

La COEVOLUCIÓN y las ENSEÑANZAS de Darwin

Rodolfo Dirzo
Universidad de Stanford

John N Thompson
Universidad de California en Santa Cruz

El concepto de *coevolución*, que era parte de la visión de Darwin, se convirtió en un pilar de la biología evolutiva. La coevolución es un fenómeno omnipresente en la Tierra y sin duda determinó el curso de la vida en el planeta.



Fotografía de una mariposa monarca (*Danaus plexippus*) sobre una flor púrpura sin identificar.
Derek Ramsey, Wikipedia Commons.

Es un hecho notable y ampliamente conocido que la primera edición de *El origen de las especies* generó tanto interés que se agotó de manera inmediata. Darwin y quienes pronto siguieron su senda, que pusieron a prueba las premisas y confirmaron las ideas contenidas en ese libro, argumentaron en forma convincente que la vida en la Tierra había evolucionado en forma continua: las especies dieron lugar a otras nuevas y ello desencadenó una gran diversidad biológica.

El gran aporte intelectual de Darwin fue definir el proceso que subyace en la evolución: la *selección natural*. Tenía claro que, a medida que las especies se multiplicaban, la diversificación impulsaba aún más diversificación, pues ellas interactúan: compiten por recursos, algunas se convierten en depredadoras de otras, o se establecen relaciones de simbiosis entre ellas. Por lo general combinan varios de esos tipos de interacciones.

En suma, las especies no solo evolucionan, sino que *coevolucionan*. Como escribió Darwin en el último párrafo del *Origen*:

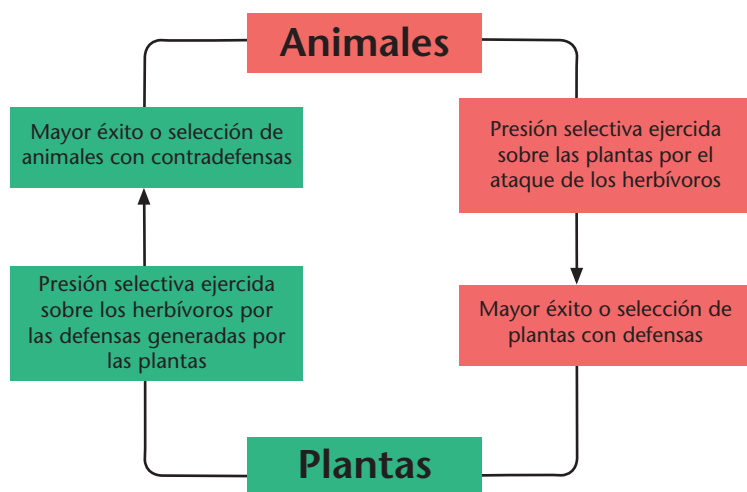
Es interesante contemplar un enmarañado barranco, cubierto por muchas plantas de múltiples clases, con aves que cantan en los matorrales, con variados insectos que revolotean y con gusanos que se arrastran entre la tierra húmeda, y reflexionar que esas formas elaboradamente construidas, tan diferentes entre ellas, y que dependen unas de otras de una manera tan compleja, han sido todas producidas por leyes que obran a nuestro alrededor. [It is interesting to contemplate a tangled bank, clothed with many plants of many kinds, with

birds singing on the bushes, with various insects flitting about, and with worms crawling through the damp earth, and to reflect that these elaborately constructed forms, so different from each other, and dependent upon each other in so complex a manner, have all been produced by laws acting around us.]

Estas líneas, tan citadas, revelan que el concepto de coevolución era parte de la visión de Darwin. Su elaboración posterior lo convirtió en un pilar de la biología evolutiva y del estudio de la evolución, como trataremos de explicar en este ensayo. La enmarañada trama de la vida es más compleja e interconectada de lo que Darwin se hubiese imaginado hace ciento cincuenta años. La coevolución es un fenómeno omnipresente en la Tierra y sin duda determinó el curso de la vida en el planeta.

