

Salvador Sánchez-Carrillo, David G. Angeler y Miguel Álvarez-Cobelas



Umbrales e incertidumbre: claves para entender la actual crisis ambiental

Resumen

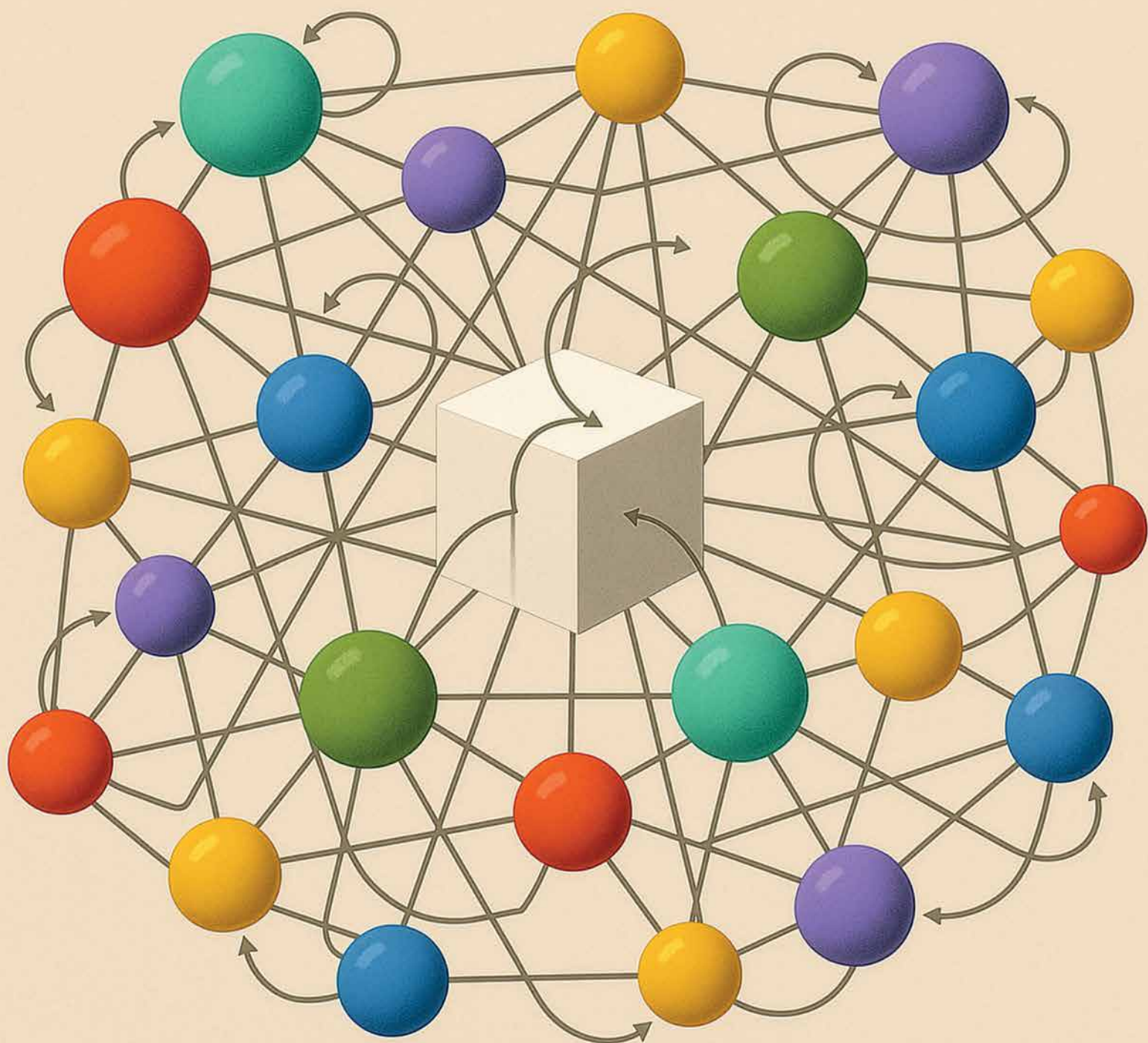
Necesitamos repensar cómo entendemos y manejamos la naturaleza. Los ecosistemas no responden a los cambios ambientales de forma gradual ni predecible: pueden cruzar umbrales, cambiar bruscamente y reorganizarse a través de múltiples interacciones. Para conservarlos, es necesario asumir que la incertidumbre forma parte de su funcionamiento y adaptar nuestras decisiones a ella. Esto exige una ciencia ecológica capaz de integrar la complejidad del mundo natural y de orientar formas de actuación más flexibles y realistas.

