



CEU

*Universidad
San Pablo*

Apertura Curso Académico 2011-2012

Biodiversidad: complejidad, valor y orden en la naturaleza

Agustín Probanza Lobo

Departamento de Biología, Facultad de Farmacia.
Universidad CEU San Pablo

Biodiversidad: complejidad, valor y orden en la naturaleza

Agustín Probanza Lobo

Departamento de Biología, Facultad de Farmacia.
Universidad CEU San Pablo

Universidad CEU San Pablo

Biodiversidad: complejidad, valor y orden en la naturaleza

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© 2011, Agustín Probanza Lobo

© 2011, Fundación Universitaria San Pablo CEU

CEU *Ediciones*

Julián Romea 18, 28003 Madrid

www.ceuediciones.es

Depósito legal: M-36477-2011

Después dijo Dios: Produzca la tierra hierba verde, hierba que dé semilla; árbol de fruto que dé fruto según su género, que su semilla esté en él, sobre la tierra. Y fue así. Produjo, pues, la tierra hierba verde, hierba que da semilla según su naturaleza, y árbol que da fruto, cuya semilla está en él, según su género. Y vio Dios que era bueno.

Dijo Dios: Produzcan las aguas seres vivientes, y aves que vuelen sobre la tierra, en la abierta expansión de los cielos. Y creó Dios los grandes monstruos marinos, y todo ser viviente que se mueve, que las aguas produjeron según su género, y toda ave alada según su especie. Y vio Dios que era bueno. Y Dios los bendijo, diciendo: Fructificad y multiplicaos, y llenad las aguas en los mares, y multiplíquense las aves en la tierra. Y fue la tarde y la mañana el día quinto. Luego dijo Dios: Produzca la tierra seres vivientes según su género, bestias y serpientes y animales de la tierra según su especie. Y fue así. E hizo Dios animales de la tierra según su género, y ganado según su género, y todo animal que se arrastra sobre la tierra según su especie. Y vio Dios que era bueno.

Entonces dijo Dios: Hagamos al hombre a nuestra imagen, conforme a nuestra semejanza; y señoree en los peces del mar, en las aves de los cielos, en las bestias, en toda la tierra, y en todo animal que se arrastra sobre la tierra.

Génesis, 1:11-12 y 20-26

A mi familia y a los amigos de verdad.

Excmo. Sr. Gran Canciller de la Universidad,

Excmo. y Magfco. Sr. Rector,

Ilmo. Sr. Director General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid,

Excmos. y Magfcos. Sres. Rectores y Rectores Honorarios,

Excmos. e Ilmos. Sres. Patronos de la Universidad, miembros del Consejo de Gobierno, Directivos de la Fundación Universitaria San Pablo CEU, y miembros de la Asociación Católica de Propagandistas,

Dignísimas Autoridades eclesiásticas, académicas, civiles y militares,

Compañeros del Claustro de Profesores,

Personal de Administración y Servicios,

Queridos alumnos,

Señoras y Señores.

Permítanme, en primer lugar, reiterar mi gratitud al Sr. Rector por haberme encomendado el inmerecido honor de dirigirme a ustedes en este acto de apertura de curso, para impartir esta lección (que no se si será magistral) pero que espero sea entretenida para todos, ilustrativa para muchos y suficientemente rigurosa para algunos.

Es un honor inmerecido por muchas razones, entre las que destaco, que hay en mi Facultad (a la que toca por turno dictar esta lección) profesores mucho más conspicuos curricular y académicamente que quien les habla, razón por la que decía antes que espero que encuentren mi parlamento suficientemente riguroso.

Gracias Rector por esta oportunidad, que además me ha servido para hacer una buena revisión de una parte de mi disciplina, bastante arrinconada durante unos años por haber tenido que atender a otras obligaciones en nuestra querida Universidad. El reencuentro, en este sentido, ha sido muy dulce.

El pasado 2010 ha sido el *Año Internacional de la Biodiversidad*, haciéndolo coincidir con el bicentenario del nacimiento de Charles Darwin (12 de febrero de 1809-19 de abril de 1882), cuyo libro sobre *el origen de las especies por la selección natural* (1859) marca en buena medida el arranque de una parte de la Ecología y de la Biología Evolutiva que es el estudio de la Biodiversidad. Adicionalmente, después de la *Conferencia de las Partes* de la Convención sobre la *Diversidad Biológica*, que tuvo lugar en Nagoya, en octubre de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas, proclamó en su resolución 65/161, al período 2011 a 2020 cómo *Década de la Biodiversidad*.

Darwin y su teoría dieron un nuevo enfoque y sentido a la biología en su conjunto, y podemos decir que, con la teoría celular (1838), cuyos co-autores fueron Matthias Schleiden y Theodor Schwann orientan lo que será la biología del siglo XX. Con la teoría de Darwin (que alberga en si cinco teorías¹) se aporta una explicación plausible a asuntos tales como las sutiles diferencias entre especies similares, los coloridos plumajes de aves y flores, las numerosas adaptaciones de los animales a su entorno, y los fracasos, reflejados en los fósiles. Todo ello, que puede parecer superficial, implica y explica aspectos basales de la vida. La obra de Darwin, conjugada con la citada teoría celular y con las *Leyes de Mendel* (del Agustino Gregor Mendel, 1822-1884) que definen las leyes básicas de la herencia genética, son una semilla de la que germina la biología moderna, y de la que, como una hilera de fichas de dominó, se desprenden con una imparable secuencia de descubrimientos fundamentales que van desde el del ADN, a la genómica moderna. Los 150 años que distan desde la publicación de *El origen de las especies* han estado cuajados de una plétora de hitos que han ido definiendo una nueva ciencia biológica, la Ecología, que se ocupa (entre otras cosas) de estudiar las bases del funcionamiento de la biosfera, atendiendo a todos los niveles organizativos de la vida, desde moléculas a organismos y ecosistemas. También la Ecología se ocupa de analizar el papel de la diversidad de seres vivos que, el curso de la evolución han aparecido y en el equilibrio dinámico de la naturaleza. En los últimos tiempos, esta joven ciencia está traspasando las fronteras del conocimiento para profundizar, en un momento de crisis aguda, en el pilar sobre el que se asienta el bienestar presente y futuro de la humanidad.

¹ Hoy en día, lo que Darwin denominaba *mi teoría*, son un realidad 5 teorías independientes: *Teoría de la evolución (propriadamente dicha)*, *Teoría de la ascendencia común*, *Teoría del gradualismo*, *Teoría de la multiplicación de las especies (especiación)* y *Teoría de la selección natural*.

Esta lección la iniciaremos con una revisión de dos conceptos, muchas veces confundidos: *Diversidad Biológica* y *Biodiversidad*. Seguidamente nos centraremos en la segunda, para hacer un balance de *la biodiversidad actual de la biosfera*, en los diferentes grupos biológicos, y en su *historia*, cómo ha fluctuado la desde el origen de la vida. Ulteriormente analizaremos algunos de los *valores y metavalores de la biodiversidad*, tanto desde el punto de vista más naturalístico y científico como desde los enfoques más aplicados y pragmáticos. Seguidamente, analizamos las *causas de la actual pérdida de biodiversidad*, su efecto en la biosfera y consecuencias. Finalizamos, abordando la emergente ciencia de la *Biología de la Conservación*, esa joven hija de la Ecología, que trata de ayudar a conocer los fundamentos científicos para mantener la Creación que nos ha sido encomendada.

Diversidad Biológica y Biodiversidad

Los grandes naturalistas viajeros² de los siglos XVII, XVIII y XIX centraron buena parte de su trabajo en la elaboración más o menos sistemática de catálogos florísticos o faunísticos de los lugares que visitaban en sus expediciones, usualmente financiadas por la Corona de sus países, por sociedades científicas, por mecenas, o por ellos mismos. Esta labor, cuyo eje vertebrador y centro gravitacional fue el enciclopedismo de la Ilustración, se traduce desde nuestro punto de vista actual, en una de las dos posibles vías para la caracterización de ecosistemas o de zonas biogeográficas más extensas: *la composición cenótica a nivel de especie*. Es esta, la que bautizase McIntosh (1967)³ como *species richness* (riqueza de especies) y que en 1988, E.O. Wilson⁴ (en un congreso sobre desaparición de especies) re-bautizase con su definitivo (y descriptivo) nombre de *Biodiversidad*.

Junto a este término tenemos el de *Diversidad Biológica*, más complejo que el anterior y que lo asume como parte de él. Simplificando, podemos decir que la diversidad biológica comprende no solo la variedad o riqueza de especies (la biodiversidad) sino también *el peso que tiene cada uno de los componentes del sistema (especie) en el conjunto*. Es la diversidad biológica por tanto, una medida de *la heterogeneidad y de la complejidad* de un sistema (de un ecosistema) en términos de sus componentes bióticos.

² Por citar algunos, dejándonos muchos: Jean-Baptiste Lamarck, Alexander Von Humboldt, Georges Louis Leclerc (conde de Buffon), o los españoles Antonio José Cavanilles o José Celestino Mutis.

³ Robert P. McIntosh. (1967). An Index of Diversity and the Relation of Certain Concepts to Diversity. *Ecology*, 48 (3): 392-404.

⁴ Wilson, E.O. (Ed.). (1988). *Biodiversity*. National Academy of Sciences/Smithsonian Institution

Ramón Margalef López (1919-2004) fue el primer Catedrático de Ecología de España (en 1967) y junto también Catedrático y ecólogo terrestre Fernando González Bernaldez (1933-1992) impulsaron la disciplina en nuestro país. Ambos fueron artífices de la génesis de dos fuertes escuelas (a veces falsamente enfrentadas) de ecología acuática y terrestre, respectivamente. Margalef, además de su abundante producción científica en ecología litoral y pesquerías, cultivó fuertemente la ecología teórica y numérica, de modo singular todo lo que pivota entorno a la diversidad biológica. En este ámbito fue pionero no solo en España, sino referente en el panorama internacional.

En 1956 Margalef publica⁵ un trabajo en el que sienta las bases del uso de la *teoría de la información* para el análisis de la diversidad, como pone más tarde de manifiesto su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona⁶. Ulteriormente su producción científica en este ámbito crece⁷, tanto en aspectos aplicados (ecología acuática, comunidades planctónicas) como en aspectos más teóricos (orden y caos, teoría de sistemas, termodinámica, organización espacial, etc.). Es precisamente en este contexto dónde Ramón Margalef hace un muy didáctico diferencial entre Biodiversidad y Diversidad Biológica:

La Biodiversidad es el diccionario que utiliza la vida para constituirse en unidades funcionales (células, individuos, poblaciones, comunidades, ecosistemas... la diversidad es: lenguaje basado en ese diccionario y que varía según las condiciones bióticas y abióticas.

Esta comparación margalefiana nos permite entender (un isomorfismo lenguaje-diversidad) como los diferentes ecosistemas se articulan funcional y estructuralmente con elementos muy variados (organismos) que dan sentido a la globalidad, no solo por *cuales* elementos lo componen, sino también por *cuantos* elementos intervienen, o las proporciones de estos. En este contexto queda claro que tras la complejidad de los sistemas naturales hay un orden, que (como pondremos de relieve ulteriormente) es vertebrador de los ecosistemas y de la biosfera en su conjunto. Llegados a este punto resulta interesante indicar como *la diversidad subyace en todos los niveles organizativos de la vida*, desde la escala genética y molecular, a la de las especies y de los ecosistemas. Así,

⁵ Margalef, R. (1956). Información y diversidad específica en las comunidades de organismos. *Inv. Pesq.* 3: 99-106.

⁶ Margalef, R. (1957). La teoría de la información en ecología. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, XXXII (13). Barcelona.

⁷ Una revisión pormenorizada en: Flos, J. (2005). El concepto de información en la ecología Margalefiana. *Ecosistemas* 14 (1): 7-17.

es posible ver en la literatura ecológica (más últimamente y con frecuencia creciente) referencias a *otras diversidades*, conceptualmente análogas a la biológica, pero que atienden al *acervo genético de cada especie*, conseguido tras millones de años de evolución y de los diferentes ecosistemas de los que forman parte. Así, se habla de *Diversidad Genética*, *Diversidad de Especies* (Diversidad Biológica *stricto sensu*) y *Diversidad de Ecosistemas*, acompañadas (muy recientemente por *la Diversidad Molecular*⁸, “cocinada” al fuego de las *ómicas* (genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica) y las *meta-ómicas*.

Del mismo modo que Margalef propuso un algoritmo matemático para cuantificar la diversidad biológica en base a la teoría de la información, lo propio hicieron muchos otros autores (del ámbito de la ecología y de fuera del mismo) en la porción central del pasado siglo. Numerosos científicos⁹ desarrollaron índices para el cálculo de la diversidad biológica. Estos índices se pueden cifrar en más de 130 aproximaciones matemáticas, que combinan el marco de la probabilidad o de la combinatoria con una función monótona que reúne los dos componentes: variedad de especies y número de individuos de cada especie. Esta pléyade de índices de diversidad revela dos hechos. De una parte el interés e importancia científica de cuantificar y valorar la complejidad de sistemas a través de índices, tanto por su valor intrínsecamente descriptivo, cuanto como elemento para valorar su evolución temporal o las oscilaciones derivadas de perturbaciones del sistema, por citar dos. De otra parte revela un curioso isomorfismo entre la forma de hacer ciencia (en este caso ecología) y los ecosistemas: hay variedad de algoritmos, como variedad de formas de vida (biodiversidad) porque esta maximiza las posibilidades, en ambos casos de persistir en el tiempo y de tener más *fitness* competitivo que otros.

⁸ Jianping Xu (2010). Metagenomics and Ecosystems Biology: Conceptual Frameworks, Tools, and Methods. In: Metagenomics: Theory, Methods and Applications. Edited by: Diana Marcox 212 pp., 2010. Caister Academic Press

⁹ Referenciamos a continuación algunos, a modo de ejemplo:
Alatalo, R.V. 1981. Problems in the Measurement of Evenness in Ecology. *Oikos*, 37: 199-204.
Heip, C. 1974. A New Index Measuring Evenness. *Journal of Marine Biological Association*, 54:555-557.
Hill, M.O. 1973. Diversity and Evenness: a Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology*,54: 427-432.
Hurlbert, S.H. 1971. The Nonconcept of Species Diversity: a Critique and Alternative Parameters. *Ecology*, 52 (4): 577-586.
Margalef, R. 1958. Information Theory in Ecology. *General Systematics*, 3: 36-71.
Menhinick, E.F. 1964. A Comparison of some Species-Individuals Diversity Indices Applied to Samples of Field Insects. *Ecology*, 45 (4): 859-861.
Peet, R.K. 1975. Relative Diversity Indices. *Ecology*, 56: 496-498.
Pielou, E.C. 1969. *An Introduction to Mathematical Ecology*. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, 285 p.
Shannon C.E. and W. Weaver. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. University Illinois Press, Urbana, IL.
Sheldon, A.L. 1969. Equitability Indices: Dependence on the Species Count. *Ecology*, 50: 466-467.
Simpson, E.H. 1949. Measurement of Diversity. *Nature*, 163: 688.

Finalizamos este epígrafe con una mirada al origen del concepto de diversidad biológica, que (como no podía ser de otro modo) se une al concepto de biodiversidad. Uno de los primeros autores en prestar atención no sólo a la *variedad de especies* de un sistema, sino también a la abundancia de cada una, fue el botánico danés Christen Christiansen Raunkiaer (1860-1938). Aunque este autor es conocido fundamentalmente por su clasificación de biotipos o formas biológicas de las plantas con flor¹⁰ (el sistema de Raunkiaer), también trabajó en flora y vegetación. En este último ámbito, fue el primero en notar que cuando en un ecosistema se analizaba su composición florística y se atendía a la cantidad de especímenes (frecuencia) de las diferentes especies presentes en la muestra, se encontraba que había siempre unas pocas especies representadas por muchos individuos, y muchas especies representadas por pocos individuos. Esta regularidad, representada gráficamente poniendo en ordenadas el número de especies, y en abscisas en número de individuos, da lugar a una rama de parábola. A partir de ahí, una revisión de cualquier trabajo realizado sobre cualquier grupo taxonómico, en prácticamente cualquier ecotopo retorna una representación gráfica como la descrita por Raunkiaer¹¹. Lo descrito fue el origen de una línea de trabajo tomada en principio por ecólogos americanos en la década de los 40s del pasado siglo y que condujo a la gran expansión de algoritmos, trabajos y teorías en torno a la diversidad biológica, que se continúan hasta la actualidad.

El árbol de la Vida. Biodiversidad

El naturalista sueco Carlos Linneo (1707-1778) es, en la historia de la biología, y en concreto en esta parte que estamos abordando de la biodiversidad, piedra angular, o al menos, firme cimiento. La aportación de Linneo fue el establecimiento de una base de reglas, criterios y nomenclatura para *ordenar* los seres vivos conocidos¹². Este sistema adopta, una sistematización jerárquica de las estirpes, agrupándolas por afinidades (entonces de orden morfológico, por similitudes) y deota de una nomenclatura para las especies, géneros,

¹⁰ Raunkiaer, C. (1934) *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography*, being the collected papers of C. Raunkiaer. Oxford University Press, Oxford. Reprinted 1978 (ed. by Frank N. Egerton), Ayer Co Pub., in the "History of Ecology Series".

