

Vivir a los saltos



Por Fernando Momo

Caminar por el campo, o por un parque en las ciudades, siempre es una experiencia gratificante. El sonido apagado de los pasos en el pasto, el canto de los pájaros, el viento suave en el rostro.

En nuestra llanura pampeana, en cualquiera de esas caminatas es frecuente encontrarse con una laguna, un estanque, un bañado. En los grandes parques de las ciudades, no es nada raro encontrarse con una laguna artificial. Las lagunas naturales y las artificiales se parecen bastante, salvo por su origen. Tienen poca profundidad, plantas arraigadas cerca de las orillas (juncos, espadañas, totoras), muchas aves que aprovechan sus recursos (patos, cuervillos, garzas, flamencos), peces variados y una profusa vida microscópica (lo que llamamos genéricamente “plancton”, es decir, organismos que flotan).

Sin embargo, la imagen de paz y quietud que nos proporcionan las lagunas es un poco engañosa. En ellas se esconde una especie de trastorno bipolar; una doble personalidad.

Una laguna, un mundo, muchos bichos

Detengámonos un momento en nuestro hipotético paseo y observemos la laguna que nos acabamos de topar. Hay en ella múltiples organismos que los ecólogos clasificamos en grupos ecológicos que llamamos “comunidades”, aunque, en rigor, todos los organismos de la laguna forman una sola comunidad. Pero no nos preocupemos por eso ahora; observemos quiénes forman esas comunidades: en una laguna hay microorganismos flotantes que son capaces de usar la energía del sol y los materiales nutritivos disueltos en el agua para fabricar su propio alimento, es decir, hacen fotosíntesis. A ese grupo lo llamamos fitoplancton. A los organismos del fitoplancton les va muy bien mientras tengan nutrientes en el agua y mientras el viento, que en una laguna mezcla el agua hasta el fondo, los agite y permita que esos nutrientes se vayan renovando al mismo tiempo que la luz les va llegando a todos. En esa situación el fitoplancton se alimenta y reproduce.

Los microorganismos son los responsables de que el agua se ponga verde de vez en cuando. Es que se reproducen tanto que la cantidad enorme de células (suelen ser organismos formados por una sola célula) tiñe el agua de verde (el color de la clorofila).

Sin embargo, no siempre les va tan bien ya que en la laguna hay otros organismos que pueden limitar su crecimiento de dos maneras principales: comiéndoselos (depredación) o usando parte de los nutrientes y la luz que ellos necesitan (competencia).

Los principales depredadores del fitoplancton son otros organismos pequeños (algunos unicelulares y otros multicelulares como pequeños crustáceos) que también flotan en el agua y, aunque pueden nadar pequeñas distancias, son básicamente llevados por el agua, igual que sus presas. Esa comunidad de pequeños depredadores se llama zooplancton y es capaz de mantener bajo control al fitoplancton por el simple hecho de comérselo.

Pero también están otros organismos fotosintéticos que compiten con el fitoplancton porque también necesitan luz y nutrientes. Forman la comunidad de las macrófitas, plantas vasculares adaptadas a la vida en el agua. Las más fuertes competidoras del fitoplancton son las que viven sumergidas en el agua y las flotantes. Las primeras porque, además de consumir los mismos nutrientes que el fitoplancton y taparles parte de la luz, estabilizan el agua y no dejan que el viento la mezcle bien. Las segundas porque hacen sombra. Las lagunas con muchas macrófitas no se suelen poner verdes sino que el agua permanece clara porque hay poco fitoplancton y poco sedimento en suspensión por falta de mezcla.

Y ahora entran en escena unos cuantos grupos de peces. Sin embargo para entender lo que nos interesa (la esquizofrenia de las lagunas), los agruparemos en dos categorías: los peces que comen zooplancton y los peces que comen a esos peces. Está claro que, si hay muchos de los primeros (los que comen zooplancton), habrá poco zooplancton, y como el zooplancton era el que controlaba en parte al fitoplancton, la laguna tendrá más probabilidad de estar verde. Pero si hay muchos de los otros peces (los que comen peces), entonces habrá más zooplancton, menos fitoplancton y tendremos una laguna más clara¹.

