El ser humano y la economía de la naturaleza

José R. Cure¹ Andrew P. Gutierrez²

RESUMEN. Las ciencias económicas comparten muchos conceptos, y por tanto métodos de análisis, con la ciencia ecológica. La forma de las funciones de adquisición de recursos es muy semejante en todas las especies, equivalente a las curvas de adquisición de recursos por parte de las compañías y empresas humanas. La adquisición de recursos aumenta de forma creciente, en función de la disponibilidad de recursos, hasta un máximo después del cual disminuye. Esta semejanza y la gran similitud que existe en la forma en que los recursos adquiridos son prioritariamente asignados a las diferentes actividades vitales de los organismos (respiración, reproducción, consumo, crecimiento somático y reservas) y las de las empresas (mantenimiento, manejo de residuos, consumo, inversión de capital) sirven de base para comparar el proceso de adaptación de los organismos, que los hace sostenibles en su medio natural, con el de la sociedad humana, que busca la sostenibilidad, pero que a diferencia de los organismos no tiene un mecanismo de largo plazo, como el de la selección natural, sino reglas económicas, de corto plazo, que escapan a las leyes de la naturaleza. En el caso natural la asignación de los recursos es controlada genéticamente, a través de las características que se han ido fijando lo largo del proceso evolutivo; en las empresas humanas, la regulación no se presenta de forma natural y por tanto la única forma de lograrlo sería a través de procesos culturales basados en el conocimiento y en la adopción, como valor, de actitudes éticas, que sean compatibles con la naturaleza y responsables con las próximas generaciones de seres humanos. Se discute el papel de la ciencia y tecnología como insuficiente para reemplazar la naturaleza en la preservación de los ecosistemas y la vida sobre la tierra. El paradigma presentado se ha desarrollado a través del análisis, a lo largo de muchos años, de diferentes agroecosistemas, en el contexto del control biológico y el manejo integrado de plagas.

Palabras clave: análisis de sistemas, ecología y economía, sostenibilidad, agroecología, manejo integrado de plagas.

ABSTRACT. Human beings and the economics of nature. Economic science and ecology share important concepts and analysis tools. The shape of the resource acquisition functions is very similar among different species, and analogous to resource acquisition in firms, increasing with resource abundance to a maximum and then declining. The priority scheme of resource allocation in organisms to respiration, reproduction, consumption, somatic growth, and reserves, which are important vital activities, has a parallel in firms to maintenance, waste management, consumption and capital investment. The similarities make it possible to compare both systems, recognize analogies and detect important differences. Through natural selection, species in the ecosystem are always struggling for long-term sustainability, while firms lack a long-term mechanism to achieve sustainability. Economic rules are short-term and not linked to ecological laws. In nature, resource allocation is controlled via evolutionary history by genetically fixed characteristics. In human enterprises, the only way to control resource acquisition is through understanding the importance of nature conservation for our own survival, and the development of cultural behaviors that incorporate ethics and responsibility towards nature and future generations of human beings. The role of science and technology in replacing the ecosystem is also questioned. The paradigm presented here has been developed though many years of theory and practicing of agroecosystem analysis, biological control and integrated pest management.

Keywords: system analysis, ecology and economics, sustainability, agroecology, integrated pest management.

¹ Facultad de Ciencias. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. jrcure@umng.edu.co

² Division of Ecosystem Sciences. University of California, Berkeley, EUA. carpediem@nature.berkeley.edu

Introducción

No es coincidencia que las palabras "ecología" y "economía" provengan de la misma raíz, *oikos*, palabra griega que significa "casa". En ambas instancias se trata del manejo de los recursos, sea desde la perspectiva de la economía de la naturaleza o desde la perspectiva del manejo de los recursos de las sociedades humanas.

Las semejanzas entre las dos disciplinas han sido reconocidas por varios autores; sin embargo, fueron Regev et ál. (1998) y Gutiérrez y Regev (2005) quienes propusieron un modelo bioeconómico común, para poder compararlas con base en las analogías que existen entre el comportamiento económico de una empresa moderna y el comportamiento ecológico de un organismo en la naturaleza.