¹¹ Vease por ejemplo el caso de comunidades de algas bentónicas e ictiofauna del trabajo Rodríguez-Olarte, et al. (2006). Los peces y su conservación en el río Tocuyo, la cuenca andina de la vertiente Caribe en Venezuela. Memoria, 66 (165):33-62.

¹² Carl Von Linné. *Systema naturae* (1735-1770) [*Systema naturae per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis*], con 13 ediciones corregidas y aumentadas.

familias, ordenes (en definitiva para los diferentes taxones) creando una disciplina aparentemente instrumental, pero vital para las ciencias naturales: *la taxonomía*. Linneo estructuró primero lo que le era más familiar (la botánica) pero amplió su trabajo hacia la zoología, incluyendo esta a partir de la décima edición de su *Systema naturae*.

Toda la labor recopilatoria de la biodiversidad hecha por los naturalistas viajeros a los que se ha hecho referencia anteriormente, se vio facilitada en el orden organizativo con los instrumentos que la taxonomía linneana ponía a su disposición. De hecho, la existencia de una metodología taxonómica fue (sin duda alguna) otro agente facilitador de ese incremento en el conocimiento de la naturaleza, de su biodiversidad en los siglos XVIII y XIX. Pese a la bondad del marco y método taxonómico, las herramientas de sistemática empleadas, se fundamentaban en aspectos morfológicos de los especímenes que no necesariamente acertaban a la hora de generar grupos con cohesión interna. Las clasificaciones se hacían por *parecido morfológico*, y no por *parentesco evolutivo*, lo que daba lugar a que taxones sin relación filogenética apareciesen en aquellas taxonomías como muy próximos. Pero no podía ser de otro modo: no había aun un cuerpo teórico sobre evolución y filogenia.

La génesis de la *sistemática filogenética* y consecuentemente del inicio de una taxonomía basada en parentesco evolutivo, no se produce hasta que en 1859 se publica el libro de Charles R. Darwin “*El origen de las especies por medio de la selección natural [o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida]*”. El marco de observaciones y fundamentos empíricos de este libro se fraguó durante bastantes años tras el viaje del naturalista a bordo del *HMS Beagle*, entre 1831 y 1836. El fundamento conceptual de la teoría es realmente una co-autoría en la que intervino también el naturalista Alfred Rusell Wallace (1823-1913). De hecho se hizo la presentación conjunta de la teoría en la Sociedad Linneana de Londres el 1 de julio bajo el título *Sobre la tendencia de las especies a crear variedades, así como sobre la perpetuación de las variedades y de las especies por medio de la selección natural*. Esta presentación se estructuró con dos artículos independientes: el manuscrito de Wallace, y un extracto del no publicado del ensayo de Darwin, escrito en 1844. A esta presentación no asistió Darwin, que acompañaba a una de sus hijas gravemente enferma de escarlatina.

Más allá de los descritos vericuetos históricos de aquellos notables naturalistas, la conjunción del sistema linneano de taxonomía (en continua evolución y mejora, que aun sigue en nuestros días) y las bases de la biología evolutiva y la filogenia

permiten establecer los primeros *árboles filogenéticos*. En estos, se establece gráficamente, con una morfología dendrítica, arborescente, las relaciones de parentesco evolutivo (es decir las relaciones filogenéticas) entre diferentes taxones.

A fin de dar una panorámica de como ha evolucionado en la ciencia filogenética los llamados *árboles de la vida*, abordamos a continuación tres de los numerosos intentos organizativos de la variedad de seres vivos del planeta.

Uno de los primeros intentos de construcción de un árbol de la vida¹³, lo debemos al naturalista alemán Ernest Haeckel (1834-1919). Este científico fue el gran impulsor de las teorías de Darwin y Wallace en Alemania, aunque su punto de vista evolucionista aceptaba muchas de las ideas al respecto propuestas por Lamarck¹⁴. En este árbol Haeckel representa la biodiversidad organizada en tres grandes unidades taxonómicas denominadas *reinos*, que albergan de una parte a animales, por otra a las plantas¹⁵ y en una tercera las protistas. Desde la perspectiva de cualquier lego en materia biológica es un árbol intuitivo, al discriminar taxones claramente diferentes entre si (animales y plantas), y meter en un saco de *incertae sedis* de los protistas, a aquellos organismos que por rasgos morfológicos (su tamaño minúsculo, sin ir más lejos) y sin herramientas moleculares o de microscopía no pueden dilucidarse si caben o no en los otros dos reinos.

El devenir de más información (registro fósil, datos nuevos de biodiversidad, tecnologías emergentes para estudios moleculares y microscópicos), propicia que (tras muchos otros modelos en casi un siglo) se establezca en 1969¹⁶ un nuevo árbol de la vida por el ecólogo vegetal y algólogo estadounidense Robert H. Wittaker (1920-1980). En este nuevo modelo, se propone una estructura filogenética de cinco reinos: los tres ya definidos en el árbol de Haeckel (esto es animales, plantas y protistas), mas dos nuevos: el reino de los hongos y el reino mónera. Simplificando mucho, podemos decir que estos dos *nuevos* reinos recogen taxones que o bien no se conocían hacia un siglo (por ejemplo todas las bacterias, reino mónera) o bien organismos cuya biología no era completamente conocida, como es el caso de los hongos, organismos eucariotas que *comparten*

¹³ Haeckel, E. H. P. A. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen : allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von C. Darwin reformirte Decendenz-Theorie*. Berlin.

¹⁴ Lamarck, Jean Baptiste (1809). *Philosophie zoologique*. [En castellano: *Filosofía zoológica*. F. Sempere y Compañía Editores (F. Sempere y V. Blasco Ibáñez). Col. Biblioteca filosófica y social. 262 págs. Valencia, ca.1910. (Edición facsimilar de Editorial Alta Fulla - Mundo científico. Barcelona, 1986)]

¹⁵ Estos reinos (sin tal nombre de categoría taxonómica) se reconocían como entidades diferenciadas desde Aristóteles.

¹⁶ Whittaker, R.H. (1969). *New concepts of kingdoms or organisms. Evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms*. *Science*, 163: 150-160.

características con los animales y con plantas. En definitiva, el modelo de árbol de la vida de Wittaker asume de forma muy correcta la filogenia con la información científica disponible en 1969, tanto que prácticamente el modelo conserva su validez hasta la última década del siglo.

Un tercer hito. Un tercer árbol de la vida. En 1977 el microbiólogo estadounidense Carl R. Woese (n. 1928) y colaboradores observaron, utilizando por primera vez la técnica del RNA ribosómico¹⁷ para establecer las relaciones entre microorganismos, que las comunidades de éstos en suelos incluían algunos que representaban un nuevo grupo, tan distinto de las bacterias como de los propios eucariotas. El desarrollo de sondas moleculares capaces de discriminar entre Bacterias y Arqueas, que son indistinguibles al microscopio, ha permitido detectar que este grupo está presente en todo el planeta, y que son particularmente prominentes en el océano profundo, donde hay hábitats con condiciones semejantes a las existentes cuando las Arqueas aparecieron.

El descubrimiento de las Arqueas llevó a una revisión del árbol de la vida, para reconocer tres dominios: Bacteria, Archaea y Eukarya, transformando completamente la concepción tradicional en 1990 con un nuevo (y de *temporalmente definitivo*) árbol de la vida¹⁸. En este nuevo modelo, y respecto al de Wittaker, se crea una categoría taxonómica superior al *reino* linneano (el *dominio*) quedando dentro de Eukarya los reinos de animales plantas y hongos y una buena proporción de los taxones que correspondían a los antiguos protista, y obviamente con los desaparecidos mónera, *disgregados* entre los dominios Archea y Bacteria.

¹⁷ Balch WE, Magrum LJ, Fox GE, Wolfe RS, Woese CR. (1977). An ancient divergence among the bacteria. *J Mol Evol.* 9(4):305-11.

El llamado "ARN ribosómico" (rARN). Esta secuencia genética aparece en el ADN de todos los seres vivos. Es una secuencia muy conservada, lo cual significa que ha evolucionado muy lentamente, por lo que puede ser utilizada para rastrear los cambios evolutivos sucedidos a lo largo de períodos de tiempo geológicos. En el caso de los procariotas es el ARN ribosómico 16s (rARN 16s) y en el de los eucariotas el 18s, rARN 18s ("s" hace referencia al coeficiente de sedimentación de una de las subunidades de los ribosomas, es decir a su tamaño). La forma más útil de visualizar las diferencias en el "rARN 16s" entre los diferentes organismos es mostrarlos gráficamente en el "árbol filogenético molecular de la vida, como ha sido llamado algunas veces. En este árbol, la distancia entre dos taxones, trazada a lo largo de las líneas que los unen, es proporcional a las diferencias entre su ARN ribosómico. Las especies con secuencias prácticamente idénticas están relacionadas y son representadas en el gráfico unas cerca de las otras. Aquellas que están ampliamente separadas, son parientes más lejanos, y cuando se combina cierta cantidad de datos es posible inferir linajes, para estimar las relaciones entre especies y para determinar cuando una línea diverge a partir de otra. Cuando se emplea este método con nuestras familiares plantas y animales, estos trazos en el "árbol de la vida" son muy similares a los de los árboles evolutivos deducidos de la anatomía estructural.

¹⁸ Woese C, Kandler O, Wheelis M (1990). Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *PNAS* 87 (12): 4576–4579

Hasta este punto hemos podido dibujar cómo se organizan las especies, los grandes grupos biológicos, en los llamados *árboles de la vida*, en función (primero) de sus afinidades morfo-funcionales y (después) por sus relaciones de parentesco evolutivo, permitiéndonos ver su enorme variedad de formas. Pasemos a la cuantificación: ¿Cuántas especies hay en el planeta?, o dicho de otro modo, ¿Cuál es la biodiversidad actual?.

Desde que Linneo asentó, con *Systema Naturae*, los fundamentos de la taxonomía con un sistema de nomenclatura para ordenar los seres vivos, el número de especies descritas ha venido aumentando sin pausa hasta alcanzar cerca de 2 millones de especies descritas en la actualidad, desglosadas como sigue: Animales: 1.300.000, de los que los vertebrados suponen 58.808 (Mamíferos: 5.416; Aves: 9.934; Reptiles: 8.240; Anfibios: 5.918; Peces: 29.300). Respecto a los Invertebrados: 1.240.000 repartidos como sigue: Insectos: 950.000, Moluscos: 70.000, Crustáceos: 40.000 y en otros grupos: 180.000. Los Hongos y líquenes: 90.000-1371.000. En Plantas: 300.000 que desglosamos en Monocotiledóneas: 59.300, Dicotiledóneas: 199.350, Gimnospermas: 980, Helechos: 13.025, Musgos: 15.000, Algas verdes clorófitas: 15.000. Y por último, los más complicados por lo difícil de estimar “especies” en organismos sin reproducción sexual, “Protistas”: 55.000, bacterias: 10.000, Arqueas: 300 y Virus: 2.000.

El inventario del número de especies en la biosfera parece infinito, aunque es evidente que el número de especies existente ha de ser necesariamente, finito. En los últimos años se han hecho esfuerzos importantes para ofrecer una estima fiable del número de especies que la biosfera puede contener¹⁹. Las estimaciones son muy heterogéneas. Van desde los 5 a los 30 millones²⁰ de especies, aunque parece que la cifra que se consensúa como más plausible está en una horquilla de 9 a 12 millones de especies.

¹⁹ Algunos ejemplos de estos trabajos, de finales de la anterior década: IUCN Red List 2007 – Summary Statistics for Globally Threatened Species Hawksworth, D.L. (2001) The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revisited. *Mycological Research* . 105: 1422-1432 Cambridge University Press, Sina M. Ald et al. (2007) Diversity, Nomenclature, and Taxonomy of Protists, *Syst. Biol.* 56(4), 684–689, Garrity G.M. et al. (2007) Taxonomic Outline of the Bacteria and Archaea, International Committee on Systematics of Prokaryotes (ICSP). Palmer, J.D. (2004) The plant tree of life: an overview and some points of view, *American Journal of Botany*, 91:1437-1445. Proceedings of the National Academy of Sciences, Census of Marine Life (CoML)

²⁰ Terry L. Erwin (n 1940) jefe de entomología en la Smithsonian Institution es un controvertido autor que defiende que podrían ser hasta 30 millones de especies en el planeta. Lo hace sobre una extrapolación del número de especies de coleópteros que encontró en una especie de árbol tropical (identificó 1.200 especies de escarabajos, de las cuales estimó que 163 se encontraban sólo en ese árbol). Sobre 50.000 especies de árboles tropicales, sugiere que hay casi 10 millones de especies de escarabajos en los trópicos.

Cada año se describen en torno a 16.000 especies nuevas, de las que unas 1.600 son marinas²¹. El crecimiento anual del inventario de biodiversidad se aproxima al 1%. Dado que se piensa que el número de especies descritas en el presente representa cerca de un 10% del total, al ritmo actual de descubrimiento serán necesarios más de dos siglos para completar el inventario, posiblemente más tiempo aún en el caso del inventario de especies marinas, que progresa más lentamente que el inventario de las terrestres

Se han utilizado distintas aproximaciones para estimar cuál puede ser el número de especies totales, como extrapolaciones desde los taxones mejor conocidos a los menos conocidos asumiendo una proporcionalidad de especies, extrapolaciones basadas en el número de especies nuevas que aparecen por unidad de área examinada a la superficie total ocupada por distintos hábitats o estimaciones estadísticas basadas en la progresión de la tasa de descubrimiento de nuevas especies. Como ya señalábamos antes, las estimas más consistentes²² apuntan a que el número total de especies podría situarse en torno a los doce millones, dominadas por insectos con casi diez millones. El número de especies marinas podría ser ligeramente superior a un millón, algo más de un 10% del número total de especies. Las últimas estimas (2011)²³ se basan en que la taxonomía de las especies en entidades taxonómicas de mayor rango (es decir, la asignación de las especies en phylum, clase, orden, familia y género) sigue un patrón consistente y predecible, por el cual el número total de especies en un grupo taxonómico, puede ser estimado. Este enfoque se valida contra grupos taxonómicos perfectamente conocidos. Cuando los autores aplican el algoritmo que sustenta el patrón, a todos los grupos biológicos, predice unos 8,7 millones de especies de eucariotas en el planeta, ($\pm 1,3$ millones), de los cuales 2,2 millones (± 0.18 millones) son marinas. A pesar de 250 años de la clasificación taxonómica y más de 1,7 millones de especies ya catalogados, estos resultados sugieren que el 86% de las especies existentes en La Tierra y el 91% de las especies en los océanos todavía no han sido descritas.

²¹ Bouchet, P. (2006) La magnitud de la biodiversidad marina. En C. M. Duarte (ed.), La exploración de la biodiversidad marina: desafíos científicos y tecnológicos. Madrid: Fundación BBVA, 32-64

²² Secretariat of Convention on Biological Diversity (2007). Guide to the Global Taxonomy Initiative, CBD Technical Series # 27

²³ Mora C, Tittensor DP, Adl S, Simpson AGB, Worm B, (2011) How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *PLoS Biol* 9(8): e1001127. doi:10.1371/journal.pbio.1001127

Historia de la Biodiversidad

Se calcula que, en toda la historia de la Tierra, han vivido 500 millones de especies; las que existen en la actualidad representan apenas el 2% de aquellas que alguna vez aparecieron. El otro 98% ha desaparecido (se han extinguido) o evolucionado hacia nuevas especies.

La ciencia sitúa en los océanos la cuna de la vida sobre la tierra. Los fósiles más antiguos existentes se hallaron en Australia, datados en torno a hace 3.500 millones de años corresponden a consorcios de microorganismos con Arqueas y cianobacterias fotosintéticas que formaban estructuras de carbonato similares a los estromatolitos. Los organismos más antiguos existentes son las Arqueas que aún representan una fracción importante de las comunidades biológicas del océano profundo. Como ya hemos indicado más arriba, el descubrimiento de las Arqueas es un hito bastante reciente que ha revolucionado nuestra concepción de la organización de la diversidad biológica. A partir de ahí, el registro fósil es muy exhaustivo y aunque incompleto, está (cada vez más) aumentando día a día. La paleontología, junto con las tecnologías moleculares están permitiendo aclarar y robustecer nuestro conocimiento de la historia de la biodiversidad.

Podemos hablar de numerosas regularidades al considerar la historia de la biodiversidad, pero hay tres que (mirando atrás, a los 600 últimos millones de años) son claras: Extinciones (de fondo y masivas), Estabilidad y Explosiones biológicas.