El concepto de coevolución

Algunas nociones de ecología básica ayudarán al lector a entender este importante concepto. En el medio natural en el que viven los organismos actúan factores abióticos y bióticos. Los primeros son de índole físico-química y entre ellos ocupan una posición prominente el clima, así como, sobre todo para las plantas, el suelo; los segundos están compuestos por la constelación de seres vivos encontrados en cualquier lugar. Esta dis-



Esquema general del proceso de coevolución de plantas y herbívoros. Los animales que se alimenten con determinadas plantas pueden ejercer una presión selectiva sobre estas, la cual influirá en sus poblaciones por el camino de la selección natural: si se produjeran variaciones genéticas que alterasen determinados rasgos de las plantas, por ejemplo sus defensas mediante la producción de un alcaloide tóxico, y si esas variaciones afectaran diferencialmente la adecuación de las plantas a su medio y fueran heredables, se difundirían (o seleccionarían) plantas con esos rasgos defensivos. Las plantas con esas defensas, por su parte, ejercerían presión selectiva sobre los herbívoros, ya que entre estos se difundirían (o seleccionarían) aquellos animales capaces de contrarrestar los mecanismos defensivos de las plantas, por ejemplo, por producir alguna enzima que los destoxifique del alcaloide. Ese ciclo de evolución recíproca o coevolución se repetiría sucesivamente.

tinción es importante para la coevolución, pues los dos tipos de factores ejercen presiones selectivas diferentes, conducentes a respuestas cualitativamente distintas.

Tomemos el hipotético caso de una especie vegetal sujeta en forma prominente a un factor climático, como la incidencia de heladas invernales. Ante el desafío que estas representan para su supervivencia y reproducción, ya que eliminan todo su tejido aéreo durante el invierno, sobrevivirán (o, en términos más técnicos, *se seleccionarán*) las variantes de la especie cuyas mutaciones genéticas las doten de una característica —por ejemplo, un bulbo subterráneo protegido de las heladas— que les permita pasar el invierno o invernar y, al regresar la estación favorable, regenerar el tejido aéreo. Podríamos decir que la selección natural lleva a que la planta responda a un desafío del ambiente abiótico mediante una *respuesta definitiva*: una estructura subterránea que le permite casi siempre sobrevivir a las heladas.

Supongamos, además, que en lugar o en adición a las heladas las plantas tienen que habérselas con un desafío impuesto por otros seres vivos, por ejemplo, insectos fitófagos u otros animales herbívoros que devoren su tejido aéreo. Una consecuencia de esto, de la misma clase que la señalada para las heladas, podría llevar a que se seleccionen variedades de las plantas que produzcan una sustancia —digamos un alcaloide— que impida el ataque del herbívoro.

El alcaloide, sin embargo, podría no ser una respuesta definitiva, como se esquematiza en la figura, pues en los herbívoros también se podría producir un proceso semejante: las plantas tóxicas operan como presión selectiva sobre los animales, en los cuales la variación genética y la selección natural llevan a que se seleccionen individuos capaces de resistir el alcaloide, por ejemplo, por producir una enzima que los destoxifique.

Si esto aconteciera, las plantas se verían ante un nuevo ciclo selectivo, por el que se difundirían variedades dotadas de características adicionales que desalienten o impidan el ataque del herbívoro, tal vez mediante una forma más tóxica del mismo alcaloide o mediante un alcaloide distinto, a lo que el atacante también podría responder consecuentemente. Esta sucesión de presiones selectivas recíprocas, que dan lugar a repetidas respuestas adaptativas de las especies interactuantes, define, en esencia, el proceso de la coevolución.

La descripción anterior se aplicaría a muchas otras circunstancias, tanto de antagonismo o rivalidad como de cooperación o mutualismo entre especies, por ejemplo, plantas que interactúan con animales depredadores de semillas, o con animales que operan de polinizadores. En este último caso, los cambios evolutivos recíprocos y no definitivos podrían llevar a flores crecientemente atractivas para los polinizadores, y a animales con rasgos anatómicos o de conducta que les permitan acceder con creciente eficacia a las partes reproductivas de esas flores.

El concepto de coevolución fue establecido por dos grandes biólogos evolucionistas de nuestro tiempo, Paul Ehrlich, de la Universidad de Stanford, y Peter Raven, del Jardín Bo-

tánico de Missouri, quienes en 1965 publicaron un estudio ('Butterflies and plants: A study in coevolution', *Evolution*, 18:586-608) que describió, por primera vez, la evolución recíproca de mariposas (cuyas larvas son herbívoras) y plantas (cuyo follaje es el alimento primordial de las larvas), en parte responsable de la actual exuberancia de especies de ambos grupos. El recuadro 'Mariposas y plantas: un estudio de coevolución' reseña la génesis de ese artículo trascendental, descrita por los propios autores del concepto.