Para complicar todavía más este conjunto de relaciones, si hay muchas macrófitas sumergidas, los peces que comen peces tienen refugios desde donde acechar a sus presas y entonces, la presencia de macrófitas sumergidas refuerza aún más la escasez de fitoplancton.

Dos lagunas en una

Hace unos cuantos años, un limnólogo (así se llaman los ecólogos que estudian los sistemas de agua dulce) llamado Martín Scheffer se percató de que un sistema así podía, digamos, “saltar” de un estado a otro a partir de pequeñas variaciones en las cantidades de peces de los dos grupos. El razonamiento que lo llevó a concluir esto incluye modelos matemáticos bastante complejos pero podemos entenderlo sin matemáticas. La figura siguiente muestra el dibujito conceptual del modelo de Scheffer.

¹ Este efecto por el cual la acción de un grupo de organismos se propaga hacia las presas, las presas de sus presas y así sucesivamente se llama “cascada trófica”.

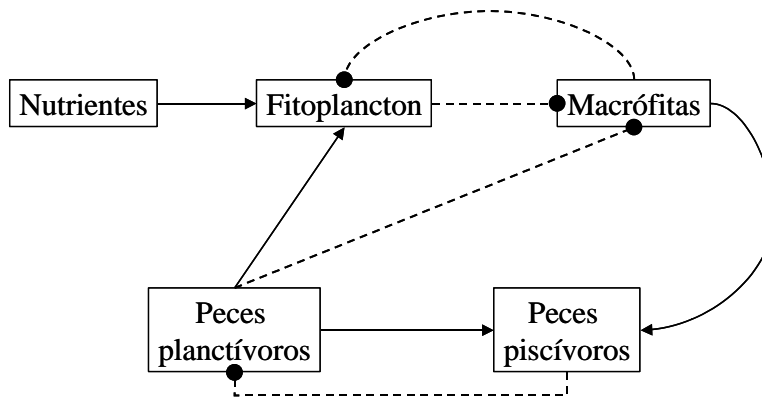


Figura 1: Cada rectángulo simboliza un compartimiento o comunidad; las flechas de línea entera y terminadas en punta normal simbolizan un efecto positivo del compartimiento de donde nace la flecha sobre el compartimiento al que llega; las flechas de línea cortada y terminadas en un círculo negro simbolizan un efecto negativo. Por ejemplo, las macrófitas y el fitoplancton están unidos por sendas flechas con punta redonda, ambas comunidades compiten entre sí y por lo tanto perjudican la abundancia del otro.

Aclaremos algunas cosas: cuando hablamos de nutrientes, nos referimos a las sales minerales (principalmente de nitrógeno y fósforo) que los organismos fotosintéticos necesitan. Observando el dibujo con paciencia, el lector o lectora podrá ver que están representadas las principales relaciones que hemos contado antes. La inspiración de Sheffer fue darse cuenta de un hecho fundamental: algunas de esas relaciones no son lineales, es decir, para ellas no vale la regla de tres simple: no siempre al aumentar en una proporción uno de los compartimientos, el efecto sobre los demás se multiplica por la misma proporción. Aclaremos esto más. Para ello vamos a pensar en un sistema más simple y fácil de imaginar: las cucarachas y nosotros.

Todos sabemos que las cucarachas se reproducen bastante rápido. Supongamos que queremos controlar la población de cucarachas de nuestra cocina a pisotones, entonces, todas las noches nos quedamos de guardia con una linterna y no nos vamos a dormir hasta haber liquidado cinco cucarachas. Si algún amigo entusiasta se ofrece a ayudarnos quizás podamos duplicar nuestro esfuerzo y matar, digamos, diez cucarachas por noche. No exterminaremos a los santos bichitos pero los mantendremos a raya. Los que no mueran bajo nuestros intrépidos pies, se reproducirán en sus nidos, saldrán a pasear en otros horarios y mantendrán la población más o menos estabilizada.