Darwin demostró que la extinción de las especies forma parte de la evolución, como final de un proceso, isomórfico al de la vida de los individuos²⁴. No hay razones para preocuparse sobre la desaparición de especies. De hecho, una tasa constante de extinción es un proceso normal en el curso de la evolución y se conoce con el nombre *tasa de extinción de fondo*. Las especies siempre han evolucionado y desaparecido a través de los tiempos geológicos debido a causas como incapacidad de adaptación al medio, pérdida de eficacia reproductiva o competitiva, aumento de la eficiencia de sus depredadores, desaparición de su presas, entre otras.

²⁴ Hablamos de un proceso isomórfico entre especies e individuos, por cuanto en las especies, hay una génesis (por diferenciación evolutiva –adaptación y mutación–) una etapa de diversificación y desaparece por extinción; en el caso de los individuos, la génesis es el nacimiento, crecen y se reproducen y concluyen el ciclo con la muerte.

Además de estas extinciones de fondo se han producido las llamadas *extinciones masivas*. En estas los porcentajes de taxones (dominantes) que desaparecen en un espacio de tiempo supera enormemente la tasa de extinción de fondo, es decir que se produce un *cataclismo* que estrecha notablemente la biodiversidad en un lapso de tiempo pequeño. Las causas de estas extinciones masivas las tratamos más adelante, al revisar las grandes extinciones de la historia de la biodiversidad.

Tras los sucesos de *macroextinciones*, siempre se suceden *explosiones biológicas* conducen (cuando las condiciones lo permiten) a periodos (cortos normalmente) de *estabilidad*. La razón de las explosiones biológicas se encuentra en una regularidad inherente a la vida: su imparable expansión, su aborrecimiento del vacío. Cuando determinados taxones desaparecen (y sobre todo si son dominantes en los sistemas) hay otros *secundarios* en cuanto a dominancia que, compartiendo nicho ecológico²⁵ con las extintas, ocupan ese espacio (físico, i.e., hábitat²⁵ y también funcional). A partir de ahí, la reorganización en los ecosistemas de los *nuevos dominantes*, la apertura de nuevas relaciones de depredación y competencia (intra e interespecífica), las nuevas condiciones ambientales y las características poblacionales propician una diversificación, una complejización que conduce a nuevas formas de vida.

Revisemos los cinco grandes cataclismos de la biodiversidad, las grandes extinciones masivas.

Hace 444 millones de años hubo una *extinción doble* (en dos fases separadas por aproximadamente 1 millón de años) que marcaron la transición entre el período Ordovícico y Silúrico. Esta *macroextinción* es la segunda extinción masiva con mayor impacto en la historia de la biodiversidad y afectó a los únicos pobladores del planeta, los organismos oceánicos. Desaparecieron el 50% de los corales y cerca de 100 familias biológicas, lo que representaba el 85% de las especies de fauna. Se extinguieron principalmente los braquiópodos y los briozoos, junto con familias de trilobites, conodontes y graptolites. La teoría más aceptada explica que la primera parte de la extinción fue causada al inicio de una larga edad de hielo que provocó la formación de grandes glaciares en el supercontinente Gondwana y, por consiguiente, la bajada del nivel del mar. La segunda, en cambio, surgió tras la finalización de la edad de hielo, el

²⁵ Nicho ecológico y hábitat son términos muchas veces confundidos fuera de la ciencia ecológica al trasponerlos a otros ámbitos. Hábitat hace referencia al lugar físico, geográfico en el que una especie se desarrolla, podríamos decir que es la *dirección* de esa especie. Nicho ecológico, es un término acuñado por el ecólogo Inglés G.E. Hutchinson (1903-1991) que desarrolló su trabajo en la Universidad de Yale. Este término hace referencia a la función que una especie desarrolla en un ecosistema, en función de las capacidades de la misma, En este caso podemos decir que el nicho ecológico sería *la profesión*.

hundimiento de los glaciares y el posterior aumento del nivel del mar con las consecuentes modificaciones de temperatura y salinidad.

La segunda gran extinción masiva fue hace 360 millones de años, en el Devónico, en su transición al Carbonífero. En esta ocasión el 77% de las especies desaparecieron a lo largo de los 3 millones de años que duró el evento desapareciendo corales, acritarcos, ostrácodos, ammonoideos y algunas clases de peces (los placodermos y los estracodermos). Se extinguieron el 85% de géneros de braquiópodos y ammonites, además de numerosos tipos de gasterópodos y trilobites. Las causas de esta extinción todavía no están claras, aunque se sospecha que fue debido a bajas temperaturas, bien debidas a cambios en el eje de rotación de la tierra o bien por el impacto de algún meteorito.

Hace 251 millones de años, durante la transición del Pérmico al Triásico, cerca de 95% de las especies marinas se extinguieron. En esta tercera extinción masiva tenemos la catástrofe más grande que ha conocido la biodiversidad: desapareció el 53% de las familias biológicas marinas, el 84% de los géneros marinos y aproximadamente el 70% de las especies terrestres (incluyendo plantas, insectos y vertebrados). Las causas no están claras, especulándose con aquellas que produjesen un dramático incremento de la temperatura: bien un largo periodo de vulcanismo extremo o la liberación de grandes cantidades de gases de invernadero. Lo más probable es no fuese una única causa.

La cuarta gran extinción se produjo hace 200 millones de años, en la transición Triásico-Jurásico afectando profundamente la vida tanto en tierra, como en los océanos. Desaparecieron cerca del 20% de las familias biológicas marinas, mientras que en tierra los arqueosauros, la mayoría de los terápsidos y los últimos grandes anfibios se extinguieron. Esta extinción permitirá (por liberación de nichos ecológicos) una explosión biológica de los dinosaurios, que asumieran el papel dominante durante el período Jurásico subsiguiente. Se han propuesto diversas hipótesis para explicar las causas de esta extinción. Ni los cambios climáticos graduales ni los cambios en el nivel del mar ocurridos durante el Triásico explican lo repentino de la extinción del panorama marino. Se especula con causas diversas pero ninguna tiene soporte en evidencias paleoecológicas o geológicas sólidas.

La quinta extinción se produce hace aproximadamente 65 millones de años. Corresponde al final del período Cretácico y el principio del período Terciario. No se conoce la duración de este evento. Cerca del 50% de los géneros biológicos desaparecieron, entre ellos la mayoría de los dinosaurios enormemente

diversificados en los último millones de años. Se han propuesto muchas explicaciones a este fenómeno, pero la más aceptada es que fue el resultado del impacto sobre la Tierra de un objeto procedente del espacio. Como resultado del impacto y de la emisión de partículas a la atmósfera, el clima se habría alterado muy repentinamente, además de perderse producción por parte de los organismos fotosintéticos, con el subsiguiente quebranto de las redes tróficas. En este caso hay una evidencia bastante sólida de la hipótesis. Se ha observado que la concentración de un elemento poco frecuente en la Tierra, el iridio en los estratos geológicos correspondientes al tránsito Cretácico-Terciario es casi 10 veces superior²⁶ a la que se encuentra en estratos datados como anteriores o posteriores. Esto se correlaciona con el hecho de que muchos meteoritos contienen cantidades muy significativas del citado elemento. Así, al impactar el meteorito habría repartido micropartículas resultantes de su desintegración con iridio, y estas se habrían depositado en las cuencas sedimentarias.

A estas cinco extinciones masivas se añaden otras, eventualmente de menor impacto, entre las que caben destacar dos: la extinción del Cámbrico/Ordovícico Tuvo lugar en los comienzos de la era Paleozoica que afectó básicamente a trilobites, a los braquiópodos y a los conodontes. Actualmente creemos que el causante del exterminio del 95% de las especies marinas puede ser un período glacial o la reducción de la cantidad de oxígeno disponible en el agua.

La extinción masiva del Holoceno ocurre en el último período geológico del cuaternario. La extinción abarca desde el mamut hasta el dodo. Durante este periodo se produjo la desaparición de los grandes mamíferos que habitaban la Tierra, conocidos como *megafauna*, cerca del final de la última glaciación hace unos 9.000 o 13.000 años.

Como conclusión global, podemos destacar que las extinciones masivas están relacionadas de modo directo con cambios de naturaleza climática (ora glaciaciones, ora calentamientos) que al acontecer de modo brusco, afectan de modo dramático a la vida. Su subsistencia (la de la vida en conjunto, no la de taxones determinados) queda garantizada por la enorme diversidad de organismos, que propicia una homeostasis frente a perturbaciones, por grandes que estas sean. Si pensamos en las causas mediatas (las que causaron cambios climáticos) hay que recurrir a procesos de naturaleza más o menos global, como vulcanismo, variaciones de la composición atmosférica, modificaciones

²⁶ El nivel de fondo de iridio en los estratos está por debajo de las 0.5 ppb pero en los que corresponden en datación al impacto estos valores son de casi 4 ppb..

paleolatitudinales (por alteraciones del eje de rotación o por la deriva continental) o en otras *más exóticas*, como la caída de aerolitos.

Se habla en muchas ocasiones de nuestro camino, en la era actual del llamado *Antropoceno*²⁷, hacia una sexta extinción masiva... ¿qué hay de cierto en ello?. Una primera certeza es que desde el siglo XVII, los humanos hemos acelerado la tasa de extinción debido al aumento de la población y al consumo de los recursos. Hoy en día, la mayoría de los hábitats del mundo están cambiando tan rápidamente que las especies no tienen tiempo para evolucionar o adaptarse a tales cambios. Como antes indicábamos se estima que la actual tasa global de extinción es de más o menos 20,000 especies por año, lo cual es muchas veces mayor que la tasa de extinción de fondo, y desde luego mayor a la velocidad con la que vamos identificando nuevas especies. Muchos biólogos creen que estamos inmersos en el mayor episodio de extinción en masa desde la desaparición de los dinosaurios hace 65 millones de años.

Desde la Revolución Industrial, el aumento de la capacidad del ser humano de transformar su entorno, supone un hito no ya en la historia de nuestra especie, sino en la del planeta, que se ha visto transformado por la actividad humana.

Cualquier examen objetivo del planeta Tierra, su clima, la configuración y dinámica de sus ecosistemas, sus procesos funcionales básicos, muestra que éstos se encuentran afectados por la actividad humana. La importancia del impacto de la actividad humana sobre los procesos esenciales de la biosfera se refleja en algunos indicadores como el hecho de que el 45% de la superficie terrestre se ha transformado ya por la actividad humana, pasando de ecosistemas salvajes a ecosistemas domesticados, como campos de cultivo, pastizales o zonas urbanas. La humanidad utiliza más del 50% del flujo disponible de agua dulce global, modificando no sólo la cantidad de agua que fluye por ríos sino también alterando su calidad, que resulta enriquecida en nutrientes, nitrógeno y fósforo, materia orgánica y contaminantes tras su uso por la humanidad. Las emisiones de dióxido de carbono por el uso de combustibles fósiles, producción de cemento y fuegos, junto con la liberación de otros gases con efecto invernadero como el metano, están incrementando la temperatura del planeta y, al disolverse en los océanos, acidificándolos, procesos que tienen consecuencias importantes

²⁷ Crutzen, P. J. y Stoermer, E. F. (2000). The "Anthropocene". *Global Change Newsletter* 41: 12-13. El químico atmosférico y premio Nobel Paul Crutzen es quien propone, junto con su colega E. Stoermer, en el año 2000 el nombre *Antropoceno* para designar una nueva Era geológica en la historia del planeta en la que la humanidad ha emergido como una nueva fuerza capaz de controlar los procesos fundamentales de la biosfera, causando un Cambio Global.

para el clima de la Tierra y sobre los ecosistemas que contiene. Se ha calculado también que la humanidad consume, a través de la explotación agrícola, forestal y pesquera, de aproximadamente 40% de toda la producción fotosintética terrestre y el 20% de la producción fotosintética costera del planeta.

La base de datos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza²⁸ reporta 850 especies actuales ya extintas, la mayor parte de ellas (583 especies) terrestres y de agua dulce (228 especies), con tan sólo 16 especies marinas extinguidas. El número de especies clasificadas por la IUCN en estado crítico es de 3.124 y otras 4.564 especies se encuentran en peligro de extinción²⁹.

Estos datos, a los que se podrían añadir muchos más, bastan para sustanciar la afirmación de que el hombre se ha convertido en un motor esencial de cambio en los procesos básicos de la biosfera. Demos el dato que nos ofrecen McLean y Wilson³⁰ (2011) en el reciente número del PNAS: como resultado de la actividad antrópica, esencialmente por los procesos que directa o indirectamente (como los consignados anteriormente) actúan sobre el clima global, se estima que de aquí al 2100, se habrán extinguido 1 de cada 10 especies. Esto significa un ritmo de extinción sin precedentes en la historia de la biodiversidad en nuestro planeta. Más adelante profundizaremos en las causas de esta erosión de la biodiversidad.

El valor de la biodiversidad

La diversidad biológica es una de las mayores riquezas del planeta y tal vez la menos reconocida como tal. Para hacer una valoración de la biodiversidad Hassan, Scholes y Ash (2005)³¹ evaluaron las industrias *stakeholders* de la biodiversidad y sus ámbitos de actuación. Estos campos o ámbitos son los que siguen: *Bioprospección farmacéutica, Bioprospección etnobotánica, Industria fitoterápica, Industria cosmética y del cuidado personal, Control biológico y protección de cosechas, Biomiméticos, Biomonitorización, Agricultura y ganadería, Biorremediación, Restauración ecológica y Ecoturismo.*

²⁸ IUCN, www.iucnredlist.org

²⁹ The IUCN Red List of Threatened Species (2000–2011)

³⁰ Maclean and Wilson (2011) Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. PNAS; published ahead of print July 11, 2011, www.pnas.org/cgi/content/short/1017352108

³¹ Rashid M. Hassan, Robert Scholes, Neville Ash. (2005) Ecosystems and human well-being. In.; Millennium Ecosystem Assessment (Program). Condition and Trends Working Group - 2005 - 917 . Island Press.

Sin embargo hay algo más que ese listado de *aspectos útiles* para nuestra especie que nos aporta la biodiversidad (y la diversidad biológica), son lo que podríamos describir como *valores intrínsecos* de la biodiversidad y que pueden condensarse en dos: el *valor naturalístico y científico* de una parte, y de otra su actividad como agentes de *servicios ambientales* necesarios para la biosfera y consecuentemente para la humanidad. A fin de no resultar exhaustivos, vamos a abordar como paradigmas, como ejemplos relevantes) algunos de los aspectos descritos tanto desde la óptica *aplicada* como desde la de *valor intrínseco*, como sigue

1. Valor aplicado: i) Fuente de fármacos; ii) Agricultura y ganadería; ,iii) Sector turístico.
2. Valor intrínseco: i) Naturalístico y Científico; ii) Servicios ambientales.

La biodiversidad como fuente de fármacos

Hacemos a continuación referencia a los estudios más reciente al respecto³²³³³⁴. La mayor parte de los fármacos de origen natural en desarrollo en 2008, eran anticancerosos y antibacterianos, en clara correlación con las patologías que mayor prevalencia tienen en el mundo. El 50% de los productos autorizados entre 2000 y 2006, han sido moléculas pequeñas de origen natural. De las 155 moléculas pequeñas autorizadas y empleadas desde 1940 como fármacos anticancerosos, un 73% son no-sintéticos, y un 43% de origen natural, o derivados de compuestos naturales. Entre 1981 y 2006, 98 antibacterianos (moléculas pequeñas) el 75% son naturales o derivados moléculas de origen natural. En este ámbito y atendiendo al binomio biodiversidad y conocimiento de la misma, hay que señalar que el número de plantas superiores en el mundo varía entre 250.000 y 700.000 (dependiendo de los autores). De ellas se han investigado unas 35.000 para la obtención de principios activos frente a diferentes tipos de enfermedades.

¿Cuál es el origen de los productos con utilidad farmacológica?. Si hacemos un *ranking* a este respecto, encontramos que los animales de origen marino (invertebrados fundamentalmente) son, en la actualidad, la fuente principal de moléculas. A estos les siguen las que durante mucho tiempo fueron las *líderes* de esta clasificación, las plantas terrestres, tras estas los microorganismos (que

³² Newman and Cragg (2007) Natural Products as Sources of New Drugs over the Last 25 Years. J. Nat. Prod. 70 (3):461-477

³³ Pharamaprojects database (2008) Url: www.phamaprojects.com

³⁴ Klaus K. (2010) Pharmaceuticals in the Environment. Annual Review of Environment and Resources 35: 57-75

van aumentando su impacto en este *ranking*), seguidos de animales terrestres, y finalmente las plantas marinas³⁵.

Lo que parece deparar el futuro es un mayor interés por los organismos oceánicos y por los microorganismos en detrimento de las plantas terrestres. Sin embargo son muy numerosas las moléculas interesantes que se encuentra en estas últimas, por citar algunos ejemplos, la briostatina, el taxol o la ipomoeasina, todos citotóxicos con actividad antitumoral³⁶.

