blanco estos mapas. Uno de los principales problemas de esta situación es que se pueden rellenar con información indirectamente relacionada con el problema y que en lugar de contribuir a resolverlo añadan más confusión. Así, cuando las administraciones se ven exigidas a dar una respuesta al problema de la desertificación, lo más intuitivo es que utilicen, si no hay otra cosa, el mapa de aridez, lo cual es conceptualmente un error de bulto, puesto que las zonas áridas son solo las zonas potencialmente desertifica-



bles. Por otra parte, un mapa en blanco es un reto para un investigador, una oportunidad de establecer una metodología que sirva para cartografiar la desertificación no solo en España, sino en todo el mundo.

La reciente declaración de Emergencia Climática del Gobierno Español (2020) implica, entre otros compromisos, desarrollar una Estrategia Nacional contra la Desertificación (ENLD) (MITERD, 2022), aprobada por el Consejo de Ministros el 21 de junio de 2022. Este documento puede interpretarse como una llamada a la acción, debido a que, lejos de desaparecer, los paisajes de desertificación anunciados en el PAND se han asentado y expandido. La ENLD proporciona un diagnóstico de la situación actual –que debe ser matizado y adecuadamente cuantificado–, y propone numerosas acciones y medidas a llevar a cabo hasta 2030. Entre ellas destaca la realización de un plan de restauración de terrenos afectados por la desertificación (para lo cual es necesario cartografiarlos), el desarrollo de una red de proyectos piloto y demostrativos de lucha contra la desertificación, la aplicación de buenas prácticas de gestión sostenible de la tierra en el sector agrario, forestal y de los recursos hídricos, y la elaboración de un ADE. Como vemos, la ENLD es un cúmulo de propuestas que es necesario desarrollar. En el ámbito de este proyecto subrayamos la ausencia de mapas de desertificación en la ENLD, lo que hace de los antiguos mapas del PAND (2008) y el mapa de condición de la tierra de 2014 los más actuales disponibles a día de hoy, pese a utilizar información de hace unos 15 años.

La otra novedad es la mencionada NDT. Veinte años después de la aprobación de las tres Convenciones de Río en la Cumbre de la Tierra de 1992, se aprobó el documento final del proceso Río+20, «el futuro que queremos» (UN, 2012), ratificando el compromiso global de: i) esforzarse por conseguir un mundo neutral en lo que concierne a la degradación de las tierras; ii) adoptar medidas coordinadas a nivel nacional, regional e internacional en el contexto de la CNULD; y iii) realizar un seguimiento global de la degradación de las tierras y restablecer las tierras degradadas en zonas áridas. Poco después, en 2015, la comunidad global llegó a un acuerdo sobre la «Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible», en la que se incluían 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y 169 metas (UN, 2015). El objetivo 15 insta a los países a proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una gestión sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación

de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica. La meta 15.3 se centra en «luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo» para 2030.

La CNULD aprobó la definición de NDT como «una situación en que la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras necesarios para sustentar las funciones y los servicios ecosistémicos e incrementar la seguridad alimentaria se mantienen estables o aumentan dentro de una determinada escala temporal y espacial». Además, solicitó a la Interfaz Ciencia-Política de la CNULD que propusiera un marco conceptual para que respalde científicamente la aplicación de la NDT. Desde entonces se han producido diversos documentos técnicos en los que se trata de aclarar en qué consiste exactamente la NDT y cómo implementarla. Entre ellos destaca el trabajo seminal de Orr et al. (2017) y la publicación de Cowie et al. (2018). Analizando estos documentos destacamos una serie de principios que justifican la necesidad de contar con mapas de desertificación y ofrecen algunos elementos para su elaboración. La NDT establece que la degradación máxima es la que había en 2015, lo que implica elaborar un mapa que muestre esta degradación. Además, la NDT trasciende las zonas áridas y considera todo el territorio. La prevención y la anticipación deben de ser las prioridades en la implementación de la NDT. Ello requiere conocer qué territorios se va a degradar y proponer medidas correctoras.