Abstract

We need to rethink how we understand and manage nature. Ecosystems do not respond to environmental change in a gradual or predictable way: they can cross thresholds, shift abruptly, and reorganize through multiple interactions. To conserve them, it is necessary to recognize that uncertainty is an inherent part of how they function and to adapt our decisions accordingly. This requires an ecological science capable of integrating the complexity of the natural world and guiding more flexible and realistic ways of action.

Introducción

En la naturaleza, los cambios rara vez son suaves o proporcionales. Ecosistemas aparentemente estables pueden transformarse de forma abrupta tras perturbaciones muy pequeñas. Fenómenos como el colapso de una población de tortugas, las floraciones de algas en la costa o los cambios repentinos en la transparencia de un lago ilustran lo que llamamos procesos no lineales: la respuesta del ecosistema no es proporcional a la perturbación (Scheffer y cols., 2001; Hastings y cols., 2018).



Umbral ▶
Punto crítico a partir del cual un ecosistema cambia bruscamente de un estado a otro, en vez de responder de forma gradual.

Durante gran parte del siglo xx, la ecología se apoyó en modelos lineales, asumiendo que el comportamiento de las poblaciones y los flujos de materia podía predecirse de forma relativamente sencilla (Levin, 1992). Sin embargo, tanto las observaciones como los modelos más recientes han revelado un panorama mucho más complejo, en el que aparecen retroalimentaciones, **umbrales**, cambios abruptos y estados alternativos. Lejos de ser excepciones, estos comportamientos son rasgos habituales de los ecosistemas.

Desde la física y las matemáticas, un sistema se considera no lineal cuando pequeñas perturbaciones pueden amplificarse debido a las interacciones entre sus componentes y a los mecanismos de retroalimentación (Hastings y cols., 2018). En ecología, esto se manifiesta en procesos como los ciclos de nutrientes, el metabolismo de los ecosistemas, la dispersión de especies o la propagación de perturbaciones. En estos sistemas, alejados del equilibrio, pueden darse múltiples trayectorias posibles, muy dependientes de su historia previa.

Un aspecto clave de esta complejidad es la interacción entre escalas. Lo que ocurre a nivel microbiano puede amplificarse hasta afectar al funcionamiento de un ecosistema completo o incluso de un bioma (Levin, 1992; Kéfi y cols., 2016). Las interacciones entre niveles –desde lo local hasta lo regional– generan propiedades emergentes; es decir, comportamientos del conjunto que no pueden explicarse a partir de sus partes por separado. Por eso, la incertidumbre no es sólo una limitación de nuestro conocimiento, sino una característica propia de los sistemas ecológicos.

En este artículo exploramos las bases de estos comportamientos no lineales y sus implicaciones para comprender y gestionar los ecosistemas. Asumir que la naturaleza funciona de una manera compleja y no siempre predecible nos obliga a replantear cómo la estudiamos y cómo tomamos decisiones frente a la actual crisis ambiental.

■ La naturaleza no lineal de los procesos ecológicos

■ Los ecosistemas están formados por múltiples componentes interconectados cuyas interacciones no

responden de forma proporcional a los cambios del entorno. Un ejemplo clásico son los lagos someros: un ligero aumento de nutrientes puede desencadenar un cambio brusco, pasando de aguas claras con vegetación sumergida a un estado turbio dominado por algas. Este tipo de transición puede ser difícil de revertir, incluso si las condiciones iniciales se recuperan, porque el sistema puede quedar “atrapado” en un nuevo estado estable, un fenómeno conocido como histéresis.