La razón por la que son interesantes como fuente de fármacos los organismos marinos, es porque están sometidos a condiciones extremadamente singulares, lo que provoca que sintetizen moléculas que no tienen equivalencia con las terrestres. Además, la potencialidad de los océanos como fuente de nuevos compuestos aún no ha sido explorada: cerca del 80% de los organismos vivos del reino animal habitan en el mar y, sin embargo, menos del 1% de las especies marinas han sido investigadas con este propósito³⁷. En décadas pasadas los avances en las técnicas submarinas de exploración han facilitado el acceso al ambiente marino y a sus recursos naturales. En torno a los años 70s del pasado siglo se produce una gran revolución en este campo con el hallazgo de dos compuestos: la *tetrodotoxina* (extraída de los peces globo) y la *saxitoxina* (extraída de dinoflagelados), que han tenido importante aplicación en el campo de la farmacología y biomedicina por la especificidad de sus efectos sobre los canales de sodio así como por la potencia de su acción, por lo que constituyen principios activos importantes. En ese período, las investigaciones biomédicas de los productos naturales marinos se centraron en toxinas activas sobre membranas del sistema nervioso central, agentes antivirales, antitumorales y antiinflamatorios. En la década de los años 80s se llegó al descubrimiento de los primeros metabolitos marinos que pasaron a la fase de estudios preclínicos y ensayos clínicos. En la década pasada se da inicio a una colaboración más sofisticada entre químicos de productos naturales, farmacólogos moleculares, bioquímicos y biólogos celulares. Al mismo tiempo, los avances en las técnicas de biología molecular, en las tecnologías de DNA recombinante y en los análisis genómicos han propiciado la identificación de un número cada vez mayor de moléculas para incluir en los nuevos programas de búsqueda de principios activos. Este desarrollo tecnológico ha conducido a un renovado interés en las

³⁵ Kingston (2011) Modern Natural Products Drug Discovery and Its Relevance to Biodiversity Conservation. *J. Nat. Prod.*, 74 (3): 496–511

³⁶ Wender, P.A. y Miller B.L. (2009) Synthesis at the molecular frontier. *Nature*, 460: 197-201

³⁷ Maris E. (2006). Drugs from the Deep. *Nature*, 443: 904-905.

tecnologías de búsqueda por las industrias farmacéutica y biotecnológica que permite pronosticar nuevos hallazgos de interés para los próximos años^{38 39}.

Sin embargo, parece que los microorganismos van a cobrar fuerza (ya lo hacen desde hace años) en este ámbito⁴⁰ gracias a nuevas tecnologías del ADN como la metagenómica. Un hito en este camino (aunque no orientado a la industria farmacéutica, al menos en principio) fue el alcanzado por el biólogo norteamericano Craig Venter (que lideró el proyecto de *Celera Gemonics* que secuenció por primera vez el genoma humano) al secuenciar fragmentos de ADN de 1 m³ de agua superficial del Mar de los Sargazos. Este ejercicio arrojó un sorprendente inventario de nuevos genes, 1.214.207, y cerca de 1.800 nuevas especies de microorganismos microbianos⁴¹.

La metagenómica persigue obtener secuencias del genoma de los diferentes microorganismos, bacterias en este caso, que componen una comunidad (de cualquier ecosistema, como el suelo, sedimentos profundos o del mar), extrayendo y analizando su ADN de forma global. Este ADN del metagenoma representa a *todos los genomas de las bacterias que conforman la comunidad* estudiada. El procedimiento empleado, consiste en aislar el material genético, manipularlo para finalmente construir genotecas de ADN donde quedará almacenada toda la información genética obtenida: la de todas las estirpes de bacterias presentes, sean o no cultivables en laboratorio. Para poder aislar el ADN, la muestra a emplear debe ser representativa de la comunidad bacteriana. Las células de los microorganismos se rompen mediante el empleo de métodos físicos o químicos. Una vez que el ADN de dichas células se encuentra libre, se separa del resto de la muestra, para que una vez aislado, se pueda manipular este ADN genómico. Al ser el ADN bacteriano relativamente grande, se corta en fragmentos más pequeños mediante el empleo de unas enzimas conocidas como endonucleasas de restricción. Posteriormente, los fragmentos se ligan a los vectores. Estos vectores, que portan los fragmentos de ADN metagenómico, se introducen en organismos de fácil cultivo y expresión (p.e. ciertas cepas de *Escherichia coli* como DH10B). Esto permite que el ADN de las bacterias que no crecerían o lo harían con dificultad en las condiciones del laboratorio, pueda expresarse y ser estudiado.

³⁸ Molinari, G. (2009) Natural products in drug discovery: present status and perspectives. *Adv Exp Med Biol.* 655:13-27.

³⁹ De la Calle, F (2007) Fármacos de origen marino. *Treballs de la SCB.* 58: 141-155

⁴⁰ Handelsman, J. (2004). Metagenomics: Application of Genomics to Uncultured Microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(4): 669-685.

⁴¹ Venter, J. C., et al. (2004). Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea. *Science* 304: 66-74.

Las células transformadas se hacen crecer sobre medios selectivos, de forma que sólo las células portadoras de los vectores puedan crecer.

Se consigue así la construcción de librerías metagenómicas donde se encuentra almacenada una gran cantidad de información genética. Así pues, los análisis de metagenómica de comunidades complejas ofrecen la oportunidad de examinar de una manera integral cómo responden los ecosistemas a las perturbaciones ambientales. La metagenómica se convierte así en una herramienta útil para acceder a la elevada biodiversidad de las muestras ambientales. La propiedad más valiosa de la metagenómica es la de proporcionar la capacidad de caracterizar de forma eficaz la diversidad genética presente en dichas muestras, obviando las dificultades encontradas en el cultivo en laboratorio de determinados microorganismos. La información que proporcionen las librerías metagenómicas enriquecerá el conocimiento y, por tanto, las aplicaciones, singularmente en la búsqueda de nuevas moléculas, de modo especial antimicrobianos⁴².

Los avances en biología molecular de la última década han pulverizado el concepto clásico de biodiversidad marina, entendida hasta ahora como mera clasificación de especies. Se calculan en 3×10^{28} el número de formas de vida microscópicas existentes globalmente en océanos; para que lo entendamos, ello supone que hay 100 millones de veces más microorganismos que estrellas en el universo visible. Esto nos puede permitir hacer una idea de la cantidad de moléculas potencialmente farmacológicas que hay por descubrir, como resultado de la expresión de esos genes heterólogos.

La biodiversidad en agricultura y ganadería

El 90% de los alimentos que consumimos se obtienen de plantas y animales que fueron domesticadas partiendo de especies silvestres. Pero hoy usamos solo una mínima parte de las existen en la naturaleza. Además frente a enfermedades y plagas emergentes es a menudo necesario recurrir a variedades silvestres para poder combatirlos de forma natural. Frente a un cambio del ambiente o una epidemia, la diversidad genética permite la supervivencia de algunos de los individuos.

⁴² Banik, J.J. Brady, S.F. (2010) Recent application of metagenomic approaches toward the discovery of antimicrobials and other bioactive small molecules. *Current Opinion in Microbiology*, (13), 5:603-609

Sólo tres cultivos –maíz, trigo y arroz– representan alrededor del 40% del consumo mundial. El 95% de las necesidades alimentarias del mundo están soportadas por sólo 30 especies de plantas. En marcado contraste, se estima que 7.500 especies se consideran comestibles en el mundo de hoy.

Veamos algunos ejemplos que ilustran el tema. En un reciente estudio, publicado en una revista divulgativa⁴³ se aporta un significativo e interesante dato en 1903 se cultivaban en el mundo un total de 3.846 variedades de hortalizas y otros cultivos (remolacha, col, maíz, lechuga, tomate, pepino, melón, guisante, rábano o calabaza), con cifras en cada caso de entre 300 y 500 variedades diferentes, dependiendo del cultivo (p.e. 497 variedades de col). Ochenta años después, en 1983 el total de variedades de ese conjunto cautivadas era de 307, con una reducción análoga en cada cultivo (p.e en col había sólo 28 variedades). Esto supone que se ha perdido una diversidad del 92%. El impacto de esta pérdida (si no hay reservorios de esos genes en bancos de semillas o de germoplasma) sólo se verá cuando emerjan situaciones tales como nuevos patógenos o nuevas situaciones ambientales (climáticas o edáficas) que necesiten de *soluciones escritas en genes* que ya no tenemos, porque los hemos perdido.

Cuando se revisa la literatura a este respecto, hay una plétora de ejemplos, incluso en cultivos muy importantes para la humanidad como es el caso del trigo. En un estudio de 2009 dos agrónomos norteamericanos⁴⁴ encontraron un dramático descenso de las diferencias genéticas de este cereal, en los cultivares explotados en USA tanto agrícolamente como para mejora. En este estudio observan que desde 1840 a 2005 se ha producido una pérdida de casi el 75% de la variabilidad. Se puede pensar que esta selección (o la del ejemplo anterior) en el fondo, es buena, dado que nos hace quedarnos con los varietales más robustos y productivos. Esto es verdad, pero con un matiz: lo son en las condiciones ambientales y de manejo para los que se seleccionaron, pero si cambian pueden no serlo.

En el campo de la ganadería, lo que observamos es análogo, tanto en el caso de países desarrollados⁴⁵ como en los subdesarrollados o en vías de desarrollo⁴⁶.

⁴³ National Geographic (julio 2011): The Food Ark

⁴⁴ Yong-Bi Fu and Daryl J. Somersb (2009) Genome-Wide Reduction of Genetic Diversity in Wheat Breeding. *Crop Sci.* 49: 161–168

⁴⁵ EEA, 2005. Prepared by IRENA from data within FAO's Domestic Animal Diversity Information System.

⁴⁶ Global perspectives on animal genetic resources for sustainable agriculture and food production in the tropics J. Philipsson, I E Zonabend, RC Bettl and A.M. Okeyo. (2010) Animal Genetics Training Resource, version 3., Ojango, J.M., Malmfors, B. and Okeyo, A.M. (Eds). International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya, and Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

En el caso europeo⁴⁴, al observar los datos disponibles, encontramos que del conjunto de especies de ganado (ovino, caprino, porcino, vacuno y aves –gallinas-) esta en una situación poco deseable: en la mayor parte de los países europeos casi el 50% de las razas están en peligro o se han extinguido. Los más cuidadosos son portugueses y los más descuidados los austriacos. En el caso de España, tenemos un 10% de razas perdidas y un 40 % en peligro o en estado crítico.

Algunos acontecimientos relativamente recientes deberían espolear nuestras conciencias (y nuestra ciencia e inteligencia) para valorar la importancia de tener un arsenal de genes biodiverso en ganadería. Nos referimos a los episodios de fiebre aftosa o glosopeda⁴⁷ y a los brotes de gripe aviar. Estas patologías víricas, temibles por su alta tasa de contagio, su alta morbilidad y mortandad, las consecuentes enormes bajas en la producción lechera y de carne, así como la posibilidad de dar el salto del virus a nuestra especie, pueden ser combatidas desde varios frentes. Junto a las medidas de tipo profiláctico (tanto físicas, ganaderas o químicas) y las de tipo farmacológico (tratamiento y vacunación) están las de tipo biológico. De igual manera que la variabilidad genética y la mutabilidad de los *Aphthovirus* o de los *Influenzavirus A* son un arma de estos, también una elevada heterogeneidad genética de sus hospedadores puede serlo. En esencia esta variabilidad es una de las herramientas utilizadas evolutivamente en la difícil relación depredador presa o parásito-hospedador⁴⁸.

El mercado del Ecoturismo

Aunque no existen datos exhaustivos para gastos a nivel mundial dedicados al ecoturismo, se estima que representa entre entre 10% y el 15%, aunque algunas predicciones optimistas llegan hasta 30% del total del turismo mundial. Si consideramos que en el año 2010 unos mil millones de personas se desplazaron por todo el globo realizando viajes de placer, es decir, actividades turísticas, podemos concluir que entre 100 y 300 millones de persona se beneficiaron de este sector del ecoturismo. Algunos estudios en USA revelan que por lo menos 30 millones de norteamericanos pertenecen a alguna *organización ambiental* o tienen un interés en la *protección ambiental*, aspectos que pueden repercutir en planificar viajes en otros países con recursos naturales y biodiversidad muy diferentes de lo que pueden encontrar en su país de origen.

⁴⁷ Por poner lo general en concreto, y en datos económicos: el brote de aftosa que afectó al Reino Unido el 2001 obligó a dar muerte a 6.000.000 de animales y causó pérdidas por 13 mil millones de euros

⁴⁸ La llamada por el biólogo Richard Dawkins (n 1947, titular de la «cátedra Charles Simonyi de Difusión de la Ciencia» en la Universidad de Oxford hasta el año 2008) “carrea armamentística depredador-presa”.

En cuanto a la situación europea, la Organización Mundial de Turismo (OMT) extrajo como una de las conclusiones del status del sector que *el medio ambiente es la principal motivación turística para más de 20 millones de europeos. Se consideró asimismo que las empresas medianas y pequeñas ayudan a preservar la autenticidad y a evitar la masificación.*

Si consideramos el caso de centro y sur américa, el turismo hacia el Amazonas aumentó en 300% entre 1988 y 1989 y algo parecido ocurrió en Costa Rica entre 1992 y 2000, donde se estima que el 70% de los turistas realizan actividades ecoturísticas. Tendencias similares se visualizan en los últimos años en Venezuela, Panamá, Nicaragua y en general a nivel mundial.

Para que el turismo ecológico sea considerado como tal, debe cumplir con las siguientes premisas básicas⁴⁹.

Un bajo impacto ambiental: Implica turismo cuidadosamente regulado, que supone la zonificación de las áreas protegidas, delimitando las áreas más frágiles con acceso restringido, mientras que en otras áreas se permite la visita en condiciones restrictivas en cuanto a número de visitantes y con guías adecuadamente formados.

La conservación de la biodiversidad: El ecoturismo ha contribuido en atraer la atención sobre especies en peligro de extinción y fomentar su conservación, lo que ineludiblemente pasa por la correcta conservación de los ecosistemas. Esto a su vez, propicia el desarrollo de actividades educativas y científicas.

Beneficio económico: Los ingresos del ecoturismo tanto directos como indirectos son considerables y tienden a aumentar año tras año, según los datos de la OMT.

Mejora de las áreas protegidas: Los ingresos económicos obtenidos mediante el ecoturismo, en gran parte gracias al ingreso de divisas extranjeras, puede reinvertirse en parte para la conservación y uso sostenible de las áreas protegidas y parques naturales que son visitados.

Combinaciones del ecoturismo con otras formas de turismo: La combinación de aspectos ecoturísticos con otros usos de la tierra, y otras actividades -como el turismo histórico, de deporte u otros- ha demostrado atraer un número cada vez mayor de ecoturistas.

⁴⁹ Tourism and Biodiversity Achieving Common Goals Towards Sustainability. 2010. Published by the World Tourism Organization (WTO). 72 pags. Madrid, Spain

Beneficios para las comunidades locales: El ecoturismo presupone interés y mejor comprensión de parte de los visitantes hacia las poblaciones locales, incluyendo pueblos indígenas y su modo de vivir. Estas comunidades nativas pueden verse económicamente beneficiadas por la actividad del turismo.

Valor naturalístico y científico de la biodiversidad

Los descubrimientos que se van haciendo por parte de la comunidad científica en la frontera de la biodiversidad, esto es, nuevos organismos que se van describiendo (y eventualmente conociendo su funcionalidad ecosistémica) es una buena muestra de su valor naturalístico y científico. Esta labor de inventario reporta importantes sorpresas, no sólo en cuando se encuentran y describen vertebrados relativamente grandes como monos (el mono mangabey –*Lophocebus kipunji*– descubierto en Tanzania en 2005⁵⁰) sino más bien cuando se exploran organismos microscópicos.

Por ejemplo, las diminutas cianobacterias fotosintéticas de los géneros *Synechococcus* (aproximadamente 1 µm de diámetro) y *Prochlorococcus* (aproximadamente 0,5 µm de diámetro) fueron descubiertas a finales de los años 70⁵¹. Estudios posteriores pusieron de manifiesto que estos organismos dominan el plancton de los grandes desiertos oceánicos, que representan casi un 70% de la extensión del océano abierto y son responsables de casi un 30% de la producción fotosintética en el océano⁵². La magnitud de este descubrimiento y lo que nos dice sobre el grado de desconocimiento del océano se puede comprender considerando que el desconocimiento de estos organismos hasta finales de los años 1970 equivale a que hubiésemos desconocido la existencia de las selvas tropicales en tierra hasta esa fecha.

No obstante, el océano sigue asombrándonos a niveles taxonómicos elevados, incluso se descubren nuevos *filos* (cosa que no ocurre en tierra), y algunos de los animales más grandes del planeta, como los calamares gigantes *Magnapinnidae* de enormes aletas, que se han avistado varias veces en el océano profundo (a más de 2,000 m), el tiburón de boca ancha, *Megachasma pelagios* (de 4,5 m

⁵⁰ Jones, T., et al (2005). The Highland Mangabey *Lophocebus kipunji*: A New Species of African Monkey. *Science* 308: 1161–1164.