A pesar de las analogías existentes, debemos mencionar que hay por lo menos tres aspectos que tradicionalmente han dificultado las comparaciones entre la economía y la ecología: (i) la escala de tiempo: evolutiva y de largo plazo en los seres vivos, frente a mercado y de corto plazo en las sociedades humanas; (ii) la amplitud del enfoque: inclusión de todo el mundo vivo y su entorno inorgánico, teniendo como unidad de medida para el intercambio la energía, frente a solamente el ser humano, teniendo como unidad de intercambio la moneda; (iii) las definiciones de la demanda, la oferta y el consumo: en las economías humanas, la oferta puede ser todo lo que está disponible globalmente, la demanda puede ser todo eso y aún más, y el consumo está dado en gran parte por el gasto superfluo, por placer, que no se reinvierte en el mejoramiento del sistema o en el crecimiento de la empresa; en la naturaleza la demanda es condicionada genéticamente, la oferta está limitada por la propia capacidad de los organismos y el consumo tiene una finalidad adaptativa, para enfrentar situaciones no previsibles, que aumentan las posibilidades de supervivencia en un ambiente cambiante (Gutiérrez y Regev 2005).

En los años por venir, la importancia de la ecología para la economía humana será cada vez mayor, principalmente cuando nos refiramos a los bienes comunes como el suelo, el aire, el agua, o la biodiversidad, entre otros. Cuando estos recursos comunes están amenazados, como de hecho lo están, y más aún, cuando comiencen a escasear, no bastará el bienestar financiero para el bienestar del *oikos*, y las disparidades anotadas anteriormente entre el sistema económico y el ecológico dejarán de ser relevantes, pues se tratará de la propia supervivencia de la especie humana.

Esta situación fue anticipada con mucha intuición por el biólogo G. Hardin (1968) en su famoso artículo "The tragedy of the commons" ("La tragedia de los comunes"), donde muestra cómo los recursos naturales —que muchos damos por garantizados, y que no son propiedad privada de nadie— pueden ser utilizados de forma no sostenible por una minoría que se beneficia de ellos, mientras que los costos son distribuidos entre la gran mayoría de la población. Por ejemplo, la contaminación de un río por una única empresa puede perjudicar a varias personas, que cargan con el problema sin haber recibido ninguno de los beneficios.

La preocupación por los recursos comunes ha salido del ámbito de las ciencias biológicas y ha pasado a los libros introductorios de economía; por ejemplo, el libro *Principios de economía* de Mankiw (2004), donde se trata el tema de los bienes comunes, incluyendo en ellos los bienes públicos. Los costos de los bienes y servicios públicos —como la investigación básica o el combate de la pobreza— o el costo de los recursos naturales —como la vida silvestre, el aire y el agua puros— no pueden calcularse solamente con base en las leyes del mercado.

Afortunadamente, la sociedad humana, no de forma suficientemente unánime, pero si esperanzadora, es cada vez más conciente de las consecuencias que nuestros actos individuales, grupales o nacionales tienen sobre todos los seres vivos del planeta, incluidos nosotros mismos, y sobre el entorno físico que sostiene la vida sobre la Tierra. Esto se refleja en la agenda internacional, donde la *globalización* no se refiere apenas a los aspectos del mercado, sino también de la conservación del agua, del aire, de la biodiversidad, de la justicia social y de la equidad. La financiación de proyectos internacionales, las relaciones entre los países y el reconocimiento de la comunidad científica pasan hoy en día por estos temas.

Hay también, oportuno decirlo, importantes científicos y economistas que piensan que la ciencia y la tecnología podrán resolver por sí mismas los problemas ecológicos y sociales, y que la fuerza exclusiva del mercado resolverá los problemas económicos del futuro.

A continuación definiremos algunos conceptos que nos permitirán enfatizar las analogías entre la economía de la naturaleza y la economía del ser humano, así como los puntos críticos que las diferencian.

Oferta y demanda en la naturaleza: la adquisición de recursos

Los fisiólogos vegetales han desarrollado los conceptos de *fuente* y *vertedero* (*source/sink*), para explicar cómo son controladas las tasas de crecimiento y desarrollo en las plantas y los períodos del crecimiento en los cuales los recursos adquiridos se acumulan en órganos específicos,

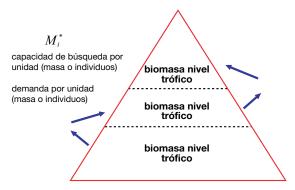


Figura 1. Adquisición de recursos, M_i^* por el nivel trófico M_i a partir de los recursos existentes en el nivel trófico $M_{(i\text{-}I).}$ De igual manera se ilustra la adquisición en el siguiente nivel trófico $M_{i\text{+}I}^*$.