Ahora imaginemos que nos estamos cansando de despertar a nuestra familia con los pisotones y las cosas que inevitablemente nos chocamos y entonces decidimos hacer nuestra tarea noche por medio. Hacer esto equivale a disminuir el promedio de cucarachas asesinadas por noche de 5 a 2,5. Pero hay un problema: no sólo matamos menos, sino que varias de las que matábamos antes ahora viven una noche más. Una noche de lujuria y desenfreno para las cucarachas significa que son más las que se reproducen antes de caer bajo nuestras zapatillas (o chancletas, da igual). Puede suceder que, de golpe, nuestros familiares insectos sufran una explosión demográfica y multipliquen su número desproporcionadamente. Esto puede representarse en un gráfico como el de la figura 2.

La caza de las cucarachas

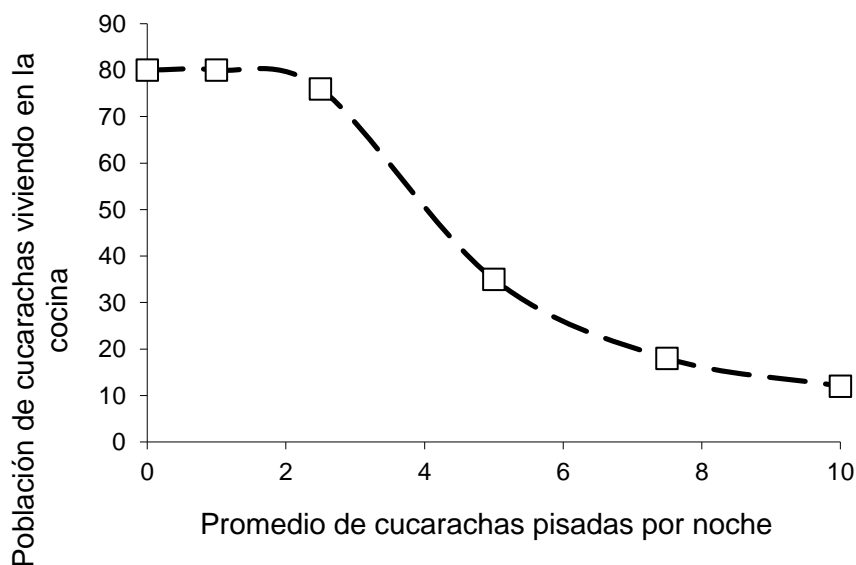


Figura 2: La relación no lineal entre el esfuerzo de pisoteo de cucarachas y su población estable.

Como vemos, la relación entre cucarachas en la población estable y nuestro promedio de caza por pisoteo no es lineal. Si pisamos muy pocas, la población de cucarachas se dispara pero si pisamos todavía menos no crece mucho más la población (uno podría suponer que están limitadas por otras razones como espacio para anidar, cantidad de alimento, etc.). Pisar más y más no hace disminuir el número en forma proporcional tampoco.

Como sea, nuestro amigo Scheffer comprendió que varias de las relaciones entre las comunidades de las lagunas son de tipo no lineal. La consecuencia es la siguiente: pequeños cambios en la abundancia de uno de los grupos pueden producir dramáticos y sorprendentes cambios en la abundancia de otros.

La historia de Scheffer tiene un desarrollo feliz porque él tenía un problema con lagunas que estaban muy verdes y, por lo tanto, eran muy poco atractivas para los paseantes; aplicando su modelo, dedujo que agregar unos pocos peces piscívoros podría llegar a transformar rápidamente a las lagunas verdes en lagunas de aguas claras con muchas macrófitas. Agregó esos peces y adivinen qué: ¡funcionó!