⁵¹ Johnson P.W. y Sieburth, J.M. (1979). Chroococcoid cyanobacteria in the sea: a ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Limnology and Oceanography* 24: 928–935

⁵² Partensky, W. R. Hess y D. Vaulot (1999). *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63 (1): 106–127

de longitud) descubierto en aguas de Hawai en 1983⁵³, o el pequeño rorcual *Balaenoptera omurai*⁵⁴ que alcanza los 9 m de longitud, descubierto en la zona indopacífica en 2003.

Parece que las mayores oportunidades de aumentar el conocimiento científico en biodiversidad marina se dan en los ecosistemas remotos (como, son las zonas del Sureste Asiático y Oceanía, centros de gran diversidad en especies de todos los grupos marinos,) y los hábitats extremos (como fosas oceánicas, cuevas submarinas, ambientes hipersalinos y anóxicos o fuentes hidrotermales) que reportan mayores sorpresas⁵⁵, junto con el interior de organismos que albergan *simbiontes* (un término que aquí utilizamos inexactamente para incluir a *comensales, mutualistas y parásitos*) y que no están restringidos a especies de pequeño tamaño. Por ejemplo, el mayor gusano marino conocido, que alcanza 6 m de longitud, es un parásito de ballenas.

Pero los hallazgos sobre biodiversidad marina en el océano van mucho más allá de la mera descripción de nueva y curiosas especies. Lo sustantivo, es la localización de ecosistemas nuevos, con comunidades y procesos metabólicos desconocidos hasta la fecha. Fue a finales de los años 70s cuando los científicos del balsafo norteamericano de investigación *Alvin* descubrieron los ecosistemas de fuentes hidrotermales suboceánicas, mientras realizaban estudios geotérmicos en la dorsal de las Galápagos⁵⁶. Lo que hallaron estos investigadores fue un sorprendente paisaje submarino de chimeneas negras de las que brotaban chorros densos, con aspecto de humo, compuesto de metales (hierro), otros elementos (diversas especies de azufre) y partículas, que al perder calor en contacto con las gélidas aguas de la profundidad, precipitaban haciendo crecer estas chimeneas. Estas a su vez estaban colonizadas por densas masas de animales hasta entonces desconocidos, como el gusano tubícola gigante *Riftia pachyptila*, cangrejos apigmentados, peces y otros muchos organismos.

De este descubrimiento no es lo más relevante el incremento del inventario de especies marinas, sino una notabilísima modificación del axioma ecológico por el cual la luz solar era la fuente de energía que, a partir de la actividad fotosintética

⁵³ Taylor, L.R. et al. (1983) Megamouth a new species, genus, and family of lamnoid shark (*Megachasma pelagios*, family Megachasmidae) from the Hawaiian Islands. PNAS. 43A: 87-110

⁵⁴ Wada, S., Oishi, M., and Yamada, T.K. 2003. A newly discovered species of living baleen whale. Nature 426: 278-281

⁵⁵ Bouchet, P.(2006) La magnitud de la biodiversidad marina. En C. M. Duarte (ed.), La exploración de la biodiversidad marina: desafíos científicos y tecnológicos. Madrid: Fundación BBVA, 2006: 32-64.

⁵⁶ Corliss, J. B et al, (1979) Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. Science 203: 1073-1083.

de las plantas, permitía la producción de materia orgánica que mantiene los ecosistemas (*ecosistemas de base fotosintética*), a partir de materia inorgánica. En estos nuevos ecosistemas llenos de vida de las fuentes hidrotermales, no eran las plantas quienes canalizaban la energía para la síntesis de la materia orgánica que alimentaba el ecosistema, sino que este trabajo lo hacían bacterias y Arqueas quimioautótrofas que sintetizan materia orgánica a partir de compuestos inorgánicos reducidos que brotan del interior de la Tierra en los fluidos hidrotermales^{57 58}. Los nuevos ecosistemas, en los que la vida prospera sin necesidad de luz, son conocidos como *ecosistemas de base quimiosintética*, en los que los microorganismos establecen relaciones simbióticas con los invertebrados. Desde su descubrimiento, en 1977, se han descrito cerca de 600 especies de organismos que los habitan.

Desde entonces se ha descubierto que otros hábitats reductores del lecho marino, que suponen un hito revolucionario en cuanto que modifican completamente nuestras ideas sobre el funcionamiento y organización de ecosistemas. Los microorganismos encontrados en las fuentes hidrotermales han supuesto también una pequeña revolución de la biología y la biotecnología, pues muchos de ellos tienen proteínas que son estables a 100°C de temperatura y que catalizan reacciones a una velocidad vertiginosa. *Pyrococcus furiosus*⁵⁹ es una especie de Archaea descubierta en fondos marinos de la isla de Vulcano (Italia) que se destaca por tener una temperatura de crecimiento óptimo de 100°C que le permite duplicarse cada 37 minutos y posee enzimas que contienen tungsteno, un elemento que rara vez se encuentra en las moléculas biológicas. A esta temperatura las polimerasas del ADN de *Pyrococcus furiosus* (Pfu ADN)⁶⁰ operan a una enorme velocidad, por lo que se utilizan a menudo en la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), que permite producir masivamente copias de fragmentos de ADN y es el fundamento de la mayoría de aplicaciones biotecnológicas que requieren secuenciación de ADN.

⁵⁷ Karl, D. M., Wirsén C. O. y Jannasch H. W. (1980). Deep-sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents. *Science* 207: 1345-1347.

⁵⁸ Jannasch, H. W. y Mottl, M. J. (1985) Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. *Science* 229: 717-725.

⁵⁹ Fiala, G. y Stetter, K. O. (1986). *Pyrococcus furiosus* sp. nov. represents a novel genus of marine heterotrophic archaeobacteria growing optimally at 100 °C. *Archives of Microbiology* 145: 56-61.

⁶⁰ Lundberg et al., (1991). A High Fidelity Thermostable DNA Polymerase Isolated from *Pyrococcus Furiosus*, *Strategies* 4:34-35.

Pero además, hay cuestiones de interés naturalístico más allá de la biodiversidad, (esto es de la variedad de organismos de un sistema) o de los hallazgos de nuevos ecosistemas, y que entroncan con la Diversidad Biológica, es decir que atienden a aspectos funcionales de las especies en los ecosistemas. En este sentido la relación entre complejidad cenótica, producción y estabilidad a perturbaciones, han sido aspectos estudiados en ecología básica por cuanto tienen de interés, no solo para entender el funcionamiento de los ecosistemas, sino para poder operar con sistemas no naturales, intervenidos o gestionados por el hombre como los sistemas agrícolas o forestales.

En este ámbito es muy destacable la investigación de David Tilman (n 1949)⁶¹. Su trabajo sobre diversidad biológica y la estabilidad pastizales (publicado en Nature en 1994⁶²) desafió el paradigma establecido y ha llevado a la disciplina a volver a examinar cómo la diversidad afecta a la productividad, la estabilidad y la eficiencia de los nutrientes de los ecosistemas. Sus experimentos campo en la estación experimental de Cedar Creek (Minnesota, USA), sobre diversidad biológica y la modelización matemática relacionada con esta, publicados en una serie de artículos en Science, Nature y otras revistas, proporcionan una base más rigurosa para la gestión de los ecosistemas y para maximizar los servicios de los ecosistemas que pueden ofrecer a la sociedad.

En estos estudios, realizados a lo largo de tres décadas partía de la hipótesis de que el funcionamiento y sostenibilidad de los ecosistemas puede depender de su diversidad biológica, en parte sobre las afirmaciones hechas por Charles S. Elton (1900-1919) por la que los ecosistemas más diversos, son más estables y por Darwin, comunidades vegetales más diversas son más productivas.

A través de experimentos realizados en diferentes pastizales naturales, orientados a establecer la relación *riqueza-producción-uso nutrientes*, encontró de forma inequívoca que la producción del ecosistema (en biomasa y cobertura) aumentó significativamente con la biodiversidad de plantas y adicionalmente que uno de los principales nutrientes limitantes (nitrógeno) era utilizado más completamente en correlación directa con la diversidad vegetal. Cuando estos experimentos, se realizaron en pastizales sembrados (147 *plots* de 3 x 3 m, con 1, 2, 4, 6, 8, 12 ó 24 especies asignados azarosamente y en cada caso 10 g m⁻²

⁶¹ Ha escrito dos libros, editados tres libros, y ha publicado más de 200 artículos, incluyendo más de 30 en Science, Nature y PNAS. El ISI lo designó como el científico más citado del medio ambiente en el mundo de la década de 1990-2000 y de 1996-2006.

⁶² Tilman, D y Downing J. (1994). Biodiversity and Stability in Grasslands. Nature 461: 363-365.

semillas) se observo claramente y de forma significativa una concatenación entre riqueza en especies, producción y mejor uso de nutrientes (menos perdidas de N por lixiviado).

Tilman y sus colaboradores también se han interesado por la estabilidad⁶³. La estabilidad de los ecosistemas tienen dos componentes: i) resistencia: capacidad de permanecer tras la perturbación y ii) elasticidad, la velocidad de recuperación tras la perturbación. En 1988 se produce una fuerte sequía en Cedar Creek, por lo que con los datos de años anteriores y los datos posteriores, se decide estudiar la resistencia a la sequía, comparando la biomasa durante la sequía con la de años antes y la capacidad de recuperación (elasticidad), comparando biomasa 4 años después de sequía. Encuentran en su análisis un aumento de la resistencia del ecosistema con el número de especies (biodiversidad) aunque parece alcanzarse una meseta a partir de 11 especies. Además encuentra que aquellos pastizales con menos de 5 especies se recuperan peor de la perturbación.

Servicios ambientales de la biodiversidad

Cada especie es el resultado de millones de años de evolución y adaptación, pero como ya se ha indicado, las especies alcanzan su sentido completo en la medida en que ocupan un lugar en los ecosistemas e intervienen en los mecanismos de regulación de los mismos. Ya hemos señalado en el epígrafe anterior, tanto al hablar de los hallazgos de biodiversidad como al comentar (como ejemplo) los trabajos de Tilman y colaboradores, que los organismos y sistemas, actúan como agentes reguladores y estabilizadores de los procesos que se dan en la biosfera, tanto a escala ecosistémica como en una escala más global. Así, autorregulan su densidad a través de procesos de competencia o de predación; son los responsables de la génesis y formación del suelo, así como los agentes que aseguran su estabilidad; actúan sobre el clima, intervienen en la circulación de la materia, en el reciclaje de la materia orgánica, e intervienen en la composición de la atmósfera.

Muchas veces resulta difícil ver todo esto... hasta que el papel regulador y de proveedores de servicios ambientales de la naturaleza gracias a la biodiversidad, desaparece o deja de funcionar adecuadamente. Esto es lo que se da con algunos de los *grandes cambios* que nuestra especie ha producido o esta produciendo en la naturaleza, afectando a los bienes (biodiversidad) y servicios ambientales

⁶³ Tilman, D., Reich, P.B. y Knops, J.M.H. (2006) Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature* 441, 629-632.

que nos brinda⁶⁴ y que autores como M. Duarte⁶⁵ han revisado fantásticamente. Veamos a continuación con algo de detalle esto que acabamos de afirmar.

El arranque efectivo de la humanidad como agente capaz de modificar procesos naturales y biodiversidad se inicia con el Holoceno, al final del último período glaciario hace unos 10.000 años, como resultado de la rápida expansión de la agricultura, la ganadería y los primeros núcleos urbanos. Los primeros indicios de esta nueva fuerza emergente son las extinciones de grandes mamíferos y aves, cazados por los primeros pobladores de islas y continentes.

El desarrollo de la agricultura y la ganadería condujo a la modificación del territorio, transformando bosques y otros ecosistemas en campos de cultivo y pastizales. Estas alteraciones territoriales se vieron favorecidas por la capacidad de trabajo que generaron la domesticación de animales de trabajo y desarrollos tecnológicos como el arado y la rueda. Pero sin duda es en el siglo XIX cuando la capacidad de la humanidad para transformar el planeta experimentó un notable impulso con la Revolución Industrial. Aumentó la capacidad de utilizar energía para transformar el planeta (generando colateralmente residuos, como gases y compuestos sintéticos, que alteran los procesos naturales).

Desde entonces el hombre ha modificado el planeta de forma sin precedentes, transformando cerca del 45% de la superficie terrestre en pastizales, que ocupan en torno al 30% de la superficie terrestre, campos de cultivo, que ocupan cerca del 10% de la superficie, y zonas urbanas que ocupan aproximadamente el 2% de la superficie terrestre. Otras infraestructuras, como embalses, carreteras, tendidos eléctricos, ferroviarios, etc., ocupan en torno a un 3% adicional de la superficie del planeta. Las zonas costeras están experimentando las tasas de crecimiento demográfico más altas del planeta. Cerca del 40% de la población humana vive a menos de 100 kilómetros de la costa, con una densidad de población tres veces superior a la de territorios continentales. Además la población costera está creciendo mucho más rápido que la continental debido a la migración, aumento de la fertilidad en las zonas costeras y aumento de los flujos turísticos a estas áreas, de tal modo que la línea de costa está siendo rápidamente ocupada por infraestructuras (como bien sabemos en España). Los humedales representan

⁶⁴ Tarazona, A. y Velichko A. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 211-272.

⁶⁵ Duarte, C. M. (2008). El jardín del edén amenazado: ecología y biología de la conservación. En *Fronteras del Conocimiento*. BBVA. 225-237

un 6% de la superficie de la Tierra y ya se han perdido más del 50% de su área en Norteamérica, Europa, Australia y Nueva Zelanda, con una extensión importante degradada en estas y otras regiones. En la cuenca Mediterránea se perdieron más del 28% de los humedales durante el siglo XX. Los bosques han sufrido pérdidas importantes que han supuesto la desaparición de aproximadamente el 40% del área forestal del planeta en los últimos tres siglos. Los bosques han desaparecido por completo de 25 países, y otros 29 han perdido más del 90% de su cubierta forestal. Aunque las áreas forestales se están expandiendo actualmente en Europa y Norteamérica, continúan perdiéndose en los trópicos a un ritmo de 10 millones de hectáreas por año, o aproximadamente un 0,5% por año⁶⁶. La intensa ocupación de la zona costera está causando importantes pérdidas de ecosistemas litorales, que están experimentando las mayores tasas de desaparición: aproximadamente un 35% del área de manglares se ha perdido, cerca de una tercera parte de los arrecifes de corales han sido destruidos y las praderas submarinas se están perdiendo a un ritmo en torno al 2-5% anual⁶⁷. No resulta difícil dimensionar el negativo impacto sobre los servicios ambientales que *daban* estos ecosistemas, derivado de lo descrito anteriormente.

Pero no solo la transformación del territorio ha alterado procesos y servicios de los ecosistemas. La actividad humana ha acelerado los ciclos biogeoquímicos de los elementos en la biosfera, que constituyen uno de los procesos centrales en la regulación del funcionamiento de este sistema y de la vida. La aceleración de los ciclos biogeoquímicos de ciertos elementos químicos afecta a todos, pero sus consecuencias son más importantes sobre aquellos que participan de procesos esenciales en la regulación de procesos vitales, como son el carbono, nitrógeno, fósforo, o el azufre. Singularmente importantes el caso de los ciclos biogeoquímicos que participan en procesos de regulación climática, como es el carbono, a través del CO₂ y el metano, o del el nitrógeno, a través del óxido nitroso.

Las transformaciones del territorio a las que antes hacíamos referencia, desde bosques a pastizales o a campos de cultivo, supone una aceleración del *ciclo de carbono*, que pasa de estar *atrapado* en biomasa de los árboles de los bosques, a reciclarse rápidamente en cosechas anuales o en la hierba de pastizales. Los suelos agrícolas tienen menor capacidad de retención de carbono que los suelos forestales, y la destrucción de humedales ha puesto en circulación el carbono retenido en estos sistemas, que son sumideros importantes de carbono. La

⁶⁶ Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and water Synthesis. Washington D.C.: World Resources Institute.

⁶⁷ Duarte, C. M. (2002) The future of seagrass meadows. Environmental Conservation. 29: 192-206.

extracción de combustibles fósiles y su uso supone igualmente una movilización *de carbono* acumulado durante épocas en las que la biosfera generaba un exceso de producción primaria.

El uso de combustibles fósiles, junto con la producción de CO₂ durante la producción de cemento, la deforestación y los incendios forestales ha significado la emisión de unas 450 Gt de CO₂ a la atmósfera, lo que ha llevado a un rápido aumento de la concentración de CO₂ (acompañada de la de otros gases con efecto invernadero, como el metano y el óxido nitroso) en la atmósfera.

El aumento de la presión parcial de CO₂ incrementará las tasas de fotosíntesis, sobre todo de organismos fotosintéticos acuáticos, ya que la enzima responsable de la fijación de CO₂ (RuBisCO, Ribulosa 1,5 Bifosfato Carboxilasa-Oxigenasa) evolucionó cuando la concentración atmosférica de CO₂ mucho mayor que la actual, y su actividad resulta relativamente ineficiente a las concentraciones actuales de CO₂. El aumento de la temperatura también contribuye al aumento de la actividad fotosintética, al acelerar todos los procesos metabólicos. Sin embargo, la respiración es un proceso mucho más sensible al aumento de temperatura y se prevé que la respiración en la biosfera, que está dominada por procesos microbianos, podría incrementarse hasta un 40% con el calentamiento previsto, mientras que la producción primaria aumentaría en torno a un 20%⁶⁸.