Implícitamente, esto significa tener un mapa de riesgo de desertificación (o degradación), que debe compararse con el mapa actual de desertificación. Para monitorizar los cambios en la degradación se proponen tres indicadores (cobertura terrestre, productividad de la tierra y carbono orgánico en el suelo), que formarán parte de las variables cartografiadas. La NDT considera que estos tres indicadores deben complementarse con otros que informen sobre las particularidades de cada lugar, lo que supone estudiar las bases de datos disponibles y seleccionar los indicadores que sean más útiles (p.ej., en el caso de España es necesario contar con indicadores que informen sobre el estado de las aguas subterráneas y sobre el estado de las masas superficiales, en particular los humedales). Por último, y no menos importante, la NDT advierte que la posibilidad de compensar mediante restauraciones no puede interpretarse como una licencia para degradar. Por ello los princip-

ios para llevar a cabo las compensaciones de la NDT son muy estrictos y requieren que estas acciones regenerativas tengan lugar en el mismo tipo de terreno y dentro de la subunidad de análisis territorial establecida (el país, que es la unidad de trabajo de la NDT, debe dividirse en varias subunidades).

Nos encontramos, por tanto, en una encrucijada sumamente interesante desde el punto de vista científico-técnico. La lucha contra la desertificación demanda mapas para poder abordarla. Como señala acertadamente Prince (2016): «Décadas de trabajo han mejorado nuestra comprensión de los componentes individuales de los procesos de desertificación, pero no han respondido a las tres preguntas fundamentales a escala regional y global: ¿Qué se degrada? ¿Dónde ocurre? ¿Cuál es la gravedad de la degradación?» El propio AMD reconoce que nunca hubo tanta información disponible sobre desertificación, y abre la puerta tíbiamente a encontrar algún modo fiable de combinar todas esas bases de datos para dibujar el problema en un mapa que permita tomar decisiones y ser conscientes de su magnitud.

EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECTAR DESERTIFICACIÓN

La situación en 2022, en relación con la disponibilidad de datos y su tratamiento, respecto a finales del siglo pasado y comienzos de éste, que es de cuando datan los últimos intentos por cartografiar la desertificación, ha cambiado sustancialmente. El imparable desarrollo de la Inteligencia Artificial, su aplicación al estudio de la desertificación (Guirado & Martínez-Valderrama, 2021), y el procesamiento de datos, cada vez más abundantes, completos y accesibles, permiten sustanciar nuevas propuestas metodológicas.

El desarrollo metodológico del proyecto ATLAS (Figura 4) tiene dos fases. La primera reúne información geoespacial y bibliográfica sobre desertificación en España (que en sí misma ya es una parte del Atlas, y se divide en variables climáticas, socioeconómicas y biofísicas), y realiza un inventario de casos de desertificación en España. En cada caso se identifica el tipo de desertificación (heredada, cuando ocurrió hace décadas o siglos; activa, si se trata de un proceso de degradación actual), la localización geográ-

fica, se aportan referencias bibliográficas o documentales que permitan corroborar dicho caso, y se vincula tanto a variables que permitan cuantificar la degradación (erosión del suelo, pérdida de fertilidad, agotamiento/contaminación acuíferos, desecamiento de humedales) como a variables que expliquen esa degradación (por ejemplo, cambios en el uso del suelo o en las tecnologías y prácticas productivas). Este inventario de casos de desertificación debe completarse con casos en los que no haya degradación, datos esenciales para la segunda fase metodológica en la que se pretende pronosticar la ocurrencia de desertificación en casos no inventariados a partir de la relación de los casos inventariados con determinadas variables.

Es importante señalar que el hecho de determinar qué es degradación (o desertificación, pues nos circunscribimos a las zonas áridas) no deja de mantener ciertas dosis de ambigüedad que es imposible erradicar. El hecho de relacionar cada caso con variables objetivas de degradación pretende eliminar o minimizar este sesgo potencial, pero somos conscientes de que las nociones de degradación y restauración se basan en aspectos biofísicos, pero se construyen socialmente y, por tanto, son potencialmente muy controvertidas (Meyfroidt, Bremond, et al., 2022).