Patrones espaciales y autoorganización

Además, los ecosistemas no sólo cambian en el tiempo, sino también en el espacio. En muchos casos, muestran patrones que surgen de manera espontánea a partir de interacciones locales, sin necesidad de un control central. En los humedales, por ejemplo, la distribución de la vegetación depende del flujo de agua, el crecimiento de las plantas y los ciclos de nutrientes. Estas interacciones generan configuraciones reconocibles, como mosaicos o bandas de vegetación, que, aunque cambian con el tiempo, mantienen cierta organización funcional. Estos patrones no sólo reflejan la historia del sistema, sino que también influyen en su capacidad para resistir y recuperarse frente a perturbaciones.

En conjunto, estas dinámicas ponen de manifiesto que los ecosistemas son sistemas complejos, en los que múltiples factores interactúan generando comportamientos emergentes. Como resultado, sus respuestas suelen ser difíciles de anticipar, lo que limita la utilidad de los enfoques lineales y simplificados para entender fenómenos como los cambios abruptos de estado, la autoorganización o la propagación espacial de perturbaciones.

Mecanismos de la no linealidad

Una característica fundamental de estos sistemas es la multiestabilidad: bajo las mismas condiciones externas, un ecosistema puede mantenerse en distintos estados posibles. Esto tiene implicaciones importantes para su gestión, ya que pequeñas variaciones o decisiones aparentemente menores pueden empujar al sistema hacia configuraciones muy diferentes, a veces difíciles de revertir.

Las retroalimentaciones son el núcleo de esta dinámica (Figura 1). Algunas actúan estabilizando el sistema –por ejemplo, cuando el aumento de depredadores limita el crecimiento de una población–, mientras que otras amplifican los cambios, como ocurre cuando la pérdida de vegetación reduce la infiltración de agua y favorece procesos de erosión del suelo. La interacción entre ambos tipos de retroalimentación puede dar lugar a oscilaciones o a cambios bruscos en el estado del ecosistema, lo que exige ir más allá de relaciones simples de causa y efecto para comprender su funcionamiento.

Tradicionalmente, el cambio ecológico se ha representado como una respuesta directa a factores externos (Figura 2, a y b). Sin embargo, esta visión simplifica en exceso la realidad. Una forma más intuitiva de entender estos procesos es imaginar el estado de un ecosistema como una bola que se desliza sobre un paisaje con valles y colinas (Figura 2c).

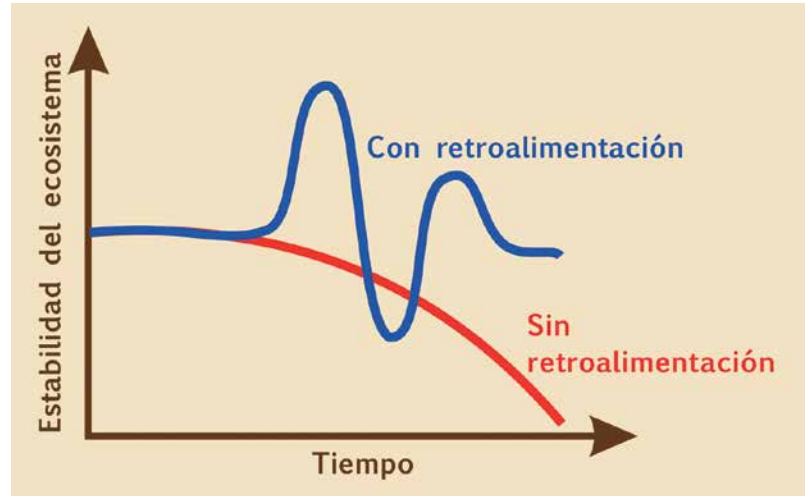


Figura 1. La retroalimentación es un componente fundamental de la estabilidad ecológica. Sin estos mecanismos, los ecosistemas tienden a degradarse frente a perturbaciones. En cambio, las retroalimentaciones, y en particular las negativas, permiten amortiguar los cambios y favorecen la capacidad del sistema para resistir y reorganizarse.