por ejemplo en los frutos (Loomis y Connor 1992). Una forma más amplia de abordar la tasa de adquisición de los fotoasimilados en las plantas o en cualquier otro organismo es el concepto de *oferta* y *demanda*, de forma análoga a como se utiliza en economía. Así, la relación oferta/demanda, variable a través del tiempo, determina las tasas de adquisición para cada especie. La tasa instantánea de adquisición de recursos por el nivel trófico i, M_i^* , es función de la cantidad de recurso disponible en el nivel trófico inmediatamente anterior $M_{(i-1)}$, de la capacidad del organismo en el nivel i para capturar ese recurso, s_i , y de la demanda genética que el organismo tenga por el recurso, b_i (Figura 1; Gutiérrez 1996):

$$M_i^* = f(M_{(i-1),} b_{i,} s_i)$$

Estas variables nos permiten plantear los aspectos que en gran parte determinan el conflicto existente entre el ser humano y la naturaleza. En los seres vivos, la capacidad de búsqueda o de adquisición de recursos,

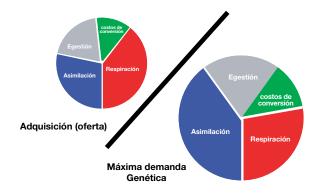


Figura 2. Relación entre la oferta y la demanda para satisfacer las necesidades vitales de un organismo. La oferta es una interacción entre lo que está disponible y la capacidad de tomarlo. La demanda está establecida genéticamente y es afectada por factores climáticos, como la temperatura.

 s_i , ha sido modelada evolutivamente para satisfacer las demandas de un organismo frente a su estrategia de vida b_i (demanda genética) y no excede las necesidades del propio organismo, aun en los casos de superorganismos como las colonias de los insectos sociales, con millares de individuos. La oferta es una interrelación entre s_i y $M_{(i-I)}$ (la capacidad de adquirir y la disponibilidad del recurso) y la demanda b_i es controlada genéticamente. Estos parámetros son dinámicos, van cambiando durante el crecimiento y desarrollo y son función de factores climáticos y de la edad de las estructuras que componen el organismo (Figura 2).

La respuesta de un organismo a diferentes niveles de recursos genera una curva caracterizada por un valor óptimo, situado entre los límites máximos y mínimos en que el recurso puede ser adquirido. Estas curvas tienen las mismas formas y características, tanto si los recursos considerados son de tipo económico como si son de tipo ecológico (Figura 3). La semejanza se debe a que ambos tienen en común las mismas características para el parámetro de búsqueda s_i .

A diferencia de otras especies en la naturaleza, donde la capacidad de búsqueda está limitada por las propias características de los organismos, en el ser humano es tan grande como la tecnología lo permita. Por ejemplo, en un organismo depredador, la capacidad de depredación depende de sus propias capacidades físicas, esto es, de sus músculos, velocidad y posibilidades de alcanzar la

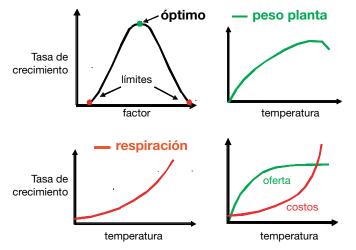


Figura 3. En la parte de arriba, izquierda, se ilustran dos principios de la ecología: ley del mínimo de Leibig, 1840 y ley de tolerancia de Shelford, 1913. A la derecha se muestra el efecto de un factor, la temperatura, sobre la tasa de crecimiento y a la izquierda abajo la gráfica de costos respiratorios en función de la temperatura. En la última ilustración se sobrepone la curva de adquisición de recursos con la curva de costos respiratorios para indicar que el valor óptimo no está necesariamente en el punto en el cual la tasa de adquisición es óptima. Este es un principio económico.

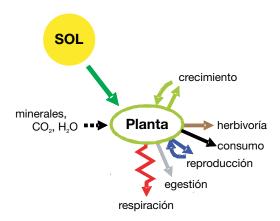


Figura 4. Necesidades vitales del organismo, mostrando la secuencia de prioridades, iniciando por la respiración, con prioridad máxima, y terminando por el crecimiento vegetativo.

presa. En el ser humano está aumentada por el barco y los satélites, por ejemplo, que dan la posibilidad de capturar hasta el último pez. Otra diferencia importante del hombre con la naturaleza es que en la especie humana, la demanda b_i no está determinada solamente por las necesidades de superviviencia, como en el caso del mundo natural, sino también por el consumo suntuario, para el lujo y el placer.