Más adelante se dio cuenta de que esto podía pasar espontáneamente en casi cualquier laguna de clima templado por pequeños cambios en alguno de los compartimientos (entrada de nutrientes, muerte invernal de algunos peces, etc.). Su modelo se hizo famoso, escribió un libro y todo, y convenció a medio mundo científico de que era aplicable en muchos lugares. Se lo conoce como “el modelo de los estados alternativos” de las lagunas.

Pero a nosotros no nos interesa tanto el éxito de Scheffer (aunque lo disfrutamos mucho), sino el hecho de mostrar con él algo que es muy común en la naturaleza: los ecosistemas pueden tener estados alternativos y, eventualmente, pueden pasar de uno a otro por causas casi imperceptibles

o por pequeños cambios en alguna cosa que venía cambiando hace rato pero parecía no producir nada raro.

Profundicemos esto con otro ejemplo:

El oxígeno en los ríos

Los que tenemos el privilegio de vivir cerca de un río o de un arroyo sabemos lo maravilloso que es escuchar el agua que corre, ver transcurrir los días al ritmo de la corriente, disfrutarlos en un día de sol.

Los grandes ríos (como el Paraná, el Amazonas o el Uruguay) tienen, por ser tan grandes, un comportamiento como ecosistemas que es muy autónomo y bastante predecible. Pero los pequeños, ¡ah!, los pequeños son algo impredecibles a veces.

Para ver lo impredecibles que pueden ser comentemos primero algo acerca de una molécula indispensable para tener un arroyo sano: el oxígeno (O_2).

Salvo algunas bacterias, la inmensa mayoría de los seres vivos utilizan oxígeno y lo necesitan como parte del proceso de obtención de energía. Precisamente, la energía se obtiene oxidando ciertos compuestos químicos, principalmente los azúcares. Para mantenerse vivos, los peces, las plantas, los invertebrados, los organismos unicelulares, necesitan obtener oxígeno de su ambiente.

Como el oxígeno se disuelve en agua, y el medio interno de los organismos es acuoso (la mayoría de los organismos somos agua en más de un 90%), es relativamente fácil obtener oxígeno del agua cuando uno vive sumergido en ella. Pero el problema es que el oxígeno disuelto en el agua es más bien escaso si lo comparamos con el disponible en el aire. De hecho el aire tiene un 21 % de oxígeno mientras que en el agua el contenido de ese gas se mide en partes por millón (o miligramos por litro). Eso hace que el contenido de oxígeno en los ríos sea un punto crítico y un indicador muy certero de la “salud” del ecosistema. Tan crítico es que los estudiosos de la vida acuática han encontrado un límite inferior llamado “de protección de la vida acuática” ubicado en 5 miligramos de oxígeno por litro de agua, debajo del cual la supervivencia de la mayoría de los peces, de muchos invertebrados y de las bacterias que necesitan oxígeno (bacterias aerobias), se ve seriamente comprometida.

Pero, ¿cuánto oxígeno hay en un río “normal”? Si bien la cantidad es variable y depende de la temperatura del agua, de la época del año, de la acidez y otros factores, la mayoría de los ríos y arroyos funcionan con concentraciones de oxígeno que están alrededor de 8 miligramos por litro; puede ser menos (hasta seis) o más (diez u once), pero la cantidad no se sale mucho de ese rango.

Ahora bien, en un río pequeño o un arroyo hay muchos procesos que consumen oxígeno y están relacionados con la respiración de diferentes organismos. Uno muy importante es la descomposición de la materia orgánica, proceso ligado a la respiración de las bacterias y hongos. Si un río se contamina con materia orgánica en gran cantidad (por ejemplo efluentes cloacales) la cantidad de oxígeno disuelto que tiene comienza a bajar porque el consumo supera a la producción por fotosíntesis y a la recuperación por intercambio con la atmósfera.

Y en este conjunto de procesos aparecen, una vez más, los saltos.



Figura 3: El mismo arroyo en tres momentos: Diciembre de 2010 (izquierda); Enero de 2011, centro; Febrero de 2011, derecha.