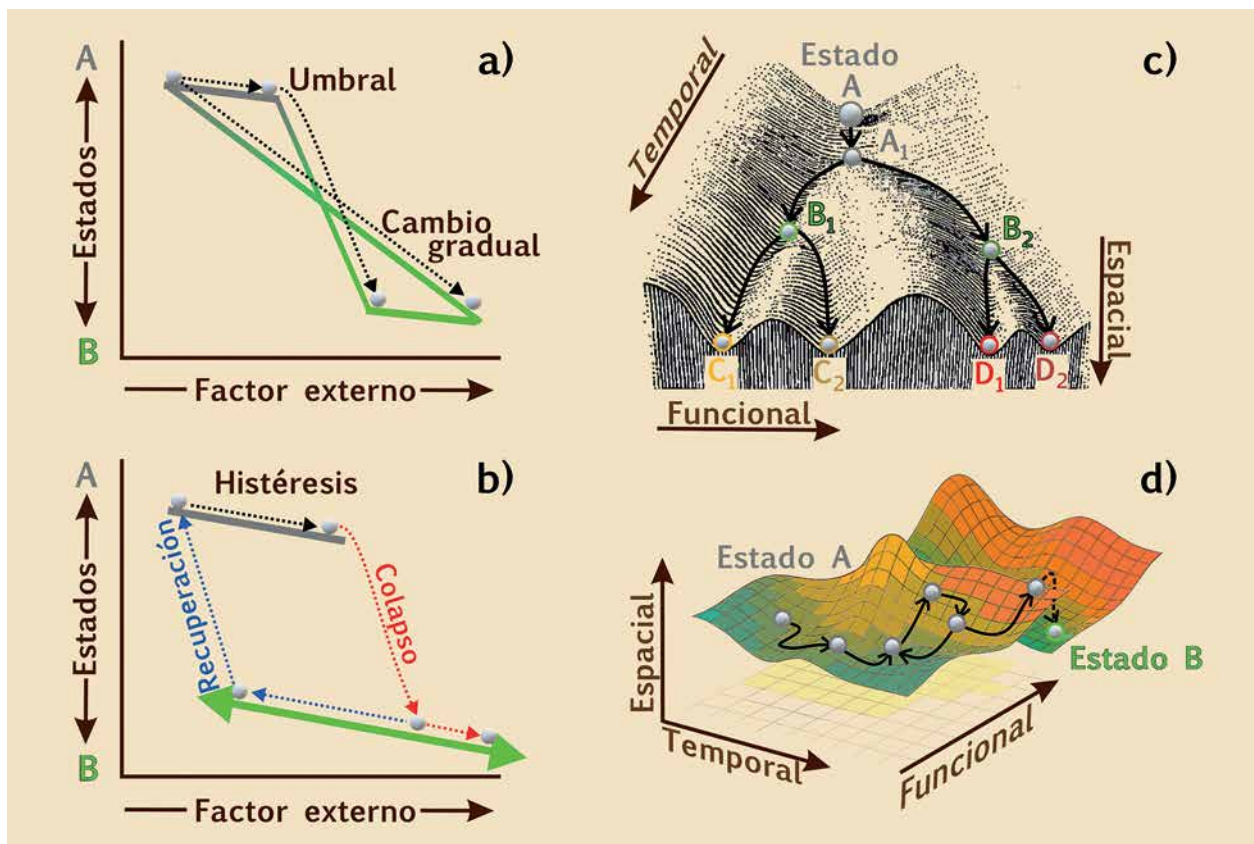


Figura 2. Comparación entre una visión lineal del cambio ecológico (a y b), donde las respuestas son graduales y proporcionales, y una visión compleja (c y d), en la que los ecosistemas pueden cambiar entre distintos estados. El panel d muestra esta dinámica en tres dimensiones, destacando la diversidad de trayectorias posibles.