La coevolución y el funcionamiento de los ecosistemas

A medida que la ciencia fue incrementando su entendimiento del proceso evolutivo, sobre todo en las últimas décadas, aprendió que la evolución, en gran medida, es coevolución de especies. Todos los organismos complejos, e incluso los organismos multicelulares más simples, requieren de una o más especies interactuantes para sobrevivir y reproducirse, como se puede ilustrar con algunos ejemplos.

Además de los genes alojados en los núcleos de cada una de nuestras células, los animales albergamos ADN en las mitocondrias, que cumplen muchas funciones celulares y son, en realidad, bacterias ancestrales que han terminado convertidas en huéspedes obligados de nuestros cuerpos. Así, por interacciones ecológicas de coevolución, dos especies ancestrales quedaron establemente asociadas. Esto no suele ser apreciado, porque no estamos acostumbrados a concebir las mitocondrias como organismos independientes que dejaron de serlo.

Las plantas son aun más complejas, ya que no solo tienen mitocondrias sino, además, cloroplastos. Estos son microbios fotosintéticos ancestrales que, igualmente, se han vuelto partes simbióticas obligadas de los vegetales. De hecho, las plantas son el resultado de la coevolución de por lo menos tres entidades evolutivas ancestrales, pues además de las mitocondrias y los cloroplastos, la gran mayoría depende, para capturar nutrientes del suelo, de hongos llamados *micorrízicos*, asociados con sus raíces. Los hongos intercambian nutrientes con las plantas y la combinación hongo-raíz forma una estructura generada por la interacción coevolutiva de la que ambos descienden.

Muchas plantas dependen para reproducirse de animales polinizadores, los que a su vez dependen de lo que obtienen de la planta para alimentarse, como néctar o polen (llamado en este contexto *recompensas*). Otros animales son dispersores de semillas de plantas, las que también les proporcionan alimentos, por lo común bajo la forma de frutos comestibles en cuyos carozos (no digeribles) están las semillas, que son diseminadas por deposiciones o regurgitaciones de esos animales.

Muchas plantas tropicales han evolucionado en el sentido de adquirir adaptaciones, como troncos huecos, que les

permiten albergar colonias de hormigas, a las que también nutren mediante la producción de azúcares o lípidos en estructuras especializadas. Las hormigas, por su conducta gregaria, rápida capacidad de reacción y agresividad, defienden el follaje de su hospedero del ataque de herbívoros.

Así, una planta típica interactúa o interactuó a lo largo de su historia evolutiva con por lo menos otras cuatro o cinco especies. No es difícil comprender que, por ejemplo, la selva tropical de una región podría destruirse en el lapso de apenas una generación con la eliminación de todos los polinizadores, que quitaría a las plantas la capacidad de reproducirse y ello iniciaría la pérdida en cadena de otros organismos y de los procesos que mantienen en actividad al ecosistema.

Algo parecido ocurre con los animales. Los genes que los animales heredan de sus progenitores son insuficientes para permitirles la digestión de los alimentos que consumen. El sistema digestivo de la mayoría de los animales incluye comunidades complejas de microbios, coevolucionados con ellos, que aportan enzimas capaces de fraccionar los alimentos ingeridos y de convertirlos en sustancias químicas digeribles. Estudios recientes que han investigado la diversidad de microorganismos presentes en el tracto digestivo humano revelaron que albergamos una enorme variedad de especies de ellos, de la que dependemos para sobrevivir. Incluso organismos aparentemente simples, como las termitas, que se alimentan de madera seca y constituyen algunos de los insectos más abundantes en ambientes tropicales, se pueden nutrir solo gracias a que hospedan microbios que producen celulasa, una enzima capaz de descomponer la celulosa de la madera.

De este modo, los ecosistemas principales de la Tierra y los procesos ecológicos que los caracterizan descansan en esas y otras interacciones coevolutivas. Si consideramos los procesos llamados de *sucesión primaria*, que consisten en la colonización inicial por seres vivos de un sitio desprovisto de ellos (por ejemplo, porque las comunidades naturales fueron destruidas por una erupción volcánica), advertiremos que se inicia con algunos líquenes que se establecen sobre rocas estériles y permiten la gradual formación de un sustrato capaz de sustentar otras plantas. Esto lleva a la formación de suelos, que serán colonizados por otras plantas, y así sucesivamente hasta terminar con una pradera, un bosque o una selva, es decir, una *comunidad clímax*.