El enfoque descrito en el párrafo anterior evita diversos obstáculos que se han presentado con anterioridad cuando se ha intentado cartografiar la desertificación. Por un lado, evitamos el espinoso asunto de los umbrales de degradación, que esconden sus propias controversias. Por el otro, un ecosistema que podría ser considerado como degradado bajo cierto criterio, por ejemplo forestal, puede seguir siendo funcional y estable y no siempre es deseable restaurar el punto de partida original. Por ejemplo, las dehesas podrían ser vistas como una versión degradada de bosques de encinas y alcornoques que fueron clareados en busca de zonas de pastoreo. Sin embargo, ese aclarado dio lugar a una explosión de biodiversidad, de productividad, conformando no tanto un sistema degradado sino un ecosistema diferente. Revertir el sistema a la situación original puede perjudicar, por ejemplo, no sólo a la actividad ganadera que alberga sino también la multifuncionalidad socioeconómica y ambiental de este agroecosistema, incluyendo su biodiversidad. En segundo término, la escala espacial será variable, puesto que estos casos se pueden referir a territorios más o menos extensos, desde sierras a masas de agua subterránea. En todo caso, adop-

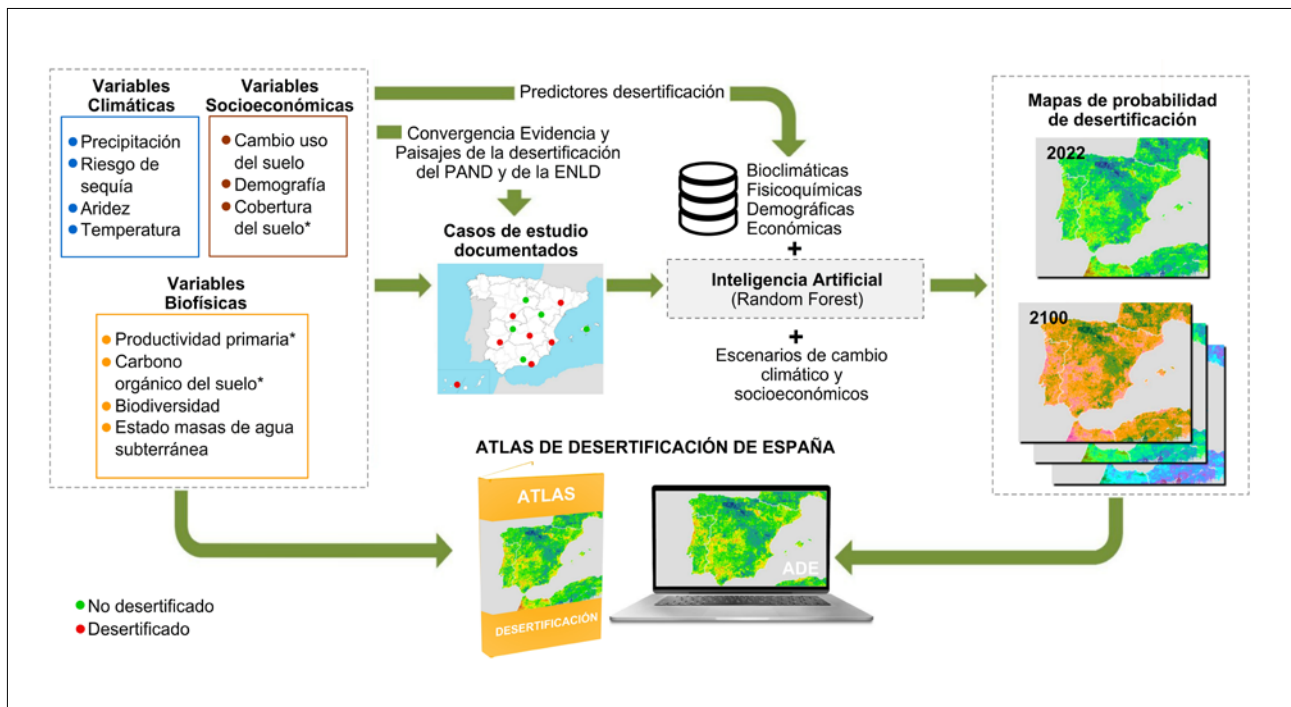


Figura 4. Esquema metodológico del proyecto ATLAS para la elaboración del Atlas de Desertificación de España. *Indicadores de la NDT.

haremos una escala de paisaje, que es la adecuada para hablar de desertificación. Por último, la desertificación no va a ser una variable que resulte de la agregación de otras, sino una variable dicotómica en la que el territorio se va a dividir en áreas con y sin desertificación. Esta primera parte de la metodología supone un avance notorio sobre la representación espacial del problema de la desertificación en España, puesto que SURMODES se limitó a señalar las provincias en las que predominaba cierta actividad agraria que podía desembocar en problemas de desertificación. Su posterior inclusión en el PAND y la ENLD carece de representación espacial, y su valor radica en identificar las tipologías de procesos de desertificación asociadas a sus causas.