El resultado es que en el ser humano hay un aumento, no controlado o no regulado, tanto en la capacidad de adquirir como en la demanda, y ese crecimiento es el que muchas veces consideramos como generador de una economía saludable... esto en el corto plazo; ¿cómo será en el largo plazo? A diferencia de muchas otras especies, la transición de los humanos primitivos (realmente animales en términos de su capacidad de consumo de la naturaleza) ha seguido dos tipos de proceso. Uno de ellos, el genético, ha sido darwiniano, como en todas las especies, y el otro, de tipo cuasi lamarckiano, basado en el aprendizaje, como cultura, incluyendo en ella la tecnología (Regev et ál. 1998).

Analogías entre la economía del ser humano y la economía de la naturaleza: la asignación de los recursos adquiridos

Una vez adquiridos los recursos por un organismo, estos son asignados de modo que satisfagan diferentes necesidades vitales, con una secuencia de prioridades como la indicada en la Figura 4: respiración, egestión, reproducción, consumo y crecimiento vegetativo, y reservas. La respiración y la egestión mantienen el organismo funcionando y, por tanto, la prioridad es para esos procesos. Si se llegó a la madurez sexual, la siguiente prioridad del organismo es la reproducción, teniendo en cuenta que antes de ella hubo una acumulación de biomasa o crecimiento somático, que es el soporte para el proceso reproductivo. El consumo (exceso de propágulos y otras características adaptativas), nuevo crecimiento somático y acumulación de reservas solamente se dará si son satisfechas totalmente las necesidades respiratorias y reproductivas.

Al igual que con el tema de adquisición de recursos, la asignación de los recursos adquiridos muestra analogías entre el sistema ecológico y el sistema económico. Es posible comparar directamente cada uno de los procesos mencionados anteriormente con los procesos de una empresa (Figura 5):

Respiración vs. costos de mantenimiento: a tasas de crecimiento cero, la respiración es apenas un costo de mantenimiento de la actividad vital, sin el cual no es posible mantener el organismo vivo. Igualmente, en una empresa el costo de mantenimiento deberá cubrir lo mínimo para mantener la empresa funcionando. Esos costos aumentan en la medida en que la empresa o el organismo están creciendo activamente y son necesarios para el buen funcionamiento de todo el sistema.

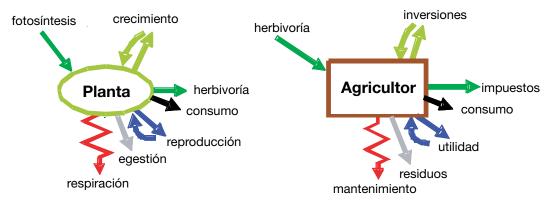


Figura 5. Algunas analogías entre ecología y la empresa de un agricultor. La respiración es equivalente al costo del mantenimiento, la egestión al manejo de los residuos, la reproducción a la utilidad, el consumo en exceso de propágulos al consumo suntuario y el crecimiento vegetativo a las inversiones.

Egestión vs. residuos: el proceso de disponer de los residuos tiene un costo ligado al mantenimiento y al nivel de actividad, sea del organismo o de la empresa. Esta es una prioridad semejante a la de la respiración y costos de mantenimiento.

Reproducción efectiva vs. utilidad: en la naturaleza, el concepto de adaptación (fitness) está ligado a la supervivencia y por tanto a la reproducción, que es el proceso central de la evolución orgánica. Este concepto, cuando se aplica a una empresa, equivale a la utilidad (profit). Los dos conceptos pueden interpretarse desde el punto de vista de lo que puede ser invertido en el siguiente ciclo. La economía de las empresas busca maximizar las utilidades y las especies el número de descendientes vivos.