El proceso coevolutivo es crucial desde antes mismo del inicio de lo descrito, porque cada uno de los líquenes resultó de la coevolución de un hongo y una alga. Similarmente, comunidades del ámbito marino, como los arrecifes coralinos, están constituidos por corales que también resultaron de la coevolución con diversos organismos llamados *dinoflagelados*. El denominado *blanqueo de los corales*, un fenómeno originado en la contaminación marina que actualmente afecta a los arrecifes, resulta en parte de la disolución de las interacciones coevolutivas de las especies que los forman.

Las interacciones coevolutivas de tipo cooperativo o mutualista analizadas no son más prominentes que las de naturaleza rival o antagónica. De hecho, todas las especies están empeñadas en una lucha coevolutiva sin tregua con parásitos. Cada especie es agobiada por una retahíla continua de ellos. La especie humana se enfrenta con más de 1400 especies conocidas de parásitos, situación que no resulta inusual en el mundo natural. Las bacterias mismas son objeto de ataque por parte de virus, que traspasan su pared celular y aprovechan el genoma bacterial para reproducirse. El parasitismo es un estilo de vida tan exitoso que hay más especies de parásitos que de otras formas de vida.

Geografía y coevolución

Casi todas las especies se caracterizan por incluir conglomerados de poblaciones genéticamente diferentes que, en mayor o menor grado, se mantienen interconectadas. Esto es importante para la coevolución, debido a que cada población tiene el potencial de adaptarse no solo a su ambiente abiótico sino, también, a su medio biótico, es decir, al conjunto de especies con las que puede establecer vínculos de mutua colaboración, de competencia o de depredación. El resultado es el mosaico geográfico de la coevolución, en el que una especie puede adquirir rasgos adaptativos que le permitan interactuar con otras de cada población y localidad.

A medida que el estudio de la coevolución ha venido avanzando en los últimos años, se ha hecho cada más evidente que se trata de un proceso continuo, que redefine cómo las especies interactúan entre ellas en cada localidad, según se apreciará en algunos ejemplos.

En zonas áridas del centro y norte de Chile, algunos cactus son atacados por muérdagos parásitos que les extraen nutrientes. Las calandrias (*Mimus thenca*, allí conocidas como *tencas*) consumen los frutos de los muérdagos, que contienen sus semillas pero, como no las digieren, estas terminan sobre los cactus en cuyas espinas se posan las aves, por la vía de sus deposiciones. Algunas poblaciones de cactus han desarrollado espinas muy largas, posiblemente como forma de defensa de los muérdagos (además de ser una adaptación al ambiente árido). Con espinas inusualmente grandes, las radículas de los muérdagos recién germinados sobre las espinas tienen dificultad en alcanzar el tallo de la planta para insertar en él sus raíces e implantarse como parásitos. Siguiendo el esquema de la figura, es razonable pensar que tales espinas alargadas ejercen presión selectiva sobre los muérdagos, por lo que estos, como parte del proceso de selección natural, desarrollaron radículas también inusualmente prolongadas. El resultado de esta interacción cacto-muérdago-calandria permite, por así decirlo, apreciar la mecánica de la coevolución.

Casi en las antípodas, en el Japón, los frutos y las semillas de una especie de camelia (*Camellia japonica*) son ata-

cados por gorgojos que tienen trompas extremadamente largas. El tamaño del fruto y la longitud de las trompas varían considerablemente en diferentes partes del Japón, como resultado de un proceso coevolutivo que se despliega en diferentes poblaciones. Similarmente, en Europa y Norteamérica, las piñas de las coníferas y los picos de las aves que extraen las semillas de piñas inmaduras varían en una serie de características de acuerdo con un patrón geográfico, lo que sugiere una similar historia coevolutiva.

En otro tipo de situaciones, se ha documentado en Sudáfrica y el Caribe considerable variación geográfica en el tamaño y la forma de las flores de ciertas especies, junto con la variación en los aparatos bucales de sus polinizadores. En este caso, la coevolución ha empujado hacia una convergencia en vez de una divergencia de los rasgos relacionados con la interacción entre plantas y polinizadores.