El segundo componente metodológico del proyecto ATLAS toma como base el mapa de casos de desertificación anterior para ligarlo a las diversas variables involucradas utilizando herramientas de Inteligencia Artificial. Los algoritmos de InAr necesitan aprender de la realidad para predecir a partir de una serie de variables o predictores. Esta realidad será nuestro mapa dicotómico, que le muestra al algoritmo dónde hay desertificación y dónde no la hay, y además le ofrece una serie de variables que son reflejo y expli-

cación de lo que allí ha ocurrido. Para identificar los principales predictores y la importancia de estos en la desertificación en España, llevaremos a cabo un análisis de permutación de **Random Forest** (Breiman, 2001) (Figura 5). Este análisis permite identificar los determinantes o predictores de la desertificación más importantes entre las variables previamente analizadas.

Este método es un novedoso algoritmo de aprendizaje automático, que amplía los métodos estándar de árbol de clasificación y regresión, creando una colección de árboles de clasificación con divisiones binarias. La importancia de cada variable de predicción se determina evaluando la disminución de la precisión de la predicción cuando los datos de ese predictor se permutan al azar. Esta medida de importancia de la precisión se calcula para cada árbol y se promedia. A diferencia de la inferencia multitemodelo, que utiliza regresiones lineales o análisis de árboles de regresión, el análisis de bosques aleatorios alivia los problemas de multicolinealidad en los análisis multivariantes mediante la construcción de conjuntos de árboles empaquetados y la inclusión de un subconjunto aleatorio de características para cada árbol. Estos resultados, nos ayudarían en una

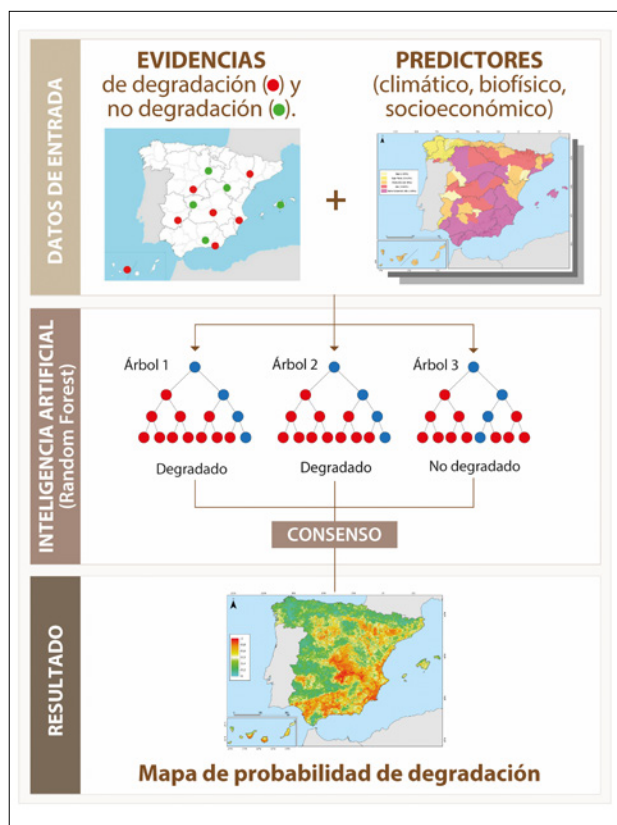


Figura 5. Flujo de trabajo de la metodología a emplear para obtener el mapa de probabilidad de desertificación utilizando inteligencia artificial (Random Forest).

tarea clave, la asignación de pesos a los predictores de la desertificación. Con este paso solventaremos uno de los principales fallos metodológicos, que es asignar sin ninguna base estadística distintos pesos a los factores que intervienen en el proceso de desertificación. Además, este análisis nos permite tener una clasificación de los principales impulsores de la desertificación en España.