La actividad humana genera también un *exceso de movilización de nitrógeno*, fundamentalmente a partir de la producción anual de unos 154 millones de toneladas de fertilizantes a partir de nitrógeno gas atmosférico. Este nitrógeno se moviliza a través de su transporte en ríos, transporte atmosféricos y también por la contaminación por nitratos de los acuíferos. El transporte atmosférico permite el transporte a larga distancia del nitrógeno, que se deposita también en el océano abierto. También la producción de fertilizantes requiere de la extracción, a partir de depósitos mineros, de una cantidad de fósforo proporcional a la cantidad de nitrógeno. La aceleración de los ciclos biogeoquímicos de los elementos tiene importantes consecuencias sobre los ecosistemas, que se ven alterados a través de un proceso conocido como *eutrofización*, causado por el aporte excesivo de nutrientes a los ecosistemas, y que tiene consecuencias importantes sobre éstos.

⁶⁸ Harris, L. A., Duarte C.M, y Nixon S.W. (2006) Allometric laws and prediction in estuarine and coastal ecology. *Estuaries and Coasts* 29: 340-344.

El proceso de eutrofización, está llevando a un incremento de la producción primaria terrestre y acuática. La eutrofización conlleva el deterioro de la calidad del agua, la pérdida de vegetación sumergida, el desarrollo de proliferaciones de poblaciones de algas planctónicas, algunas de ellas tóxicas, y, cuando concurren otras circunstancias, como una pobre oxigenación de las aguas, la proliferación de fenómenos de hipoxia⁶⁹. El fenómeno de eutrofización no sólo se limita a los continentes sino que además afecta al océano abierto, para el que los aportes de nitrógeno por vía atmosférica se han duplicado, con consecuencias sin duda importantes, pero pobremente establecidas aún, sobre el funcionamiento de los océanos y su papel como proveedores de servicios ambientales.

El agua es otro preciado bien (factor limitante en ecosistemas terrestres) y cuyo ciclo (otro servicio ambiental de la naturaleza) estamos alterando⁷⁰. La humanidad usa actualmente el 50% del agua dulce disponible en la biosfera, extrayendo, en 1995, más de 3.000 Km³ de agua para irrigación de campos de cultivos. La producción de alimento, incluidos los pastizales, consume anualmente en torno a 14.000 Km³ de agua. El uso del agua por la humanidad y la transformación del territorio han resultado en importantes cambios en el ciclo del agua. Aproximadamente el 60% de las zonas húmedas europeas existentes en 1800 se han perdido. El número de embalses construidos ha crecido rápidamente durante el siglo XX, a un ritmo de un 1% anual, reteniendo un volumen de agua de aproximadamente 10.000 Km³, equivalente a cinco veces el volumen de agua contenida en los ríos.

Otro aspecto de la actividad humana que afecta al funcionamiento de los ecosistemas y por ende a sus servicios ambientales, es la síntesis de miles de nuevos compuestos químicos inexistentes en la naturaleza (llamados *xenobióticos*, ajenos a la vida) que se comportan, en muchos casos, como contaminantes novivos o tóxicos para los organismos o para nosotros mismos, y presentan actividades que interfieren con otros procesos, como pueden ser la

⁶⁹ La hipoxia supone la caída, temporal o permanente, de la concentración de oxígeno de las aguas costeras por debajo de entre 2 y 4 mg/L de oxígeno (lo que conlleva la mortalidad de muchos grupos de animales y plantas) y la liberación de fósforo del sedimento. El fenómeno de hipoxia requiere el concurso de tres circunstancias: i) un exceso de producción fotosintética que sedimenta a las aguas en contacto con el fondo marino; ii) la estratificación de las aguas, mediante un gradiente de densidad (bien debido a un gradiente térmico, o a uno de salinidad o ambos) entre las aguas superficiales en contacto con la atmósfera y las aguas costeras más profundas en contacto con el sedimento marino; esta estratificación supone una barrera a la ventilación del agua y la renovación de su contenido en oxígeno; y iii) el aumento de la respiración en la capa de agua profunda.

⁷⁰ Kulshreshtha, S.N (1998). A Global Outlook for Water Resources to the Year 2025. *Water Resources Management* 12 (3): 167-184

ralentización de determinados ciclos. Recordamos aquí los freones y halones, gases utilizados en procesos industriales y refrigeración, responsables del debilitamiento de la capa de ozono (que nos protege de la radiación UV), y que decayó aproximadamente un 4% anual durante las últimas dos décadas causando la ampliación del *agujero de ozono* sobre el hemisferio Sur. Mientras estos compuestos han sido ya controlados, y la capa de ozono se va recuperando a través del Protocolo de Montreal de 1987⁷¹, cada año siguen liberándose a la biosfera nuevas sustancias sin que existan pruebas previas que indiquen cuáles pueden ser sus impactos sobre la salud humana y la biosfera. Algunos de estos gases se comportan como gases de efecto invernadero y pueden contribuir al proceso de calentamiento global. Muchos de estos compuestos son volátiles o semivolátiles, transportándose por la atmósfera hasta lugares alejados miles de kilómetros de sus fuentes, de forma que no existe lugar en la biosfera al que no hayan llegado estos compuestos.

En este epígrafe, y de un modo u otro, hemos venido tocando tangencialmente dos asuntos que tan sujetos a controversia en la comunidad científica como fuera de ella. Además ambos asuntos son tan indesligables de sí mismos, como lo son de la discusión que generan. Nos referimos a los *gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Según algunos datos e investigaciones muy fiables^{72 73}, las emisiones de gases de efecto invernadero están causando un fuerte aumento de la temperatura del planeta, que se ha calentado ya más de 0,7°C y se prevé que pueda suponer un calentamiento de entre 2 y 5 grados adicionales durante el siglo XXI. Además del incremento de la temperatura otros componentes del sistema climático se verán igualmente afectados. Así se esperan cambios importantes en el régimen hídrico, con un aumento de la precipitación en algunas zonas del planeta, así como una disminución de la precipitación en otras y eventos extremos (sequías e inundaciones) más frecuentes y prolongados⁷¹. La

⁷¹ Amendments to the Montreal Protocol. Ozone Layer Protection . US EPA. Epa.gov. 2006-06-28. <http://www.epa.gov/ozone/intpol/history.html>. Retrieved 2011-03-28.

⁷² Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, (2007): Global Climate Projections. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

⁷³ Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden y P. Zhai. (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

intensidad del viento aumentará y se espera que eventos extremos como ciclones tropicales aumenten en intensidad y se extiendan a áreas hasta ahora libres de este tipo de fenómenos⁷¹. Aunque las previsiones son de hace unos años (2007), basa asomarse ahora en 2011 al telediario para ver noticias de sequías (cuerno de África) o de ciclones (Ásia, América), incluso fuera de zona y de época de los mismos, para confirmar aquellas previsiones.

El calentamiento global ha supuesto un aumento en el nivel de las aguas promedio de unos 15 cm durante el siglo XX, y un aumento adicional de entre 30 y 80 cm proyectado para el siglo XXI⁷⁴. El aumento de la presión parcial de CO₂ en la atmósfera y su solubilización en el océano llevan a la disminución del pH del océano, que se puede cuantificar en aproximadamente 0,15 unidades que, dado que la escala de pH es logarítmica, supone un incremento de la acidez del océano en un 60%. El aumento de la presión parcial de CO₂ previsto para el siglo XXI llevará a una disminución adicional de entre 0,3 y 0,4 unidades, lo que supone que para entonces la acidez del océano se habrá triplicado.

La acidificación del océano afecta, principalmente, a los organismos que tienen esqueletos carbonatados. Los organismos de océanos fríos son particularmente vulnerables a este proceso, de forma que es en los océanos polares donde la acidificación causará antes problemas en el desarrollo de organismos con estructuras calcificadas, dificultades que más adelante afectarán también a los organismos de mares templados y eventualmente a los organismos tropicales.

Los arrecifes de coral son particularmente vulnerables al aumento de la temperatura, pues los simbiontes fotosintéticos que contienen, y de los que dependen para un adecuado crecimiento, mueren cuando la temperatura del agua supera los 29°C, lo que ocurrirá con mayor frecuencia en el futuro. De hecho los arrecifes de coral del Sureste Asiático han experimentado recientemente episodios masivos de blanqueamiento (pérdida de zooxantelas simbiontes). Se teme que los arrecifes de coral, que además sufren las consecuencias de la eutrofización global y la acidificación del agua de mar, se encuentren entre los ecosistemas más impactados por el Cambio Global.

Puede parecer a muchos de los que escuchen o lean esta lección que aquello

⁷⁴ Bindoff, N. L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quére, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. D. Talley y A. Unnikrishnan. (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. En: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

del *Cambio Global*, suene trágico o excesivamente alarmista. Sin embargo, y como ya hemos visto en epígrafes anteriores, si algo caracteriza a la biosfera es la persistencia recurrente de *cambios globales*. Los cambios globales han dado al traste con buena parte de la biodiversidad a través de extinciones masivas, y han ido conformando y cambiando la faz del planeta, en un sistema sabiamente ordenado, y claramente organizado. Hilando esta afirmación de la autorregulación con lo que nos ocupa, parece interesante hablar en este punto de la llamada *Hipótesis Gaia*.

La hipótesis Gaia⁷⁵, también conocida como principio de Gaia (y que últimamente quiere ser una teoría), propone que todos los organismos de la biosfera y su entorno inorgánico, están estrechamente integrados para formar un sistema complejo único dotado de autorregulación (un sistema cibernético) que permite el mantenimiento de las condiciones de vida en el planeta.

Uno de los ejes vertebrados de esta hipótesis se centra en la idea de cómo la biosfera y la evolución de las formas de vida contribuyen a la estabilidad de la temperatura global, la salinidad del océano, el oxígeno en la atmósfera y otros factores de homeostasis que sustentan la vida en el planeta. En definitiva un *servicio ambiental global*. La hipótesis Gaia fue formulada por el químico James Lovelock y desarrollada por este junto a la microbióloga y bióloga evolutiva Lynn Margulis en la década de los 70s. Sus ideas fueron inicialmente recibidas con hostilidad por la comunidad científica y ha inspirado a no pocas analogías y e interpretaciones en ciencias sociales, política y religión bajo un cierto *tufillo panteísta*.

Pero centrémonos en lo que aquí nos incumbe. La hipótesis Gaia plantea que la Tierra se desarrolla a través de un sistema de retroalimentación cibernética operada por los seres vivos, lo que lleva a *la estabilización general* de las condiciones de ambientales planetarias en una homeostasis total. Muchos procesos en la biosfera son esenciales para mantener las condiciones de vida y dependen de la interacción entre diferentes formas de vida, especialmente los microorganismos, con elementos inorgánicos (p.e. los ya citados ciclos biogeoquímicos).

La hipótesis Gaia postula que la composición atmosférica de la tierra se fraguó gracias a la vida, en el origen de la biodiversidad. La estabilidad de la atmósfera de la Tierra no es una consecuencia del equilibrio químico, como en los planetas sin vida, sino que *es resultado de la actividad de los organismos*. El oxígeno es el segundo elemento más reactivo después del flúor, y tendería a combinarse con

⁷⁵ Lovelock, J.E. y Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere- The Gaia hypothesis. *Tellus* 26 (1): 2–10.

gases y minerales de la atmósfera terrestre y la corteza. Pese a ello, el aire seco en la atmósfera de la Tierra contiene aproximadamente (por volumen) 78,09% de N_2 , O_2 20,95% (nada menos), 0,93% de Ar, 0,039% de CO_2 y pequeñas cantidades de otros gases como el metano. Sin embargo, en nuestros vecinos planetarios del sistema solar (Marte y Venus), la composición atmosférica es (*grosso modo*) en un 95% CO_2

La atmósfera terrestre primitiva era una atmósfera carente de oxígeno, muy semejante sin duda a la de los otros planetas terranos, debido a su origen común y características astronómicas, de masa y de distancia al sol. Además esta atmósfera primitiva era muy reductora, y carente de ozono, por lo que la radiación ultravioleta penetraba hasta la superficie del planeta Tierra con una intensidad incompatible con la vida. Sólo en el océano, donde la radiación ultravioleta se atenúa fuertemente en profundidad, fue posible que la vida prosperase. La biota marina alteró de forma profunda la atmósfera del planeta Tierra y, con ella, las condiciones para la vida en los continentes.

En concreto, nos referimos al proceso clave de la vida en el planeta: la aparición de la fotosíntesis oxigénica, que produce oxígeno por fotólisis del agua (el proceso fotosintético característico de las plantas). En microorganismos marinos, las cianobacterias, la fotosíntesis produjo un cambio fundamental en la composición de la atmósfera terrestre, con la aparición del oxígeno y que al reaccionar con la radiación ultravioleta en la estratosfera (cerca de 12.000 m sobre la superficie terrestre), genera el ozono (O_3) que *absorbe* la radiación ultravioleta más dañina y posibilita la vida fuera del océano. Disminuyó, además, la concentración de CO_2 en la atmósfera, pues el incremento de O_2 sólo es posible por el consumo proporcional de CO_2 por el proceso de fotosíntesis, quedando el CO_2 almacenado en forma orgánica en el agua oceánica, en suelos, en organismos, detritus y depósitos de petróleo y gas. El cambio de una atmósfera reductora a una atmósfera oxidante es fundamental, condiciona completamente toda la química planetaria y con ella el funcionamiento de la biosfera y la evolución de la vida. El origen de las cianobacterias, responsables de este cambio de régimen en el planeta Tierra, que el registro fósil conocido señala como un episodio relativamente abrupto marca el hito de origen de la vida en el planeta. De hecho, la aparición de la vida en el océano transformó de forma determinante no sólo la biosfera, el océano y la atmósfera, sino también la litosfera, ya que la formación de carbonato y otros minerales por los organismos marinos es la base de la formación de muchas rocas sedimentarias.

Finalizamos este epígrafe una breve consideración, desde el punto de vista de la ecología funcional. La respuesta de los ecosistemas (donadores de servicios, contenedores de biodiversidad) a las diferentes presiones y alteraciones que hemos venido describiendo, conlleva frecuentemente, *cambios abruptos* en las comunidades, que se conocen como *cambios de régimen* y que suponen transiciones bruscas entre dos estados (por ejemplo, el paso de lagos someros dominados por vegetación enraizada en el fondo, a lagos dominados por fitoplancton con la eutrofización; fondos marinos con vegetación y fauna a fondos marinos dominados por mantos microbianos con la hipoxia). Estas transiciones se producen tras un pequeño incremento en las alteraciones, suficientes para cruzar un umbral que dispara el cambio. Las primeras especulaciones teóricas sobre *estos saltos bruscos de régimen* en el estado de ecosistemas fueron enunciadas ya finales de los 70s por el eminente ecólogo Robert May⁷⁶. Desde entonces se ha constatado que estos cambios no son la excepción, sino la respuesta más frecuente de ecosistemas sometidos a presiones⁷⁷. También se ha constatado que una vez cruzados estos umbrales que disparan el cambio de régimen es muy difícil revertir el sistema al estado anterior. De ahí la importancia de determinar la posición de estos umbrales de presiones. Lamentablemente, hoy en día parece que sólo somos capaces de identificar estos umbrales una vez que los hemos cruzado⁷⁹.

Causas de la pérdida de la biodiversidad

En el epígrafe anterior hemos visto cómo diferentes circunstancias de origen antrópico que alteran *procesos* de los ecosistemas (eventualmente de la biosfera en su conjunto), pero parece procedente tratar ahora de los que *afectan de un modo directo a la biodiversidad*.

Los *Cuatro Jinetes del Apocalipsis ambiental* es el término (dramático y algo teatral, pero en alguna medida realístico) utilizado por Miguel Delibes de Castro (adaptado a su vez del biólogo Jared M. Diamond⁸⁰), para referirse a las cuatro causas principales (derivadas de la actividad humana) responsables de la pérdida de biodiversidad. Estas cuatro causas (*ecuestres*) son las que siguen:

⁷⁶ May, R. M. (1977). Thresholds and breakpoints in ecosystems with multiplicity of stable states. *Nature*. 269: 471-477.

⁷⁷ Scheffer, M. y Carpenter, S.R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution* 18: 648-656.

⁷⁸ Andersen T, Carstensen J, Hernández-García E, y Duarte CM (2009) Ecological thresholds and regime shifts: approaches to identification. *Trends Ecol Evol*. 24(1):49-57.

⁷⁹ Strange, C. J. (2007) Facing the brink without crossing it. *Bioscience* 57 : 920-926.

⁸⁰ Diamond, J. (1989). *Conservation for the twenty-first century*. Oxford University Press, New York

1. Eliminación directa o sobreexplotación
2. Destrucción y fragmentación de los hábitats
3. Introducción de especies foráneas
4. Extinciones en cadena

Pasamos a analizar cada una y las iluminamos con algunos ejemplos.