Otras interacciones entre animales y plantas no son tan fáciles de documentar como las anteriores, porque los rasgos que las permiten resultan menos visibles, pues, por ejemplo, se trata de defensas químicas de las plantas y contradefensas de los animales, pero operan de maneras similares a las señaladas. Por ejemplo, el trébol blanco (*Trifolium repens*), al parecer natural de Europa y hoy cultivado globalmente, puede liberar ácido cianhídrico como mecanismo de defensa de los herbívoros que lo consumen.

Estudios realizados en los últimos años documentaron la interacción coevolutiva de esas plantas con babosas o moluscos terrestres de varias especies, que los consumen pero prefieren los tréboles carentes genéticamente de capacidad cianogénica. Esos estudios también identificaron los mecanismos químicos, tanto en los tréboles como en las babosas, por los que avanzó la coevolución de las dos especies, y pusieron de manifiesto que los tréboles capaces de producir ácido cianhídrico predominan en regiones cercanas al Mediterráneo, en las que las temperaturas medias invernales son relativamente altas y favorables a la multiplicación de las babosas, en comparación con, por ejemplo, Escandinavia, donde estas prosperan menos y los tréboles tienden a carecer de la capacidad cianogénica. En regiones intermedias, como Gran Bretaña, se verificó una proporción de aproximadamente 50% de plantas cianogénicas.

Hoy sabemos que los mosaicos geográficos coevolutivos pueden desarrollarse en tiempos notablemente breves. La investigación del comportamiento de especies introducidas de un continente a otros revela cambios coevolutivos que tuvieron lugar en lapsos de menos de ciento cincuenta años. Por ejemplo, la pastinaca o chirivía (*Pastinaca sativa*, relacionada con la zanahoria, cuya raíz se emplea como hortaliza) fue llevada en el siglo XVII de Europa a Norteamérica, donde se hizo silvestre y en el medio oeste se convirtió en importante maleza invasora. Hacia la mitad del siglo XIX, se llevaron a Norteamérica unas orugas de la especie *Papilio polyxenes*, que son los principales enemigos naturales de la pastinaca. Desde entonces se ha podido apreciar la secuencia de la

MARIPOSAS Y PLANTAS: UN ESTUDIO DE COEVOLUCIÓN

Relato realizado por Paul Ehrlich y Peter Raven
a Rodolfo Dirzo y John Thompson

El inicio de nuestro estudio de la coevolución de plantas y mariposas se remonta a una charla de café que tuvimos en la Universidad de Stanford, en 1962. En ella, uno de nosotros (Paul Ehrlich) le comentó al otro (Peter Raven) cuán extraño le resultaba que las plantas con las que se alimentaban las larvas de las mariposas de la especie *Euphydryas editha*—que estaba estudiando en detalle en la reserva biológica de Jasper Ridge, aledaña al campus— pertenecieran en gran medida a dos especies de aspecto muy diferente: *Castilleja densiflora* (polinizada por animales, en ese entonces considerada integrante de la familia *Scrophulariaceae*) y *Plantago erecta* (anemófila o polinizada por el viento, de la familia *Plantaginaceae*).

En términos botánicos esto tenía perfecto sentido, ya que las *Plantaginaceae* son plantas anemófilas derivadas de las *Scrophulariaceae*: de hecho, hoy ambas especies se consideran integrantes de la familia *Plantaginaceae*.

A partir de ese momento inicial, que se nos presentó como uno de revelación o de *eureka*, nos dimos cuenta de que la predilección de ciertas plantas por parte de larvas de mariposas podría proporcionar interesante información acerca de las relaciones evolutivas de ambos grupos. Así, comenzamos a tener discusiones diarias, en las que Paul, como entomólogo, describía las maneras cómo las mariposas se alimentan de plantas y Peter, como botánico, trataba de descubrir el sentido de esas relaciones desde la perspectiva de las plantas.

Después revisamos a fondo la bibliografía, en busca de datos sobre qué plantas eran comidas por cuáles orugas, y qué características comunes podían tener. La dieta de orugas estaba mejor documentada que la de cualquier otro gran grupo de las alrededor de quince mil especies de herbívoros. Lo que se conocía sobre las plantas que sirven de alimento a orugas de cerca de la mitad de los géneros de mariposas se debía, sobre todo, al interés de aficionados en busca de especímenes perfectos para sus colecciones. No

pasó mucho tiempo antes de que nos diéramos cuenta de que los llamados *compuestos secundarios* de las plantas tenían un cometido mayor en determinar la naturaleza de las interacciones.