Para elaborar el mapa de probabilidad de desertificación, se emplea un análisis de regresión mediante el algoritmo Random Forest, utilizando las 10 variables predictoras más relevantes, junto con las localizaciones de zonas degradadas y no degradadas. El modelo se valida comparando los valores predichos con los observados, siguiendo la metodología propuesta por Piñeiro et al. (2008). A partir de los resultados, se generan distintos mapas de probabilidad: uno que representa la desertificación actual ($\geq 50\%$) y otro que identifica áreas con predicciones menos confiables (probabilidad $< 50\%$).

El umbral del 50% se utiliza comúnmente en modelos probabilísticos como criterio de decisión binaria, ya que representa el punto de equilibrio entre dos posibles estados (por ejemplo, presencia o ausencia de un fenómeno). Una probabilidad igual o superior al 50% indica que el modelo estima una mayor probabilidad de que el evento ocurra que de que no ocurra, lo que justifica su uso para identificar con mayor certeza las zonas potencialmente afectadas.

Para estimar cómo evolucionará la desertificación en España, se crean mapas que consideran la incertidumbre climática y socioeconómica. Se aplican escenarios climáticos y socioeconómicos del IPCC para los periodos 2021-2100 (Eyring et al., 2016) y se analizan cambios en usos agrícolas y urbanos del suelo según proyecciones regionales.

CONCLUSIONES

La publicación en 2018 del tercer Atlas Mundial de Desertificación supuso el certificado de defunción de la cartografía de la degradación de las zonas áridas realizada hasta entonces. El fuerte componente subjetivo en la evaluación de este problema (del cual es imposible librarse completamente), unido a metodologías incapaces de sintetizar en un único indicador la variedad de procesos que forman parte del problema, han dejado en blanco los mapas de desertificación. Ello abre nuevas oportunidades de investigación, a pesar de que los autores del AMD propongan como alternativa los mapas la «Convergencia de Evidencias» (CE), una aproximación que realza el contexto local y regional de la desertificación y que por eso mismo excluye una mirada uniforme. La novedad de la CE se une a otra, la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT), que nos recuerda que la prevención, es decir, detectar los problemas a tiempo, es la estrategia más valiosa para abordar la desertificación.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto ATLAS cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.



CONFLICTO DE INTERESES

Los autores/as de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Bauer, S., & Stringer, L. C. (2009). The Role of Science in the Global Governance of Desertification. *The Journal of Environment & Development*, 18(3), 248–267. <https://doi.org/10.1177/1070496509338405>
- Beinroth, F. H., Eswaran, H., & Reich, P. F. (2001). Global assessment of land quality. In D. E. Stott, R. H. Mohtar, & G. C. Steinhardt (Eds.), *Sustaining the global farm: Selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting* (pp. 569–574). Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Mach. Learn.*, 45, 5–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Castillo Sánchez, V. M. (2022). Ciencia y política contra la desertificación: La respuesta de las instituciones ante un reto global. *Mètode: Revista de Difusió de La Investigació*, 13, 67–73. <https://doi.org/10.7203/metode.13.21901>
- Chasek, P., Akhtar-Schuster, M., Orr, B. J., Luise, A., Rakoto Ratsimba, H., & Safriel, U. (2019). Land degradation neutrality: The science-policy interface from the UNCCD to national implementation. *Environmental Science and Policy*, 92(November 2018), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.017>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & von Maltitz, G. (2018). *World Atlas of Desertification* (M. Cherlet, C. Hutchinson, J. Reynolds, J. Hill, S. Sommer, & G. von Maltitz (eds.)). Publication Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/9205>
- Consejo de Ministros. (2022). El Gobierno aprueba la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación para activar políticas que combatan esta amenaza en España. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-estrategia-nacional-de-lucha-contra-la-desertificacion-para-activar-politicas-que-combatan-esta-amenaza-en-espana/tcm:30-541857#:~:text=Hoy%2C%20en%20Consejo%20de%20Ministros&text=El%20Gobierno>
- Cowie, A. L., Orr, B. J., Castillo Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*, 79, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- CRSTRA, & BeSafeNet. (2023). Natural Hazards Drought and Desertification. BeSafeNet - European Centre for Disaster Awareness. <https://besafenet.net/hazards/drought-and-desertification/>
- Davis, D. K. (2016). *The arid lands. History, power, knowledge.* The MIT Press.
- De Stefano, L., & Lopez-Gunn, E. (2012). Unauthorized groundwater use: Institutional, social and ethical considerations. *Water Policy*, 14(SUPPL. 1), 147–160. <https://doi.org/10.2166/wp.2012.101>
- del Barrio, G., Puigdefabregas, J., Sanjuan, M. E., Stellmes, M., & Ruiz, A. (2010). Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989–2000. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1817–1832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.009>
- Dregne, H. E. (1977). Generalized map of the status of desertification of arid lands. A/CONF 74/31. United Nations Conference on Desertification.
- Dregne, H. E. (1983). *Desertification of Arid Lands.* Harwood Academic Publishers.
- Dregne, H. E., & Chou, N. T. (1992). Global desertification dimensions and costs. In H. E. Dregne (Ed.), *Degradation & Restoration of Arid Lands* (pp. 249–282). Texas Tech University Press.