Consumo (inversión en exceso de propágulos) vs. consumo (en el sentido de lo superfluo): este es un parámetro importante, que no es posible definir de forma simple. Tanto los seres vivos como las empresas tienen que lidiar con expectativas futuras, que implican costos que hemos llamado de consumo porque no contribuyen directamente ni a la supervivencia ni al crecimiento. En las organizaciones humanas estos costos deberían estar reflejados en la tasa bancaria (discount rate), que tiene la función también de regular el consumo; sin embargo, esta taza no incluye los costos ecológicos y por tanto no regula el consumo a niveles sostenibles. En el caso de los seres vivos, este consumo ha sido modelado por el proceso evolutivo e incorporado en la genética de los organismos como una ventaja adaptativa para enfrentar los desafios cambiantes del medio ambiente. Por ejemplo, la producción de un mayor número de propágulos en algunas plantas, como el mango o el algodón, que pierden millares de flores que nunca se convertirán en reproducción efectiva, tiene un valor adaptativo. En el caso del algodón, se ha mostrado que estos propágulos en exceso permiten acomodar el picudo (Curculionidae), el cual utiliza estas estructuras para su alimentación, a la vez que la planta preserva para su propia reproducción los propágulos que efectivamente es capaz de llevar hasta el final de su proceso reproductivo (Gutiérrez y Regev 1983, 2005).

Crecimiento somático vs. inversión de capital: el crecimiento somático o vegetativo de un organismo es una inversión en infraestructura, capaz de mantener el proceso reproductivo una vez desencadenado. De la misma forma, una compañía deberá generar la infraestructura para poder producir los bienes que le permitirán obtener utilidades. En la medida en que se inicien nuevos ciclos de producción, la inversión también deberá aumentar.

Las estrategias de vida de los organismos

Cada especie, como resultado de su propia historia evolutiva, ha llegado a "empacar" dentro de su código genético la estrategia de vida que le permite sobrevivir. Qué parte de los recursos adquiridos va al desarrollo vegetativo y qué parte va al desarrollo reproductivo, por individuo, ha sido una consecuencia evidente del proceso evolutivo (Fisher 1930).

La estrategia de vida es tan característica de cada especie como cualquier rasgo morfológico y es, inclusive, más importante para su supervivencia que la mayor parte de los rasgos morfológicos. Las estrategias de vida son de las más diversas índoles: frutos pequeños en gran cantidad vs. frutos grandes en menor número; madurez sexual temprana vs. madurez sexual tardía; ciclo de vida corto vs. ciclo de vida largo; ciclo reproductivo, una vez en la vida, anual, semestral, mensual, o continuo (generaciones). La estrategia de vida adoptada por cada una de las especies tiene consecuencias importantes en su dinámica poblacional (demografía) y en la forma de utilizar los recursos a su alcance.

Un organismo de tipo generalista (r), por ejemplo una "maleza", generalmente asigna menos recursos a la reproducción (flores, frutos y semillas) que un organismo especializado (K), como por ejemplo una orquídea. En el primer caso, en los organismos r hay una gran necesidad de desarrollar estrategias de vida que les permitan compensar por una mortalidad esperada elevada, consecuencia de su vida en ambientes severos y cambiantes. El consumo, en estas especies, está dirigido a la gran producción de propágulos reproductivos. De acuerdo con su estrategia de vida, cada especie, durante su desarrollo, toma los recursos del medio ecológico y los va asignando entre sus diversos procesos vitales como solo ella sabe.

Las diferentes estrategias de vida no son más que diferentes formas de adquirir, asignar y almacenar la energía. La energía fluye dentro de los niveles tróficos y entre los niveles tróficos, satisfaciendo las necesidades vitales de los organismos conforme se ilustró anteriormente. La energía captada se acumula en forma de biomasa en los diferentes niveles tróficos (Figura 6).

En la Figura 7 podemos observar en perspectiva la transferencia de energía en una cadena trófica, incorporando en ella una empresa agrícola que compite por los recursos de la planta con los herbívoros. Se muestra la transición entre el dominio de la ecología y el de la economía (adaptado de Gutiérrez 1996). La figura tiene la ventaja de incluir el proceso económico como parte del proceso productivo de la naturaleza, de tal forma que la generación de riqueza tiene como base el crecimiento y desarrollo del cultivo, sometido a los factores climáticos y otras características

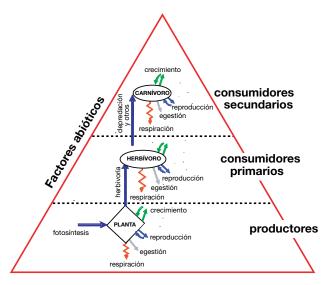


Figura 6. Flujo de energía entre los diferentes niveles tróficos, enfatizando las analogías de la asignación de recursos en todos ellos.

agronómicas que influencian el índice de cosecha (porción del peso total de la planta que es utilizada por el agricultor). La incidencia de un herbívoro sobre las utilidades del agricultor dependerá mucho de la fase del cultivo en que ataque y de la porción de la planta económicamente aprovechable: vegetativa o reproductiva. Un esquema dinámico de este tipo, ligado a la relación oferta/demanda y a las prioridades de asignación de recursos, es mucho más fácil de analizar en relación con las consecuencias de diferentes estrategias de manejo sobre la producción y sobre la sostenibilidad de las medidas tomadas.