De ahí en adelante, fue una cuestión de intercambio creativo de ideas entre dos colegas cercanos, ambos evolucionistas, uno con experiencia en mariposas y el otro en plantas. Trabajamos con creciente entusiasmo y emoción, ya que sospechábamos que la coevolución había sido, por lo común, menospreciada. Los zoólogos tendían a ver las plantas casi como parte del ambiente físico o del contexto ambiental; muchos parasitólogos no consideraban la evolución de los hospedadores de los organismos que estudiaban, y así por el estilo.

Cuando llevamos el análisis de los hábitos alimentarios de las larvas de mariposas lo más lejos que pudimos, concluimos que las relaciones que advertíamos nos indicaban la existencia de una carrera escalonada de coevolución gradual entre los miembros de ambos grupos. En el curso de ella, algunas plantas adquirieron la habilidad de producir metabolitos secundarios que las protegieran de los herbívoros dominantes en ese momento evolutivo, y luego ciertos grupos de mariposas desarrollaron la habilidad de tolerar esos compuestos químicos, e incluso de adoptarlos como estímulo para su alimentación.

Con esas capacidades, las mariposas se abrían las puertas hacia una nueva fuente de alimento, y se convertían en especialistas en el grupo de plantas en cuestión. Dichos herbívoros especializados adquirieron la habilidad de secuestrar las moléculas generalmente venenosas de las plantas (por ejemplo, los glucósidos cardíacos que protegen a las plantas de la familia *Apocynaceae* de la mayoría de los herbívoros) o de descomponer y desactivar esas moléculas (por ejemplo, los glucosinatos del aceite de mostaza presentes en plantas de las familias *Capparaceae*, *Brassicaceae* y algunas otras).

En el primero de esos casos, como los insectos mismos se habían vuelto venenosos debido a los compuestos que pasaron a almacenar, con frecuencia se convirtieron en modelos de mimetismo y adquirieron una coloración de advertencia. Eso sucede, por ejemplo, con las mariposas monarca y sus parientes cercanos, así como con un conjunto de insectos brillantemente coloreados, pertenecientes a diversos órdenes zoológicos, y que se alimentan de hojas de plantas de la familia *Apocynaceae*, cada uno protegido de sus propios predadores.

Nuestro artículo de 1965, citado en el texto, tuvo cierta repercusión porque constituyó la primera exposición detallada de la relación evolutiva de dos grandes grupos de organismos ecológicamente ligados de manera estrecha, y porque dio al término *coevolución* un uso mucho más extendido que hasta ese momento. Aunque muchas de las ideas que enfatizábamos pueden descubrirse en los escritos de Darwin, y a pesar de que otros investigadores sugirieron que ciertas sustancias de las plantas tenían naturaleza defensiva, nadie había trazado un panorama de ese tipo ni discutido sus múltiples implicancias. Por esas razones, el artículo ayudó a poner en marcha el ahora vasto campo de estudio de la coevolución de plantas y herbívoros, y a generar interés en el proceso de coevolución en general.

Como era de esperar, determinadas ideas de nuestro artículo fueron criticadas, y algunas estaban probablemente equivocadas. Sin embargo, el escrito parece haber estimulado el pensamiento de mucha gente. Este es el artículo más citado que cualquiera de los dos haya publicado, pero no es eso lo que más nos interesa. A diferencia de nuestros otros trabajos, este fue hecho totalmente en una mesa de café y en la biblioteca: ninguno de los dos miró un organismo, vivo o muerto, en el transcurso de su elaboración. Ambos disfrutamos plenamente de nuestra interacción al producirlo, hemos seguido siendo colegas científicos y, desde entonces, muy buenos amigos.

coevolución, por la que las plantas produjeron compuestos químicos que las defiendan de los insectos herbívoros o fitófagos, y estos las enzimas necesarias para contrarrestar los efectos de esos compuestos. Estos procesos recientes permiten hablar de *coevolución contemporánea*.

¿Por qué es importante entender la coevolución?