17. EC-European Commission. (1999). The Medalus Project: Mediterranean desertification and land use: manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification (C. Kosmas, M. J. Kirkby, & N. Geeson (eds.)). Directorate-General Science, Research and Development.
18. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
19. Fundación Nueva Cultura del Agua. (2020). Falcia 4. El regadío es la solución para frenar la desertificación. Desmontando Falacias Sobre Agua y Cambio Climático. <https://fnca.eu/desmontando-falacias/falacia-4/>
20. Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>
21. Gobierno de España. (2020). Declaración del Gobierno de España ante la Emergencia Climática y Ambiental.
22. Greve, P., Roderick, M. L., Ukkola, A. M., & Wada, Y. (2019). The aridity Index under global warming. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5046>
23. Guirado, E., Delgado-Baquerizo, M., Martínez-Valderrama, J., Tabik, S., Alcaraz-Segura, D., & Maestre, F. T. (2022). Climate legacies drive the distribution and future restoration potential of dryland forests. *Nature Plants*, 8(8), 879–886. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01198-8>
24. Guirado, E., & Martínez-Valderrama, J. (2021). Potencial de la inteligencia artificial para avanzar en el estudio de la desertificación. *Ecosistemas*, 30(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2250>
25. Hirche, A., Salamani, M., Abdellaoui, A., Benhouhou, S., & Valderrama, J. M. (2011). Landscape changes of desertification in arid areas: The case of south-west Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 179(1–4), 403–420. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1744-5>
26. Ibáñez, J., Martínez-Valderrama, J., & Puigdefábregas, J. (2008). Assessing desertification risk using system stability condition analysis. *Ecological Modelling*, 213(2), 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.017>
27. IPBES. (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration (A. (Montanarella, L., Scholes, R., Brainich (ed.)). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
28. IPCC. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In: (Eds.), Geneva (J. Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, (ed.)). Intergovernmental Panel on Climate Change.
29. Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B. R., Jiao, J., & Jasechko, S. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, 383, eadf0630. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
30. Le Houerou, H. N. (1984). Rain Use Efficiency: A Unifying Concept in Arid-Land Ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 213–247.
31. Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., & Scholes, R. J. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. *BioScience*, 55(2), 115–124. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0115:A-SOIOR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0115:A-SOIOR]2.0.CO;2)
32. Maestre, F. T., Benito, B. M., Berdugo, M., Concostrina-Zubiri, L., Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Guirado, E., Gross, N., Kéfi, S., Le Bagousse-Pinguet, Y., Ochoa-Hueso, R., & Soliveres, S. (2021). Biogeography of global drylands. *New Phytologist*, 231(2), 540–558. <https://doi.org/10.1111/nph.17395>
33. MAGRAMA. (2008). Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. Madrid. Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente.