De a poco y de golpe

Imagine que usted trabaja al lado del río como encargado de una planta depuradora cloacal que no funciona del todo bien y, por lo tanto, arroja al río un efluente que no está totalmente depurado (o sea, todavía tiene una cierta cantidad de materia orgánica que se puede descomponer). A usted le toca decidir cuánto de ese efluente se vuelca al río por día (sí, ya sé que no es el mejor trabajo del mundo), y para decidirlo en forma responsable, usted mide periódicamente el oxígeno disuelto en el río para ver cómo se las arregla con lo que usted le tira.



Digamos que si el caño que vuelca los efluentes está acá, usted mide el oxígeno en agua en este



mismo punto del río y también aguas abajo, siguiendo la corriente, un kilómetro más allá y tres kilómetros más allá. Esto es importante porque también nos da una idea de hasta dónde llega el efecto de la contaminación. Antes de comenzar a arrojarle los residuos cloacales el agua del río tiene una concentración de oxígeno, en promedio, de unos 10 miligramos por litro. Entonces empieza el vertido. El río o, mejor dicho, los organismos que viven en

él, sobre todo los descomponedores (bacterias y hongos) comienzan a alimentarse de esta nueva fuente de energía que es la materia orgánica que le arrojamos. O sea que la consumen, transformándola en compuestos químicos simples, entre ellos dióxido de carbono, y durante ese proceso, los descomponedores consumen oxígeno. Ahora la concentración de oxígeno del agua se hace menor debido a ese consumo. Probablemente, después de uno o dos meses de volcar todos los días un caudal constante de desechos cloacales (suponiendo que es un caudal pequeño con respecto al caudal del propio río), la concentración de oxígeno sea de 8 miligramos por litro cerca de la planta, 8,5 a un kilómetro y, digamos, 9,5 a tres kilómetros; ¿qué nos dice esto? En primer lugar nos indica que hay un “impacto” del vertido sobre el funcionamiento del ecosistema (ahora respira más y hay menos oxígeno disponible para todos los organismos que lo necesitan); pero también nos dice que el río se las va arreglando bien con la cantidad de desechos que le arrojamos: en unos pocos kilómetros casi recupera sus valores de oxígeno normales.

Entonces usted, entusiasmado por esas noticias, decide ampliar el servicio cloacal sin preocuparse por mejorar el funcionamiento de su planta depuradora y arrojar un poco más de desechos al río. Supongamos que, por prudencia, sólo un diez por ciento más. Uno o dos meses después, mide la concentración de oxígeno en el agua y descubre que los valores promedio son ahora 7,6, 8 y 8,1 miligramos por litro. ¡Usted da un salto de alegría! La conclusión (expresada en lenguaje futbolero) es que el río se la banca. Vamos por otro diez por ciento y la historia se repite; las concentraciones bajan un poquito pero sin llegar al nivel de riesgo: 7, 7,2 y 7,3 miligramos por litro.

Usted piensa “si hasta acá me fue bien, no tengo por qué cambiar de política; si me paso, siempre tendré tiempo de retroceder y bajar la cantidad de efluentes”; entonces dispone aumentar otro diez por ciento.

¡Sorpresa! Mortandad masiva de peces, primera plana de los diarios, olor a podrido en el río, manifestaciones en la puerta de la planta depuradora, movileros de los programas de noticias por toda la ciudad. Al medir el oxígeno nos encontramos con valores de 2 miligramos por litro en los tres puntos de control. ¿Se acuerda del límite de protección de la vida acuática? Pero, ¿qué pudo haber pasado si lo único que hicimos fue repetir lo que habíamos venido haciendo antes? ¿Por qué un aumento similar de la cantidad de desechos no provocó un efecto proporcional ahora? Pero la cosa se pone peor.