En tiempos en que todos los ecosistemas naturales sufren profundos cambios debido a la actividad humana (o *cambios antropogénicos*), por deforestación, desplazamiento de especies a regiones e incluso continentes a los que son ajenas, contaminación, cambio climático y por la combinación de todos esos factores, es previsible que ocurran alteraciones rápidas e impredecibles en los mecanismos de coevolución.

Dado que estos patrones y procesos de coevolución están siempre presentes, a través del espacio y del tiempo, un desafío prominente para la humanidad actual que sigue alterando los ecosistemas es cómo manejar el proceso. La conservación de la biodiversidad y la restauración de ambientes degradados solo será posible si se logra preservar el desarrollo evolutivo, en particular la coevolución de especies.

Apenas empezamos a percibir la coevolución como algo activo en el presente, según las enseñanzas de Darwin, y a aplicar nuestro conocimiento de ella a la conservación de la biodiversidad. Podríamos afirmar que algunos de los más serios problemas actuales del ambiente son, en realidad, problemas de procesos coevolutivos. Por ejemplo, la agricultura incluye situaciones extremas de coevolución de plantas, sus especies rivales o depredadores y sus especies cooperadoras o mutualistas. Los agricultores seleccionan plantas con atributos que les permitan resistir ataques de insectos o de microorganismos, lo que favorece que estos desarrollen rasgos que los capaciten para debilitar o derrotar las defensas de las plantas. Esta secuencia se repite sin cesar, lo que demuestra que la agricultura moderna, con sus esfuerzos por incrementar la productividad y generar variedades mejoradas, es claramente un episodio de biología coevolutiva. Lo mismo podría decirse de la relación entre antibióticos y microorganismos patógenos que aquejan al ser humano y los animales superiores.

La coevolución antropogénica, no obstante, puede

ser sustancialmente distinta de la coevolución natural, ya que la actividad humana altera las poblaciones de manera extremadamente rápida, por ejemplo, al convertir ecosistemas naturales en campos agrícolas de monocultivo. La investigación de los procesos de coevolución empieza a encarar estos problemas. Así, se ha empezado a estudiar la variación geográfica de los patrones de resistencia al ataque de depredadores de semillas de frijoles o porotos y algunos de sus parientes silvestres en México.

Mucho de lo aprendido en los últimos años sobre la coevolución resultó de aplicar nuevas técnicas y enfoques, en particular de la biología molecular. Igualmente importante fue poder acceder a los crecientemente escasos remanentes de ecosistemas relativamente libres de alteraciones de origen humano, que proveen de puntos de referencia para comprender el proceso coevolutivo y sus cambios. De esta manera se comienza a entender las consecuencias de eliminar de un ecosistema a vertebrados grandes e intermedios, con la asociada proliferación de especies de tamaño pequeño, fenómeno llamado *defaunación selectiva*.

Tales estudios revelan que, en sitios selectivamente defaunados, se producen cambios notables en los patrones de depredación de semillas y en los regímenes de selección del tamaño de estas. Las especies o variedades que tienen semillas grandes escapan a la depredación, mientras que las de semillas pequeñas son castigadas en exceso.

Lo que hemos aprendido sobre coevolución a partir de Darwin, unido a las herramientas de la biología molecular y al estudio de ecosistemas poco alterados por la acción humana, permite aprovechar la perspectiva coevolutiva para entender mejor el curso de vida en el planeta y para hacer lo más posible por conservarla. Lo más posible implica, en nuestra opinión, conservar hábitats de forma tal que permita a las especies seguir evolucionando y coevolucionando. Idealmente, deberíamos aspirar a vivir en un paisaje en el que la actividad humana se alterne con remanentes del esplendor y la exuberancia de la naturaleza silvestre, el *enmarañado barranco* que tanto motivara al gran científico celebrado en esta entrega de CIENCIA HOY. **CH**



Rodolfo Dirzo

PhD, Universidad de Gales.
Profesor de ecología, Universidad de Stanford.
rdirzo@stanford.edu



John Thompson

PhD, Universidad de Illinois.
Profesor de ecología y biología evolutiva, Universidad de California en Santa Cruz.
thompson@biology.ucsc.edu

LECTURAS SUGERIDAS

FARRELL BD, 1998, 'Inordinate fondness explained: why are there so many beetles?', *Science*, 281:555-559.

THOMPSON JN, 1994, *The Coevolutionary Process*, University of Chicago Press.

—, 2005, *The Geographic Mosaic of Coevolution*, University of Chicago Press.