1. Eliminación directa o sobreexplotación

La UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) atribuye a esta causa el 23% de las extinciones conocidas desde el siglo XVII. Podemos decir que en los primeros tiempos de la humanidad, tuvo más relevancia como la ya citada extinción de la *megafauna* en el holoceno, en la que debió producirse una acción sinérgica del cambio climático y del hombre como cazador muy eficiente. Además bastantes de las extinciones de grandes mamíferos o de aves coinciden con la llegada del hombre a los territorios donde se produjeron. Citemos ejemplos clásicos como El dodo o dronte (*Raphus cucullatus*) es una especie extinta de ave columbiforme (del grupo de las palomas) pero no voladora, endémica de las islas Mauricio, extinta en 1690, o el de la Vaca marina de Steller (*Hydrodamalis gigas*), un enorme sirenio de 8 metros de longitud (hasta 10 en algunos casos) y de 4 a 10 Tm, descubierta en la isla de Arachka, frente a Kamchatka. En 1768, apenas 30 años después de ser localizadas por Steller, la vaca marina fue declarada extinta.

En la actualidad los diferentes convenios internacionales (como el CITES⁸¹), han reducido drásticamente efectos adversos sobre la biodiversidad de determinadas actividades como coleccionismo o recolección con fines ornamentales o científicos, deportes de caza sin control estricto, o eliminación de especies molestas para el hombre. Quizá en el único aspecto en el que nuestra actividad resulta dolosa para la diversidad es en la pesca.

⁸¹ CITES: The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres). Se trata de un acuerdo internacional, redactado como el resultado de la resolución adoptada en 1973 en una reunión de los miembros de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Union for Conservation of Nature, IUCN). Su propósito es el de asegurar que el comercio internacional de especímenes de animales y plantas salvajes no amenace su supervivencia en su medio natural. Los acuerdos son de varios grados de protección, y cubren a más de 30.000 especies de animales y plantas. Ninguna de las especies protegidas por la CITES se ha extinguido a consecuencia de su comercio, desde que el Acuerdo entró en vigor en 1975]

Es importante considerar que la pesca es la única industria relacionada con nuestra alimentación que explota (como cuando éramos cazadores-recolectores) directamente el medio natural, a diferencia del resto que se abastecen de recursos gestionados por nosotros mismos (agricultura y ganadería).

Cundo hablamos de pesca, nos referimos al *lado oscuro* de la misma, La sobrepesca. No es la sobrepesca⁸² un fenómeno completamente nuevo, pero fue durante el siglo XX cuando alcanzó escala global. Las modalidades tradicionales de pesca (como las pesquerías artesanales de atún en el Mediterráneo) han desaparecido o lo harán casi con seguridad en los próximos años, por una doble causa: la imposibilidad de competir con los métodos industriales modernos de alta tecnología, mucho más rentables, y sobre todo la ausencia de ejemplares suficientes que permitan mantener un modo de vida que en ocasiones se habían sostenido durante siglos o milenios. La FAO estima que el 77% de las especies con valor comercial están afectadas en mayor o menor grado de sobrepesca (8% ligeramente, 17% en sobreexplotación y 52% en sobreexplotación máxima). Las capturas de pesca alcanzaron un máximo de 100 millones de toneladas en el año 2000, pero la producción disminuyó por primera vez desde 1.990, a pesar de que la capacidad pesquera no ha dejado de aumentar. Los individuos capturados son cada vez de menor calibre, y más jóvenes. La proporción de capturas en las *zonas bajas* de la cadena trófica ha aumentado (es decir, los *peces grandes* se van quedando sin *peces chicos*, aunque se capturan *peces chicos*, tal vez, porque escasean los *peces grandes*).

Los buques factoría faenan cada vez en más zonas (África occidental, Océano Índico, Océano Pacífico, etc.), pescando cada vez a mayor profundidad, capturando numerosas especies, sobre todo por culpa de redes abisales y de arrastre. Hace varias décadas se popularizó la pesca de atunes y pez espada con grandes redes de deriva, de hasta 20 Km de longitud, ya prohibidas hace años por la ONU y por la Unión Europea. La tecnificación de la pesca ha dado lugar a un aumento rápido de las capturas secundarias o colaterales. El 25% de lo pescado, es decir, 27 millones de toneladas, son descartes.

⁸² Tendencias mundiales de la situación de los recursos pesqueros marinos, 1974–2004 (2005) Serge M. Garcia, Ignacio de Leiva Moreno y Richard Grainger .FAO, Servicio de Recursos Marinos, Dirección de Recursos Pesqueros y Dependencia de Información, Datos y Estadísticas de Pesca

Según la ONU⁸³, entre un 10% y un 15% de los océanos están afectados directamente por la sobrepesca, pero con impactos que afectan o afectarán *al menos a tres cuartas partes de las principales zonas pesqueras mundiales*. Alerta la ONU que se observa ya una degradación de los océanos, que ya en 2004 había señalado más de 100 *zonas marinas muertas* en bahías, estuarios o mares interiores.

2. Destrucción y fragmentación de los hábitats

La UICN atribuye a esta causa el 36% de las extinciones desde el siglo XVII. Es el factor que contribuye de forma más acusada a la pérdida de biodiversidad en la actualidad. Nos remitimos en este sentido a la exhaustiva revisión que respecto a la destrucción de hábitats hemos realizado en el epígrafe de *Servicios ambientales de la biodiversidad*.

En síntesis, son tres las formas principales en las que los hábitats pueden verse afectados por la influencia humana: i) destrucción por desarrollo urbano e industrial o para obtención de recursos. ii) degradación por contaminación (son los ambientes acuáticos especialmente vulnerables) y iii) perturbación por las actividades humanas como el uso de la naturaleza para el ocio, el ecoturismo, e incluso la investigación ecológica.

Se podrían buscar muchos ejemplos para ilustrar este epígrafe, pero probablemente ninguno tan completo e ilustrativo como el del Mar de Aral⁸⁴.

Hace millones de años, la parte noroeste de Uzbekistán y Kazajistán meridional estaban cubiertos por un enorme mar interior. Cuando las aguas se retiraron, dejaron una extensa llanura de suelos altamente salinos. Uno de los restos del antiguo mar fue el Mar de Aral, el cuerpo de agua interior que ocupaba el cuarto puesto en extensión de los mares interiores. El Aral está alimentado por dos ríos, el Amu Darya y Syr Darya, produciéndose las salidas, obviamente, por evaporación. El aporte de agua dulce de estos dos ríos mantenían el agua del Aral y los niveles de sal en perfecto equilibrio

En la década de 1960, el gobierno de la (extinta, si, también) URSS decidió (con ese *hacer especial* de la economía planificada y sus planes quinquenales) transformar a la Unión Soviética autosuficiente en algodón. Los correspondientes funcionarios del gobierno estudiaron la cantidad de agua necesaria para

⁸³ FAO. (2011) Estadísticas sobre capturas, acuicultura y productos básicos de la pesca. url: <ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/inicio.htm>

⁸⁴ Micklin, P. (2007). The Aral Sea Disaster. Annual Review of Earth and Planetary Sciences;35:47-72.

alimentar a esos cultivos (no poca, por cierto) y se procedió a la construcción de grandes presas en los ríos Amu Darya y Syr Darya, así como un canal de más de 1000 Km con el correspondiente sistema de canales secundarios. Cuando el sistema de riego se completó, 7.5 millones de Ha se transformaron, en medio de Asia central, en un enorme sistema agrícola de regadío.

Los campos de algodón, florecieron pero con tan extensas áreas de monocultivo, los agricultores tenían que usar grandes cantidades de herbicidas y pesticidas químicos. Y con los riegos, parte de los residuos, migraban hacia el menguante mar. La evaporación con un decreciente aporte de agua por parte de los ríos Amu Darya y Syr Darya fue dando lugar a un progresivo incremento de la salinidad⁸⁵.

Continuaron las planificadas obras (el sistema soviético no *se podía equivocar*) y cuando la presa Tahaitash fue construida en el *Amu Darya*, cerca de la ciudad de Nukus, no había agua en el cauce del río que fluyese hacia el mar de Aral, a cientos de kilómetros de distancia. Para sorpresa de los habitantes de Muynak, el mar de Aral comenzó a retirarse...

El Mar de Aral era un gran ecosistema rico en ictiofauna con interés pesquero. Estas especies se cifraban en unas 20 especies, incluyendo el esturión y el pez gato. Una de las bases de la flota pesquera estaba en Muynak, un pueblo de pescadores que también atraía a turistas por sus bellas vistas del mar.

Hoy en día, Muynak es una ciudad del desierto, a más de un centenar de kilómetros del mar. El único recuerdo de la actividad pesquera, una vez próspera, son los cascotes oxidados de barcos varados en los sedimentos y una planta de procesamiento de pescado. Desde los años 60s, el nivel del agua ha disminuido en 16 metros y el volumen del mar se ha reducido en un 75%, (una pérdida equivalente al volumen de agua, que albergan los lagos Erie y Hurón). El efecto ecológico ha sido desastroso y los problemas económicos, sociales y médicos en la región, catastróficos. De las 178 especies de peces y otros organismos macroscópicos, hoy apenas sobreviven 38, incapaces de sobrevivir con la toxicidad de los pesticidas y la elevada salinidad.

Pero no solo la fauna se vio afectada. La pérdida de la lámina de agua ha modificado localmente el régimen climático⁸⁶ con una disminución considerable de las precipitaciones, y un recrudescimiento de las temperaturas, que se han hecho

⁸⁵ Bosch, K., et al. (2007). Evaluation of the toxicological properties of ground and surface-water samples from the Aral Sea Basin. *Science of the Total Environment*. 2007;374:43-50.

⁸⁶ Khan, V M., Roman M. V. y Zavialov, P.O. (2004) Long-term variability of air temperature in the Aral sea region. *Journal of Marine Systems*, 47:25-33.

más extremas en invierno y verano. Además, las tormentas de polvo salino han transportado la sal del lecho seco del mar Aral a las tierras cercanas, convirtiendo en estepas improductivas decenas de miles de km². Como resultado de todo ello, las cosechas han ido siendo progresivamente peores que ha servido para deteriorar mucho más su situación.

También las consecuencias han sido nefastas para la vida humana⁸⁷. Se han registrado un aumento de enfermedades digestivas como gastritis y diversos tipos de cáncer. Las enfermedades respiratorias, como el asma y la bronquitis, se han disparado. Un dato significativo, la mortalidad infantil es cuatro veces superior a la que se da en el resto de la ex Unión Soviética⁸⁸.

3. Introducción de especies foráneas

La UICN atribuye a esta causa el 39% de las extinciones desde el siglo XVII. Se produce por migraciones de especies denominadas *especies invasoras*. Estas especies presentan ciertos rasgos^{89, 90, 91} que pueden sintetizarse en los que siguen: i) La capacidad de reproducirse tanto asexualmente y sexualmente, ii) tasas rápidas de crecimiento, iii) reproducción rápida (con ciclos vitales sencillos y cortos), iv) alta capacidad de dispersión, v) Plasticidad fenotípica elevada, vi) tolerancia a una amplia gama de condiciones ambientales (generalistas) y vii) asociación con los seres humanos.

La dispersión de estas especies, se produce bien de forma natural, esto es por la propia capacidad de estas especies de colonizar nuevos hábitats, o bien por acción antrópica. En el primer caso, podemos hablar de un proceso natural, dado que las especies (en general) tienden a buscar nuevos hábitats donde desarrollarse, si su amplitud de nicho (su capacidad competitiva) se lo permite.

⁸⁷ O'Hara, L. S., et al (2000) Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region. *Lancet*. 355: 627-628.

⁸⁸ Ataniyazova, O.A., et al. (2001) Perinatal exposure to environmental pollutants in the Aral Sea area. *Acta Paediatrica*, 90

⁸⁹ Kolar, C.S. y Lodge, D.M. (2001). Progress in invasion biology: predicting invaders. *Trends in Ecology & Evolution* 16 (4): 199–204.

⁹⁰ Thebaud, C., Finzi, A.C., Affre, L., Debussche, M., y Escarre, J. (1996). Assessing why two introduced *Conyza* differ in their ability to invade Mediterranean old fields. *Ecology* 77 (3): 791–804

⁹¹ Reichard, S.H. y Hamilton, C.W. (1997). Predicting invasions of woody plants introduced into North America". *Conservation Biology* 11 (1): 193–203.

Cuando las especies invasoras son transportadas por el hombre, puede ocurrir que ese transporte se haga de forma intencionada⁹² para atender a necesidades de alimentación o agricultura, paisajismo, jardinería, protección de suelos, obtención de materias primas para la industria, en el caso de las plantas, o bien con fines ganaderos, recreo (mascotas) o caza, en el caso de animales, y es preciso valorar los riesgos *a priori*. Pero es sin duda más frecuente que la introducción se haga de forma involuntaria: transporte de mercancías, movimientos de tierras en las obras públicas, flujos de turistas, etc.

Sea cual fuere el mecanismo de dispersión de las especies invasoras, los efectos en los ecosistemas que ocupan, pueden resumirse en una disrupción en la dinámica y estructura de los mismos, con modificaciones de las relaciones tróficas, que en algunos casos son desastrosas. En el caso de especies invasoras animales, normalmente el problema está en que carecen estas especies de *enemigos naturales* en el sistema al que llegan y además sus presas potenciales no están adaptadas a ese tipo de depredación. En definitiva, se pierde biodiversidad en el sistema. Son muy numerosos los ejemplos a este respecto, citamos un par de ellos. La introducción accidental de la serpiente *Boiga irregularis* en Guam, una isla del Pacífico, llevó a la extinción (en muy poco tiempo) a 10 especies nativas de aves a través de la depredación de sus nidos⁹³. Otro ejemplo, en este caso de invasión biológica voluntaria de una especie, es la introducción como fuente de alimento humano de la depredadora perca del Nilo⁹⁴ (*Lates niloticus*) en lago Victoria de África oriental, que llevó a la mayor parte de sus 350 especies endémicas de peces hasta la extinción o cerca de ella. Como rasgo general, la insularidad es un rasgo del ecotopo donde se produce la invasión que propicia colapsos de biodiversidad. Sin embargo, especies muy agresivas, tienen éxito en invasiones no insulares.

Es el caso del mejillón cebrá (*Dreissena polymorpha*⁹⁵) especie invasora muy extendida en los estuarios y las aguas interiores salobres de Europa. Dentro de estos hábitats, su distribución y abundancia están limitados por la salinidad, la disponibilidad de sustratos duros, posibilidad de helada del agua, y tal vez

⁹² Ewell, J.J et al. (1999). Deliberate introductions of species: Research needs - Benefits can be reaped, but risks are high. *BioScience*, 49 (8): 619-630

⁹³ Savidge, Julie A. (1987). Extinction of an Island Forest Avifauna by an Introduced Snake. *Ecology* 68:660-668

⁹⁴ Ogutu-Ohwayo, R. (1990) The decline of the native fishes of lakes Victoria and Kyoga (East Africa) and the impact of introduced species, especially the Nile perch, *Lates niloticus*, and the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Environmental Biology of Fishes*, 27:2, 81-96,

⁹⁵ Hebert, P.D.N, Wilson, C.C., Murdoch, M.H. y Lazar, R (1991) Demography and ecological impacts of the invading mollusc *Dreissena polymorpha*. *Canadian Journal of Zoology*, 1991, 69:(2) 405-409,

la turbidez. Procede del Mediterráneo oriental, y tiene sus hábitats naturales (originarios) en los mares interiores como el Caspio, o en otros abiertos como el Negro. En el caso de esta especie, parece claro que la dispersión es accidental, a través de los cascos de embarcaciones.

El mejillón cebra se ha extendido también a América del norte⁹⁶, y podemos decir es una especie invasora que progresivamente ha ampliado su distribución a todos los posibles hábitats de latitudes medias.⁹⁷ En España, esta presente en el curso bajo del río Ebro y que está alcanzando dimensiones de auténtica plaga. Pero, además de acabar con fauna autóctona del bajo Ebro, también genera perjuicios económicos al colmatar los canales de riego, desagües, conducciones hidroeléctricas, acequias, azudes y presas.

También encontramos ejemplos (no lejanos ni en el espacio, ni en el tiempo) de plantas invasoras, tanto terrestres como acuáticas.

Uno de los casos más importante ha sido la invasión del alga *Caulerpa taxifolia* en el Mediterráneo. En 1984 en Mónaco se detecta por primera vez la presencia del alga, procedente originariamente de aguas tropicales del Mar de China y Filipinas. Su propagación se debió, al parecer, al vaciado de aguas procedentes de un acuario del Museo Oceanográfico de Mónaco⁹⁸. Desde entonces ha entrado en un proceso de fuerte expansión. En Francia e Italia el problema es muy grave y se ha detectado también en España (en las Islas Baleares) y Croacia. En Mallorca se detectó en el año 1992 en Cala D'Or y Cala'n Bosch, y posteriormente en Caló d'en Pou. Está desplazando a la flora y fauna autóctona⁹⁹, esta alga es tóxica¹⁰⁰ para la especies herbívoras Mediterráneas, por lo que constituye un grave peligro para el ecosistema. De una parte, afecta directamente a toda la vegetación y resto de algas, sobre todo a las praderas de *Posidonia* tan numerosas en el Mediterráneo.