Cada valle representa un estado estable, mientras que las colinas actúan como barreras que dificultan el cambio entre estados. En este contexto, pequeñas perturbaciones pueden no tener apenas efecto si el sistema permanece en el mismo valle; pero si se supera una de esas barreras, se produce una transición hacia otro estado, a menudo difícil de revertir.

Este tipo de representación permite integrar en una misma imagen ideas fundamentales como la existencia de múltiples estados posibles, la importancia de la historia del sistema y la posibilidad de cambios abruptos. Frente a los modelos lineales, ofrece una visión más realista de la dinámica ecológica y ayuda a comprender por qué los ecosistemas pueden comportarse de forma impredecible (Figura 2d).

Resiliencia

Capacidad de un ecosistema para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder su funcionamiento esencial, no sólo para "recuperarse".

Escalas e interacciones cruzadas

En los ecosistemas, lo que ocurre a pequeña escala no está aislado. Procesos locales pueden propagarse, amplificarse o modificarse al interactuar con dinámicas de mayor escala. Esta interdependencia hace que los ecosistemas funcionen como redes conectadas, donde las relaciones entre escalas generan comportamientos complejos y, en muchos casos, difíciles de prever.

Del microbio al clima: ecosistemas conectados

Los microorganismos desempeñan un papel esencial en el funcionamiento de los ecosistemas. Aunque operan a escalas muy pequeñas y en tiempos breves, sus efectos acumulados influyen en procesos globales, como los **ciclos biogeoquímicos** (Falkowski y cols., 2008). Cambios locales –por ejemplo, en la humedad o en la disponibilidad de nutrientes– pueden alterar su actividad y desencadenar respuestas que escalan afectando funciones clave como la captura de carbono o la emisión de gases, con consecuencias a nivel regional e incluso global.

De forma similar, las decisiones humanas sobre el uso del suelo, aun siendo locales, pueden modificar procesos físicos fundamentales como el **albedo**, los flujos de humedad o la circulación atmosférica (Bonan, 2008). Estas alteraciones pueden generar efectos en cascada que terminan afectando al clima. Así, los sistemas ecológicos y sociales forman

una red interdependiente en la que las acciones humanas no están fuera del sistema, sino que actúan en su interior amplificando su complejidad.

Por qué importan las interacciones entre escalas

Esta visión resalta que los procesos ecológicos no pueden entenderse desde una única escala. Lo que observamos a nivel local depende, en gran medida, de interacciones con procesos que ocurren a otras escalas (Figura 3). Cuando estas conexiones se mantienen, los ecosistemas pueden absorber perturbaciones y reorganizarse; pero si se debilitan –por ejemplo, por pérdida de conectividad o cambios bruscos en el entorno–, el sistema puede volverse más vulnerable y propenso a cambios abruptos.

En este contexto, la **resiliencia** no implica únicamente recuperarse tras una perturbación, sino también mantener la capacidad de adaptación mediante la reorganización de las relaciones entre escalas.

Modelar estas interacciones es un desafío, ya que implica integrar procesos muy diversos sin perder su coherencia. Más que reducir la complejidad, se trata de interpretar cómo interacciones locales pueden generar efectos a gran escala, de modo que se pueda comprender mejor el funcionamiento conjunto del sistema (Levin, 1992; Kéfi y cols., 2016).

La incertidumbre como propiedad intrínseca de los ecosistemas

En los ecosistemas, la incertidumbre no es sólo una limitación de nuestro conocimiento, sino una característica propia de su funcionamiento. La no linealidad, las múltiples interacciones entre componentes y la conexión entre escalas hacen que su comportamiento sea difícil de anticipar con exactitud. Incluso en ausencia de azar, pequeñas diferencias pueden traducirse en trayectorias muy distintas.

Por qué los ecosistemas son inherentemente impredecibles

Durante mucho tiempo, la ecología aspiró a predecir el comportamiento de los sistemas naturales acumulando más datos y desarrollando modelos cada vez más detallados. Sin embargo, los ecosistemas no

Ciclos biogeoquímicos

Circulación natural de elementos como el carbono, el nitrógeno o el fósforo entre los seres vivos, la atmósfera, el suelo y el agua.