Alarmado y preocupado por lo que acaba de pasar, usted da la orden de disminuir el vertido nuevamente y, para que el río se recupere más rápido, lo hace bajar en un veinte por ciento de su valor actual. A los quince días (está un poco ansioso) vuelve a medir y, nueva sorpresa, los valores siguen clavados en 2 miligramos por litro, el olor a podrido no disminuyó, los peces que vienen nadando desde las cabeceras del río quedan muertitos y flotando panza arriba en el río. ¿Qué está pasando?

Otra vez las catástrofes

Lo que estamos viendo es (como en el caso del desarrollo embrionario que contamos en la EU!! número 2) un fenómeno de catástrofe. No en el sentido coloquial del término, sino en un sentido algo más técnico: un cambio proporcional a los anteriores en una variable (la cantidad de efluente arrojada al río) produce un cambio brusco y desproporcionado en la variable de respuesta (el

oxígeno disuelto); y al querer volver hacia atrás, nos encontramos con que el sistema no responde de manera reversible.

Lo que ha sucedido ecológicamente es que las concentraciones de oxígeno se tornaron muy bajas para mantener a las bacterias y los hongos aeróbicos y entonces, fueron reemplazados por descomponedores anaeróbicos (que no necesitan oxígeno). Éstos últimos también descomponen la materia orgánica pero con mucha menos eficiencia. Además, las concentraciones bajas de oxígeno en el agua provocaron la muerte de muchos organismos (no sólo los peces que vimos) y sus restos aumentan la cantidad de materia orgánica acumulada. Las condiciones de vida han cambiado y favorecen a otros organismos y a una nueva comunidad; el río ha pasado a un nuevo estado, caracterizado por una putrefacción permanente, emisión de gases con mal olor (como el sulfuro de hidrógeno con olor a huevo podrido) y otros sin olor (como el metano), acumulación de materia a medio descomponer, ausencia de algas fotosintéticas (las que podrían producir oxígeno), ausencia de peces, aguas turbias, presencia de muchas larvas de insectos que viven en el agua respirando aire, etc.

Desde un punto de vista más abstracto lo que ocurrió es que el sistema ha pasado de un estado estable a otro, que es diferente (y para nosotros indeseable) pero estable también. Esto está representado en la figura 4.

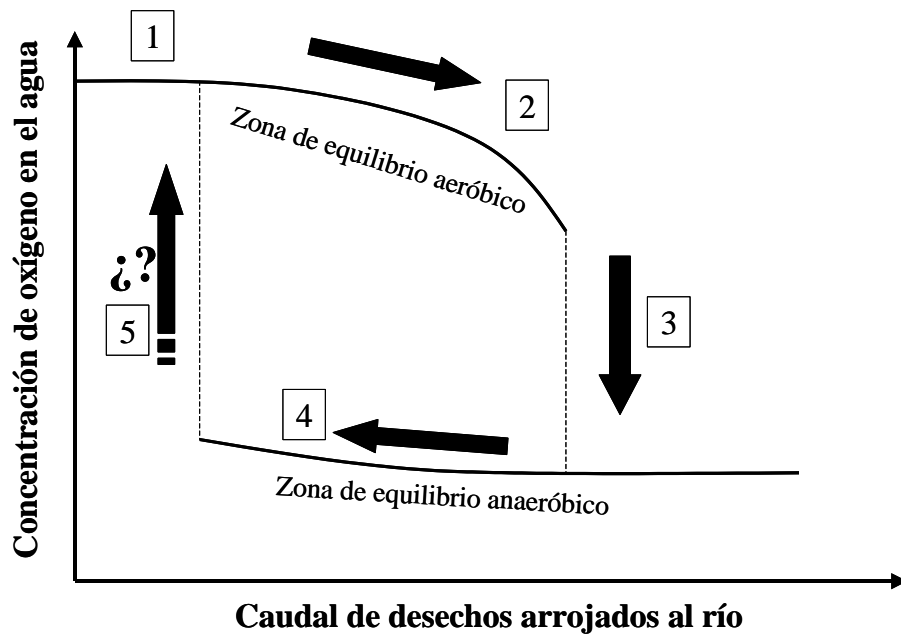


Figura 4: Mapa de la dinámica de nuestro río en relación con el caudal de desechos que recibe. Véase la explicación en el texto.