⁹⁶ Paul D. N. Hebert, B. W. Muncaster, G. L. Mackie. (1989) Ecological and Genetic Studies on *Dreissena polymorpha* (Pallas): a New Mollusc in the Great Lakes Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 46:(9) 1587-1591

⁹⁷ Strayer, DL y Smith, LC (1993) Distribution of the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) in Estuaries and Brackish Waters. IN: Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993. p 715-727

⁹⁸ O Jousson, J Pawlowski, L Zaninetti. (1998). Molecular evidence for the aquarium origin of the green alga *Caulerpa taxifolia* introduced to the Mediterranean Sea Mar Ecol Prog Ser 172: 275-280

⁹⁹ de Villèle, X. y Verlaque, M (1995) Changes and Degradation in a *Posidonia oceanica* Bed Invaded by the Introduced Tropical Alga *Caulerpa taxifolia* in the North Western Mediterranean. Botanica Marina. 38: 1437-4323.

¹⁰⁰ Guerriero, A., Meinesz, A., D'Ambrosio, M. y Pietra, F. (1992) Isolation of Toxic and Potentially Toxic Sesqui and Monoterpenes from the Tropical Green Seaweed *Caulerpa taxifolia* Which Has Invaded the Region of Cap Martin and Monaco. Helvetica Chimica Acta.73: 689-695.

Pero al ir eliminando poco a poco esta vegetación, indirectamente también lo hace con la fauna que se alimenta o vive en dicho medio (peces, gorgonias, esponjas, erizos, y otras especies poco móviles). Actualmente coloniza más de 3.000 ha del Mediterráneo. Está incluida en la lista 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo de la UICIN.

Carpobrotus edulis (conocida como uña de gato) es una aizoacea oriunda de Sudáfrica, pero hoy día se encuentra prácticamente en todas las áreas templadas del mundo, sobre todo en las zonas costeras con ecosistemas dunares, unos sistemas, por lo demás singularmente frágiles, bellos y de enorme utilidad en el mantenimiento de franjas litorales con arena. Su carácter invasivo¹⁰¹ ha provocado dicha expansión. Una de las causas de su introducción fue su para asentar taludes en obras, por ejemplo al hacer atrincheramientos de carreteras o vía férreas. Por otra parte, es una especie muy austera y a la vez vistosa, con lo que resulta ideal desde el punto de vista de la jardinería.

El carácter invasivo de *Carpobrotus edulis* no es pernicioso por agotamiento de los suelos (de por sí áridos), sino por de imposibilitar el arraigamiento de especies autóctonas en zonas muy ricas en biomasa de esta especie alóctona. Esto es así por el desarrollo estolonífero que presenta. Pero, más allá de esta ocupación por desplazamiento de ecotopo, desplaza también por ocupar el nicho de las autóctonas. Se ha demostrado la competencia polínica: esta especie, productoras de polen en grandes cantidades, atraen selectivamente a los insectos polinizadores, que no desempeñan adecuadamente su rol ecológico con las especies menos abundantes, locales, que ven mermado su éxito reproductivo. Más allá pueden afectar no solo a otras plantas, como se ha consignado, sino también a animales¹⁰² como recientemente se ha encontrado en Galicia. Se ha observado que la proliferación de esta planta afecta a la biología de un pequeño reptil, el eslizón tridáctilo ibérico, (*Chalcides striatus*), al modificar la topografía local de sus ecotópos, dificultando aun más la viabilidad de esta especie ya amenazada.

En España *Carpobrotus edulis* se encuentra entre las especies catalogadas como invasoras¹⁰³ distribuyéndose en la práctica totalidad de nuestras costas tanto peninsulares como insulares, singularmente (pero no en exclusiva) en sistemas

¹⁰¹ D'Antonio, C.M., Odion, C.D. y Tyler, C.M. (1993) Invasion of maritime chaparral by the introduced succulent *Carpobrotus edulis*. *Oecologia*.95(1): 14-21.

¹⁰² Galán, P. (2008) Efecto de la planta invasora *Carpobrotus edulis* sobre la densidad del eslizón tridáctilo (*Chalcides striatus*) en una localidad costera de Galicia. *Bol. Asoc. Herpetol. Esp.* 19:117-121

¹⁰³ Sanz-Elorza, M, Dana, E y Sobrino, E. (2001) Listado de plantas alóctonas invasoras reales y potenciales en España. *Lazaroa* 22: 121-131.

dunares, dado que también se desarrolla en litorales rocosos y cantiles. La erradicación de esta especie, ha de realizarse por personal, como sucede con muchas otras plantas invasivas.

No finalizamos este epígrafe sin una breve reflexión respecto a los modos de erradicar las especies plaga. Es peligroso *jugar a aprendices de brujo*, como nos demuestra la cadena de introducción de especies foráneas en Australia¹⁰⁴, sobre el eje de los conejos.

Como es bien sabido, los conejos son una plaga especialmente dañina en Australia, donde se han reproducido hasta llegar a ser millones, y siguen aumentando. No hubo conejos en Australia hasta 1859, cuando un señor inglés importó apenas una docena de estos lepóridos desde Europa, para introducirlos en su hacienda. Los conejos se reproducen muy rápido y en poco más de un lustro (1865), el mencionado caballero había matado a un total de 20.000 conejos en su propiedad y calculó que quedaban todavía otros 10.000. En 1887, en Nueva Gales del Sur solamente, los australianos mataron 20 millones de conejos.

Las autoridades australianas ya no saben qué hacer con ellos para evitar la competencia que le hacen a los marsupiales como los bandicuts y ualabíes, algunas de cuyas especies ya están cercanas a la extinción. Así, la introducción del zorro rojo (*Vulpes vulpes*) se convirtió en una posible solución (el zorro come conejos *en Europa*), pero se generó un nuevo problema porque este animal se ha inclinado por cazar los marsupiales, más lentos que los conejos. El paso siguiente fue el desarrollo artificial de la mixomatosis que se ha convertido en una catástrofe para las poblaciones de conejos de otros lugares donde no son una plaga, especialmente en Europa, al saltar de nuevo al viejo continente, cepas del virus *mejoradas* en las antípodas.

4. Extinciones en cadena

Si el paciente lector ha llegado a este punto, podrá deducir con facilidad a que hace referencia esta cuarta causa de pérdida de la biodiversidad. Los sistemas naturales se sustentan por el flujo de energía. Esta es necesaria tanto para trabajos del *escenario* inorgánico (temperatura ambiental, ciclo del agua, etc) como para el sostenimiento metabólico de los organismos, esto es el componente biológico de los ecosistemas. La energía en estos últimos fluye a través del sistema de *comer*

¹⁰⁴ Pech, R.P. y G. M. Hood (1998) Foxes, rabbits, alternative prey and rabbit calicivirus disease: consequences of a new biological control agent for an outbreaking species in Australia. *Journal of Applied Ecology*. 35(3): 434-453.

y *ser comido*. Los herbívoros, comen plantas, los carnívoros, a otros animales, los omnívoros ambos, y al morir todos (animales, plantas, microorganismos) son reciclados por los detritívoros, que utilizan esa materia orgánica muerta (o residuos orgánicos) para oxidarlos y obtener energía, liberando compuestos inorgánicos. Y todo ese ir y venir de energía en forma de alimento, de materia orgánica, procede del sol cuya energía usan las plantas para sintetizar materia orgánica a partir de materia inorgánica (la fotosíntesis) con uso de agua y liberando un interesante subproducto, el oxígeno.

Como se puede apreciar, en cualquier ecosistema hay una trama de relaciones tróficas en la que todos los elementos de esa red tienen sus presas y depredadores. Además del flujo de energía, hay un efecto en las poblaciones, de tal modo que la cantidad de presa, limita el tamaño de la población de depredadores, y viceversa. Esto hace que dependan fuertemente unos de otros.

Llegados a este punto, ¿Qué sucede si eliminamos uno de los nodos de esa red? Esto se plantean (por ejemplo) Montoya, Solé y Rodríguez (2001)¹⁰⁵, haciendo una representación gráfica de la red trófica del ecosistema terrestre asociado a *Cytisus scoparius* en los alrededores de Silwood Park (Inglaterra) y otra red con el mismo número de especies y de conexiones pero distribuidos al azar. Imaginemos esta representación como una red en la que los nudos corresponden a especies y las líneas a conexiones tróficas. En el primer caso encuentran algunas (pocas) especies muy conectadas, mientras que la mayoría tienen muy pocas conexiones (muchas de ellas una sola conexión). La desaparición de una especie muy conectada provoca el aislamiento y, por tanto, la extinción de aquellas especies que dependían solamente de ella para su supervivencia. Sin embargo, para el grafo aleatorio la distribución de conexiones por especies resultante es de tipo Poisson.

Ecología y biología de la conservación: claves de nuestro futuro

La constatación de la pérdida de biodiversidad (y ecosistemas) tanto a escala local como global, ha impulsado una intensa actividad de investigación en los últimos veinte años para evaluar las consecuencias de las extinciones, el papel de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas y, eventualmente, los beneficios que la biodiversidad reporta a la sociedad, tal y como hemos tratado de ir dibujando hasta este punto. A la vez, un mayor conocimiento de la biología de las especies ha permitido mejorar las posibilidades de conservarlas.

¹⁰⁵ Montoya, Solé y Rodríguez (2001). La arquitectura de la naturaleza: complejidad y fragilidad en redes ecológicas. *Ecosistemas* 10 (2).

Mediante no pocos de experimentos a gran escala se ha podido verificar que, en general, una mayor biodiversidad se corresponde con una mayor producción biológica, un reciclado de nutrientes más eficiente y una mayor resistencia de los ecosistemas frente a perturbaciones⁶²⁶³¹⁰⁶. Se han valorado los bienes y servicios que los ecosistemas reportan a la sociedad, estimándose el valor añadido de estos bienes y servicios (provisión de alimento, depuración de aguas, reciclado de nutrientes, regulación de los gases atmosféricos y el clima, polinización, control de patógenos y sus vectores, etc.) en más del doble del producto bruto de todas las naciones¹⁰⁷. La pérdida de estas funciones por el deterioro de los ecosistemas y pérdida de biodiversidad supone una reducción del capital natural que conlleva un grave impacto económico y la pérdida de nuestra calidad de vida.

La Convención para la Diversidad Biológica¹⁰⁸, firmada en Río de Janeiro en 1992 por la mayor parte de las naciones, supone una reacción frente a esta crisis de biodiversidad. Los países firmantes parten del reconocimiento del valor intrínseco (naturalístico) de la biodiversidad y su importancia para mantener los *sistemas de soporte vitales*¹⁰⁹ de los que depende la sociedad, y de la evidencia de que la biodiversidad está siendo erosionada por la actividad humana. La Convención persigue asegurar la conservación de la biodiversidad en el planeta y la distribución equitativa de la riqueza que su uso genera. Uno de sus objetivos es llegar a proteger un 10% de la superficie del planeta. Con este impulso, las áreas protegidas han proliferado y, aunque en tierra se acercan poco a poco a este objetivo, en el océano aún permanecen muy lejos de él.

La protección de la naturaleza se complementa en esta convención con medidas de protección especial de especies en peligro. Muchas de éstas son especies carismáticas para cuya conservación no se escatiman esfuerzos a través de planes de reproducción cada vez más sofisticados y costosos, que incluyen ya la consideración de la aplicación de avances en técnicas de clonación¹¹⁰ para

¹⁰⁶ Schwartz, M. W., C. A. Brigham, J. D. Hoeksema, K. G. Lyons, M. H. Mills y P. J. Van Mantgem. (2000) Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia* 122: 297-305.

¹⁰⁷ Costanza, R., R. D'arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg et al. (1988). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.

¹⁰⁸ Url: www.cbd.int

¹⁰⁹ Así llamados a los servicios ambientales por el ecólogo Eugene Odum en *Ecology and our endangered life-support systems* (1989) Eugene P. Odum. Sinauer, Stanford, CT, 283 pp.

¹¹⁰ La clonación es una técnica que se desarrolló en primer lugar usando anfibios y que podría contribuir a la conservación de estos organismos, que se encuentran en una grave situación de riesgo de extinción, véase Holt, W. V., Pickard A.R. y Prather, R.S.. (2004). *Wildlife conservation and reproductive cloning*. *Reproduction* 127: 317-324.

su conservación. Otra iniciativa ha sido la inauguración, en una isla noruega del Ártico, de la *Bóveda Global de Semilla de Svalvard*, un banco mundial ⁴³ que preserva semillas de especies de interés agrícola de todo el mundo frente a posibles catástrofes. Tanto esta infraestructura como el riesgo al que atiende pertenecían, hasta hace poco, al ámbito de la *ciencia ficción catastrofista*.

Tanto la pérdida de ecosistemas como las extinciones, la pérdida de biodiversidad progresa imparable, a pesar de los avances en la protección de áreas naturales y la conservación de especies concretas. Es cada vez más claro que las áreas protegidas o los esfuerzos de conservación de especies individuales sólo pueden entenderse como *soluciones parciales* frente a los impactos responsables de la pérdida de ecosistemas y biodiversidad, y que han de completarse con otras estrategias y técnicas. Es necesario comprender mejor las causas de las pérdidas de especies, la relación entre las distintas presiones que las provocan, la posibilidad de *efectos dominó* en las extinciones de especies¹¹¹ y la relación entre el deterioro de ecosistemas y pérdida de biodiversidad para poder así formular estrategias de conservación más efectivas. Un mayor conocimiento de las bases de la resistencia de los ecosistemas frente a presiones es imprescindible para actuar directamente, reforzar esta capacidad de resistencia y para, cuando los impactos ya se han producido, catalizar y reforzar la capacidad de los ecosistemas y especies para recuperarse.

Formular y plantear nuevas estrategias de conservación debe yacer en el progreso del conocimiento científico, pero no es suficiente. El éxito de cualquier estrategia pasa por la reducción de las presiones derivadas de la actividad humana. Nuestra sociedad está actuando de forma irresponsable, erosionando y dilapidando la base de capital natural de la Creación que nos ha sido dado para gestionarlo y sobre el que se asienta nuestra calidad de vida presente y el futuro de la humanidad.

Por tanto, el conocimiento científico ha de ir más allá del ámbito de la comunidad científica para informar a la sociedad, que los ciudadanos estén mejor informados y así seamos más responsables, conscientes del deber moral y ético que tenemos hacia la naturaleza. Es imperativo, por tanto, traspasar las fronteras del conocimiento y las que lo separan de nuestra sociedad.

¹¹¹ Rezende, E. L., Lavabre, J. E., Guimarães, P. R., Jordano, P.J. Bascompte J. (2007). Non-random coextinctions in phylogenetically structured mutualistic Networks. *Nature* 448: 925-928

Agustín Probanza Lobo, (Madrid, 1967), está casado y tiene dos hijos. Es profesor Agregado del Departamento de Biología de la Facultad de Farmacia de la Universidad CEU San Pablo. Doctor en Ciencias Biológicas (Departamento de Ecología) por la Universidad Complutense de Madrid (1994). Entre 1996 y 1997 realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Ecología Microbiana de la Universidad de Lund (Suecia), becado por la Comisión Europea.

En la actualidad su labor docente se centra en Biología General y ha impartido docencia en Ecología General, Ecología Microbiana (sus especialidades de Doctorado), Fisiología Vegetal y Botánica (su especialidad de Licenciatura). Su labor investigadora se ha desarrollado en Ecología Microbiana, tanto en aspectos básicos (Ecología de la rizosfera), como aplicados (mejora de la producción vegetal mediante interacción planta-microorganismo). En este contexto ha dirigido tres tesis doctorales. Ha participado en ocho proyectos de investigación con financiación pública, siendo IP en uno de ellos. Ha asistido y presentado más de ochenta comunicaciones en congresos científicos nacionales e internacionales y ha publicado más de cuarenta artículos en revistas científicas, varios capítulos en libros y un libro, como coautor. Así mismo es coautor de una patente y participa como *referee* de revistas internacionales y como evaluador externo de algunas agencias de calidad.

En cuanto a su labor como gestor universitario, ha desempeñado el cargo de Vicedecano de la Facultad de Ciencias Experimentales y de la Salud (de marzo de 2002 a septiembre de 2004), Decano de la Facultad de Farmacia (desde septiembre de 2004 hasta junio de 2008), Vicerrector de Ordenación Académica y Profesorado (curso 2008-2009) y Vicerrector de Ordenación Académica y Posgrado (desde el curso 2009 hasta junio del 2011). En los tres últimos cargos (2004-2011) ha vivido muy de cerca todo el complejo proceso de adaptación de las enseñanzas al EEES (grados y posgrados) tanto en la cercanía de su Universidad, como con una vista global del panorama nacional universitario.