Albedo

Proporción de luz solar que refleja una superficie; el hielo y las nubes tienen albedo alto, mientras que bosques y océanos lo tienen bajo.

siguen este ideal de predicción precisa. Pequeñas diferencias en las condiciones iniciales pueden amplificarse con el tiempo, dando lugar a trayectorias divergentes o a cambios bruscos sin señales previas claras (**Figura 4**).

Además, existen límites a la predicción que no pueden superarse simplemente con más información. Los ecosistemas pueden cambiar de estado al cruzar ciertos umbrales, y una vez que lo hacen, no siempre regresan a su situación anterior, incluso si las condiciones originales se restauran. Nuevas retroalimentaciones pueden estabilizar ese estado alternativo, haciendo que el sistema siga una trayectoria distinta.

En este sentido, la historia importa: los ecosistemas no recorren todas las posibilidades, sino que evolucionan siguiendo trayectorias concretas, condicionadas por procesos previos y eventos contingentes. Esto hace que su evolución no pueda anticiparse completamente a partir de reglas generales o condiciones iniciales.

El papel del azar y la autoorganización

En este contexto, el azar no es sólo una fuente de ruido, sino también de innovación. Procesos como la dispersión de especies, las colonizaciones o las fluctuaciones ambientales introducen variabilidad que puede generar nuevas configuraciones ecológicas. Esta dinámica, combinada con procesos de autoorganización, da lugar a sistemas en constante cambio, capaces de adaptarse y reorganizarse.

Lejos de alcanzar un equilibrio estático, muchos ecosistemas funcionan como sistemas dinámicos en continua transformación, donde estabilidad y cambio coexisten. Esta combinación de azar y organización es clave para entender su diversidad y su capacidad de respuesta frente a perturbaciones.

Qué implica esto para la gestión ambiental

Aceptar que la incertidumbre es inherente al funcionamiento de los ecosistemas tiene consecuencias importantes para su gestión (**Figura 4**). En lugar de buscar el control total o predicciones exactas, es más eficaz adoptar enfoques adaptativos, basados en el seguimiento continuo, la flexibilidad y la capacidad de respuesta.