34. Mallavan, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2010). Homosoil, a methodology for quantitative extrapolation of soil information across the globe. In J. L. Boettinger, D. W. Howell, A. C. Moore, A. E. Hartemink, & S. Kienast-Brown (Eds.), *Digital Soil Mapping* (pp. 137–150). Springer Dordrecht.
35. Martínez-Valderrama, J. (2024). Desertificación, cuando el territorio hace aguas. *Tirant lo Blanch*.
36. Martínez-Valderrama, J., del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2022). Desertification in Spain: A Sound Diagnosis without Solutions and New Scenarios. *Land*, 11(2), 272. <https://doi.org/10.3390/land11020272>
37. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2022). La vida adaptada a la precariedad: Ecología de las zonas áridas. *Mètode: Revista de Difusió de La Investigació*, 13, 59–65. <https://doi.org/10.7203/metode.13.22006>
38. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2020a). Desertifying deserts. *Nature Sustainability*, 3, 572–575. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0561-2>
39. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2020b). Unraveling misunderstandings about desertification: the paradoxical case of the Tabernas-Sorbas Basin in Southeast Spain. *Land*, 9, 269. <https://doi.org/10.3390/land9080269>
40. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2021). ¿Se puede cartografiar la desertificación? Luces y sombras de una tarea desafiante. *Ecosistemas*, 30(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2211>
41. Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Alcalá, F. J., Sanjuán, M. E., Ruiz, A., Hirche, A., & Puigdefábregas, J. (2018). Doomed to collapse: Why Algerian steppe rangelands are overgrazed and some lessons to help land-use transitions. *Science of the Total Environment*, 613–614, 1489–1497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.058>
42. Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Alcalá, F. J., Martínez-Vicente, S., Ruiz, A., & Puigdefábregas, J. (2016). Present and future of desertification in Spain: Implementation of a surveillance system to prevent land degradation. *Science of The Total Environment*, 563–564, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.065>
43. Martínez-Valderrama, J., Olcina, J., Gartzia, R., Guirado, E., Ibáñez, J., & Maestre, F. T. (2023). Uberizing agriculture in drylands: A few enriched, everyone endangered. *Water Resources Management*, 38, 193–214. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03663-1>
44. Martínez Fernández, J., Esteve-Selma, M. Á., Contreras, S., & Bru Ronda, C. (2002). Agua, regadío y sostenibilidad en el Sudeste ibérico (J. Martínez Fernández & M. Á. Esteve-Selma (eds.)). *Bakeaz*.
45. Mehta, P., Siebert, S., Kummu, M., Deng, Q., Ali, T., Marston, L., Xie, W., & Davis, K. F. (2024). Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. *Nature Water*. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00206-9>
46. Meyfroidt, P., Bremond, A. De, Ryan, C. M., Archer, E., Aspinall, R., & Erb, K. (2022). Ten facts about land systems for sustainability. *PNAS*, 119(7), 1–12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109217118>
47. Meyfroidt, P., Ryan, C. M., & Aspinall, R. (2022). Ten facts about land systems for sustainability. *PNAS*, 119(7), e2109217118.
48. Middleton, N., Stringer, L., Goudie, A., & Thomas, D. S. G. (2011). The Forgotten Billion: MDG achievement in the drylands.
49. Millenium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). Dryland Systems. In R. Hassan, R. Scholes, & N. Ash (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios* (pp. 623–662). Island Press.
50. MITERD. (2022). Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación en España. 159.
51. Nachtergaele, F. O., Petri, M., Biancalani, R., van Lynden, G., van Velthuisen, H., & Bloise, M. (2011). An Information database for land degradation assessment at global level. Global land degradation information system (GLADIS).
52. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. *Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD)* (2nd ed.). Wageningen Winand Staring Center, International Society for Soil Science, FAO, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science.



53. Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo, V. M., Sanchez, P., Chasek, N. D., Crossman, Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2017). Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A report of the Science-Policy Interface. In United Nations Convention to Combat Desertification - UNCCD.
54. Perevolotsky, A., & Seligman, N. G. (1998). Role of grazing in Mediterranean rangeland ecosystems - Inversion of a paradigm. *Bioscience*, 48(12), 1007–1017.
55. Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216, 316–322.
56. Prince, S. D. (2016). Where Does Desertification Occur? Mapping Dryland Degradation at Regional to Global Scales. In R. Behnke & M. Mortimore (Eds.), *The End of Desertification? Disputing Environmental Change in the Drylands* (pp. 225–263). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-16014-1_9
57. Prince, S. D., & Podwojewski, P. (2019). Desertification: Inappropriate images lead to inappropriate actions. *Land Degradation & Development*, 31(6), 677–682. <https://doi.org/10.1002/ldr.3436>
58. Puigdefábregas, J. (1995). Erosión y desertificación en España. *Campo*, 132, 63–83.
59. Puigdefábregas, J., & del Barrio, G. (2000). SUR-MODES: a Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification (CD ROM).
60. Reynolds, J. F. (2021). Desertification is a prisoner of history: An essay on why young scientists should care. *Ecosistemas*, 30(3), 2302. <https://doi.org/https://doi.org/10.7818/ECOS.2302>
61. Reynolds, J. F., & Stafford Smith, M. (2002). Do Humans Cause Deserts? In J. Reynolds & M. Stafford Smith (Eds.), *Global Desertification. Do Human Cause Deserts* (pp. 1–21). Dahlem University Press.
62. Safriel, U. (2007). The assessment of global trends in land degradation. In M. Sivakumar & N. Ndiang'ui (Eds.), *Climate and land degradation* (pp. 1–38). Springer.
63. Sancho Comíns, J., & Olcina Cantos, J. (2020). De la geografía a los atlas y de los atlas a la geografía. *Estudios Geograficos*, 81(288), e042.
64. Sanjuán, M. E., Barrio, G. del, Ruiz, A., Rojo, L., Puigdefábregas, J., & Martínez, A. (2014). Evaluación y seguimiento de la desertificación en España: Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (España). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/10575>
65. Sterk, G., & Stoorvogel, J. J. (2020). Desertification—Scientific Versus Political Realities. *Land*, 9(156), 1–18. <https://doi.org/10.3390/land9060156>
66. Tucker, C. J., Justice, C. O., & Prince, S. D. (1986). Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985. *Int. J. Remote Sens.*, 7, 1571–1581.
67. Turner, M. D., Davis, D. K., Yeh, E. T., Hiernaux, P., Loizeaux, E. R., Fornof, E. M., Rice, A. M., & Suter, A. K. (2023). Great Green Walls: Hype, Myth, and Science. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 263–287. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-111102>
68. UN (United Nations). (2012). Future We Want - Outcome document. <https://sustainabledevelopment.un.org/futurewewant.html>
69. UN (United Nations). (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Gen. Assem. 70 Sess.
70. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (2017). United Nations Convention to Combat Desertification. 2017. The Global Land Outlook, first edition.
71. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (2022). Global Land Outlook. Land Restoration for Recovery and Resilience (Second ed.). UNCCD.
72. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa.
73. UNEP (United Nations Environmental Programme). (1997). World Atlas of Desertification: Second Edition (N. Middleton & D. Thomas (eds.)). UNEP.



74. UNEP (United Nations Environmental Programme). (1992). World Atlas of Desertification (N. Middleton & D. Thomas (eds.)). Edward Arnold Publishers..
75. Verón, S. R., Paruelo, J. M., & Oesterheld, M. (2006). Assessing desertification. *Journal of Arid Environments*, 66(4), 751–763. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.01.021>
76. Wang, L., Jiao, W., Macbean, N., Rulli, M. C., Manzoni, S., Vico, G., & Odorico, P. D. (2022). Dryland productivity under a changing climate. *Nature Clim. Change*, 12, 981–994. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01499-y>
77. Wu, S., Liu, L., Li, D., Zhang, W., Liu, K., Shen, J., & Zhang, L. (2023). Global desert expansion during the 21st century: Patterns, predictors and signals. *Land Degradation and Development*, 34(2), 377–388. <https://doi.org/10.1002/ldr.4466>

Si desea citar nuestro artículo:

Martínez-Valderrama J, Guirado E, Olcina J, Varela E, Martínez-Fernández J, Lucas-Borja ME, Martí-Talavera J, Cintas J, Maestre FT. M. El Atlas de la desertificación de España, un primer paso para atajar la degradación de la tierra. *RACSG*.2025;113(01):5-21 [rac.2025.113.1.org01](https://doi.org/10.1002/rac.2025.113.1.org01)