La figura 4 es un mapa, pero en lugar de coordenadas espaciales como latitud y longitud, tiene como coordenadas dos variables que tienen que ver con el funcionamiento del sistema; una es el oxígeno contenido en el agua que es la variable de respuesta del río ante la otra variable, el caudal

de desechos arrojados a él. En este mapa, las líneas llenas representan estados de equilibrio del sistema, o sea, combinaciones de las dos variables en las cuales el sistema permanece por sus propios mecanismos de regulación. Las líneas de puntos delimitan el intervalo de caudales de desechos para el cuál son posibles dos equilibrios estables, uno con mucho oxígeno en el agua (el superior, equilibrio aeróbico) y otro con muy poco oxígeno (el inferior, equilibrio anaeróbico).

En este mapa podemos seguir la evolución del sistema que describimos antes. Al principio el río empieza a recibir muy pocos desechos y se mantiene con concentraciones altas de oxígeno (punto 1); a medida que el caudal de desechos aumenta, nos desplazamos hacia la derecha sobre el equilibrio aeróbico, siguiendo la flecha hacia el punto 2. En un determinado momento el caudal de desechos alcanza un valor crítico y la concentración de oxígeno cae de golpe (flecha descendente, punto 3). El río alcanza entonces un equilibrio estable anaeróbico. Si ahora disminuimos el caudal de desechos (nos movemos hacia la izquierda), la concentración de oxígeno no vuelve a subir sino que se mantiene baja en la zona de equilibrio anaeróbico (punto 4). Eventualmente, cuando el caudal de desechos disminuye mucho, es posible que el río se recupere y vuelva al equilibrio aeróbico; esta posibilidad está representada con la flecha ascendente (punto 5).

Debemos hacer notar que el ecosistema recorre el mapa siguiendo una trayectoria cuando los desechos aumentan paulatinamente, pero después que se produce el salto brusco, si variamos el caudal en sentido contrario, el sistema recorre el mapa por otra trayectoria diferente. O sea que no se comporta de manera reversible. Este fenómeno de doble camino o trayectoria, uno de ida y otro de vuelta, se conoce como histéresis y es característico de muchos sistemas ecológicos sometidos a algún factor de estrés.

Este problema nos ilustra sobre dos cosas. La primera es que la naturaleza suele darnos sorpresas porque sus estados de equilibrio son múltiples y no siempre es fácil predecir cuándo y por qué va a pasar de uno a otro. La segunda es que los ecosistemas no se comportan siempre de forma reversible, o sea que no es posible “volver por donde fuimos” en un proceso de cambio; si presionamos los sistemas ecológicos ya sea contaminándolos o sobreexplotándolos, sin querer podemos alcanzar los puntos de salto y producir cambios que no es posible revertir dejando de contaminar o dejando de explotar. La historia humana nos da muchos ejemplos de estos fenómenos: desertificación de zonas que fueron selváticas, sobreexplotación pesquera, degradación de lagos, ríos o mares, y sigue la lista. Recientemente algunos ecólogos han especulado sobre la posibilidad de que la biosfera entera esté a punto de sufrir una transición brusca hacia un nuevo estado estable con una biodiversidad mucho menor y, quizás, una población de Homo sapiens muy pequeña. Por ahora, esto último es sólo teoría, pero no está mal saber que no es teoría descabellada.

Para saber más:

Marten Scheffer y Erik Jeppesen. 2007. Regime Shifts in Shallow Lakes. *Ecosystems*, 10: 1–3.

Marten Scheffer y Egbert H. van Nes. 2007. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 584:455–466.

Marten Scheffer, Steve Carpenter, Jonathan A. Foley, Carl Folke y Brian Walker. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. Vol 413: 591-596.