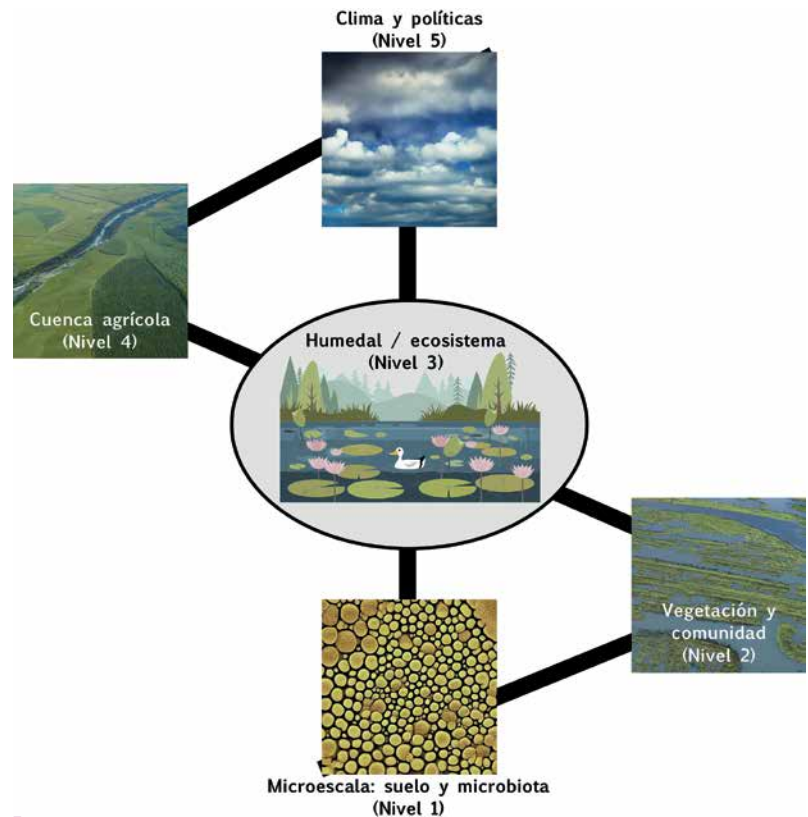


Figura 3. Ejemplo de interacción entre escalas en un ecosistema. En un humedal, procesos locales, como el crecimiento de la vegetación o el flujo de agua, se conectan con dinámicas más amplias, generando cambios que afectan al conjunto del sistema.

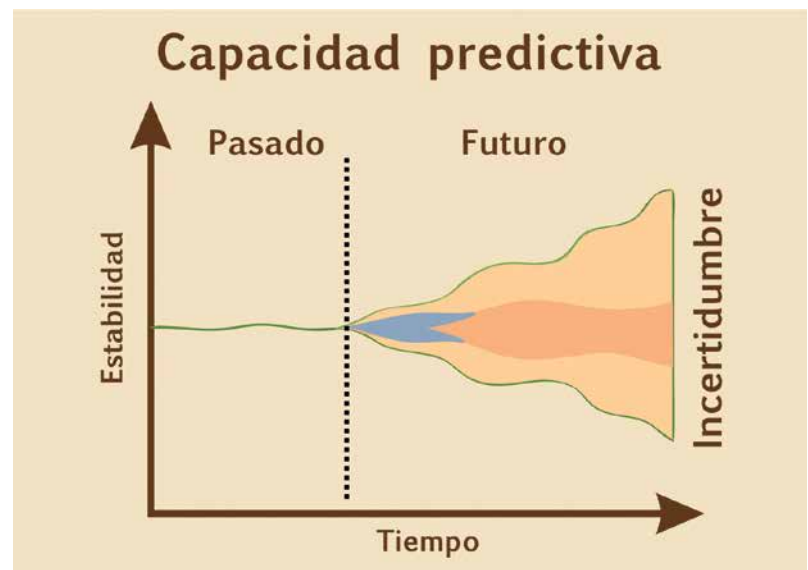


Figura 4. En sistemas no lineales, la capacidad de predicción se reduce con el tiempo. Los ecosistemas pueden seguir distintas trayectorias en función de pequeñas diferencias iniciales, perturbaciones o mecanismos de retroalimentación.

Tabla 1. Cómo difieren los sistemas lineales y no lineales en los ecosistemas.

Característica	Sistemas lineales	Sistemas no lineales
Relación causa-efecto	Relación directa y proporcional.	La respuesta puede ser mayor o menor de lo esperado.
Respuesta al cambio	Gradual y predecible.	Puede ser brusca o inesperada.
Estabilidad	Un único estado estable.	Varios estados posibles bajo las mismas condiciones.
Retroalimentación	Poco relevante o limitada.	Interacciones que pueden estabilizar o amplificar los cambios.
Predictibilidad	Generalmente alta en condiciones simples.	Limitada, especialmente a largo plazo.
Sensibilidad a condiciones iniciales	Baja.	Alta: pequeñas diferencias pueden generar grandes cambios.
Efectos de escala	Poco considerados.	Muy importantes: lo que ocurre a una escala afecta a las otras.
Ejemplos ecológicos	Crecimiento de poblaciones en condiciones simples.	Cambios abruptos en lagos, brotes poblacionales, patrones espaciales.
Modelado	Modelos matemáticos sencillos.	Modelos más complejos con múltiples interacciones.
Implicaciones para el manejo ambiental	Permiten prever resultados con cierta seguridad.	Exigen enfoques flexibles que tengan en cuenta la incertidumbre.

Esto implica trabajar con márgenes de seguridad, fomentar la diversidad, que amplía las posibles respuestas del sistema, y desarrollar sistemas de alerta temprana que permitan detectar cambios antes de que se vuelvan irreversibles. También requiere promover formas de gobernanza más flexibles, capaces de adaptarse a contextos cambiantes.

En última instancia, reconocer los límites de la predicción no supone renunciar al conocimiento, sino utilizarlo de manera más realista. Entender y aceptar la incertidumbre no es sólo un desafío científico, sino también una condición necesaria para tomar mejores decisiones en un contexto de crisis ambiental.

■ **Implicaciones para el entendimiento y manejo de los ecosistemas**

Durante mucho tiempo, la ciencia ha buscado explicar la naturaleza mediante leyes generales y modelos capaces de predecir su comportamiento. Este enfoque ha sido muy exitoso en muchos campos. Sin embargo, los ecosistemas –caracterizados por la no linealidad, la autoorganización y la dependencia de su historia– plantean límites claros a esta forma de entender el mundo.

En este contexto, el conocimiento no puede considerarse una representación completa y definitiva de la realidad, sino una herramienta parcial para

interpretar sistemas en constante cambio. Ningún modelo ni ninguna escala por sí sola puede captar toda la complejidad de un ecosistema, por lo que distintas aproximaciones resultan necesariamente complementarias.

Aceptar esta limitación no implica renunciar al rigor científico, sino utilizarlo de forma más realista. Nos obliga a incorporar la incertidumbre como parte del proceso de conocimiento y a reconocer que nuestras decisiones se basan siempre en información incompleta.

Al mismo tiempo, esta perspectiva abre la puerta a enfoques más integradores. Comprender los ecosistemas requiere no sólo datos y modelos, sino también contextos, valores y formas diversas de interpretar la relación entre sociedad y naturaleza. La ciencia, en este sentido, no es una actividad aislada, sino una práctica situada que forma parte de la manera en que las sociedades entienden y gestionan su entorno.

En un contexto de crisis ambiental, esta visión tiene implicaciones directas: las decisiones no dependen únicamente de evidencia técnica, sino también de cómo interpretamos los riesgos, las incertidumbres y las posibles trayectorias futuras. Integrar diferentes perspectivas y fomentar enfoques más flexibles y participativos puede ayudar a diseñar estrategias de gestión más robustas frente a la complejidad del mundo natural.

Conclusiones

Los ecosistemas no cambian de forma gradual ni predecible. Comprenderlos exige reconocer sus umbrales y aceptar que la incertidumbre forma parte de su funcionamiento. Esto implica replantear cómo actuamos sobre ellos: no desde el control, sino desde la adaptación a su complejidad. Esto requiere combinar el conocimiento técnico con sensibilidad ecológica y responsabilidad ética. Sólo así podremos imaginar políticas que escuchen, en lugar de imponer, los ritmos y umbrales del mundo vivo.

Salvador Sánchez-Carrillo

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España
sanchez.carrillo@mncn.csic.es

David G. Angeler

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
david.angeler@mncn.csic.es

Miguel Álvarez-Cobelas

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
malvarezcobelas@gmail.com



Referencias específicas

- Bonan, G. B. (2008), "Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests", *Science*, 320(5882):1444-1449. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Falkowski, P. G., T. Fenchel y E. F. Delong (2008), "The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles", *Science*, 320(5879):1034-1039. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1153213>.
- Hastings, A., K. C. Abbott, K. Cuddington *et al.* (2018), "Transient phenomena in ecology", *Science*, 361(6406):eaat6412. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.aat6412>.
- Kéfi, S., V. Miele, E. A. Wieters *et al.* (2016), "How structured is the entangled bank? The surprisingly simple organization of multiplex ecological networks leads to increased persistence and resilience", *PLOS Biology*. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002527>.
- Levin, S. A. (1992), "The problem of pattern and scale in ecology", *Ecology*, 73:1943-1967. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/1941447>.
- Scheffer, M., S. R. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke y B. Walker (2001), "Catastrophic shifts in ecosystems", *Nature*, 413:591-596. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/35098000>.
- Walker, B. y D. Salt (2006), *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*, Washington, Island Press.