Efectos bottom up y top down

Estos dos conceptos resumen los efectos que, sobre un nivel trófico dado, ejercen los niveles tróficos inferiores (bottom up) y los niveles tróficos superiores a él (top down), lo que se puede ilustrar muy fácilmente a través de un ejemplo de control biológico (Figura 8). En el caso del café, la dinámica poblacional de la broca no depende solamente de la acción de los parasitoides y depredadores que actúan sobre ella (efectos top down), sino también de las condiciones del cultivo en términos de fertilización y de la dinámica de la producción de frutos (efectos bottom up). En resumen, para comprender la dinámica de la broca, nivel trófico i, es necesario incorporar tres niveles tróficos: i-1, i e i+1, cada uno de ellos influenciado, además, por factores abióticos, como el clima, que tiene efectos diferenciales sobre el crecimiento y desarrollo de cada una de las especies que componen el sistema (Gutiérrez et ál. 1998, Cure et ál. 1998).

Cuando se habla del ser humano, nos referimos al depredador de la punta de la pirámide, lo que implica una drástica disminución de los factores *top down* (depredación y parasitismo). Además de lo anterior, la capacidad técnica de la especie humana reduce aún más esos factores (control de las enfermedades a través de la medicina), como también los factores asociados a los efectos *bottom up* (limitantes de la producción agrícola y pecuaria).

Es evidente que para mantenerse en el juego del flujo de energía en la biosfera es necesario que el ser humano cuente con alguna forma de regulación de la población,

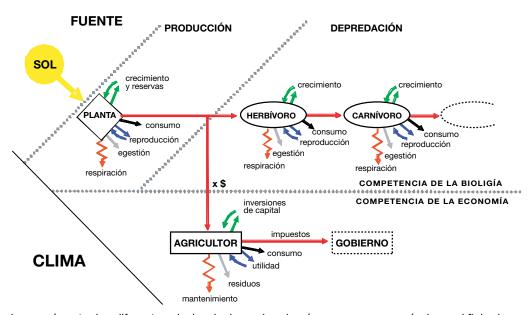


Figura 7. Flujo de energía entre los diferentes niveles, incluyendo además una empresa agrícola en el flujo de energía. Se ilustra aquí la propuesta de un flujo continuo de energía del mundo de la naturaleza al mundo de la economía humana (modificado de Gutiérrez 1996).

ya que esta no es regulada directamente por la naturaleza y debe ser asumida por la propia sociedad humana, en la forma de un comportamiento autorregulado.

El concepto de sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad implica por lo menos tres dimensiones: ecológica, económica y social, las cuales están íntimamente relacionadas, donde no puede existir una sin la otra. Muchas de las ideas que discutiremos en este capítulo han sido tomadas de Goodland (1995), a quien recomendamos leer directamente para una excelente discusión sobre el tema y de Regev et ál. (1998), quienes definen un marco conceptual muy importante para el análisis comparativo entre los sistemas naturales y los sistemas económicos.

En el mundo natural, los ecosistemas contienen lo que en la teoría económica se conoce con el nombre de *factores primarios de producción*: capital, trabajo e infraestructura. El *capital* es la biomasa en los diferentes niveles tróficos, el *trabajo* es la capacidad de las especies para transformar estos recursos (estrategias de vida) y la *infraestructura* son las redes tróficas.

El concepto de sostenibilidad parte de un principio fundamental: hay un límite máximo para la utilización de los recursos naturales, el cual está dado por la capacidad de regeneración de los ecosistemas. Estos no pueden ser explotados de forma creciente. Ni siquiera los recursos llamados renovables pueden explotarse indefinidamente;

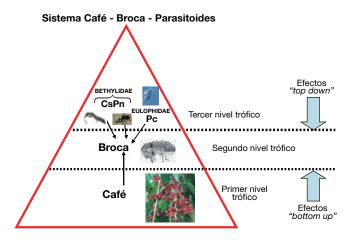


Figura 8. Sistema café-broca-parasitoides. Efectos top down y bottom up a los que está sometido el segundo nivel trófico, en este caso la broca del café Hypothenemus hampei. La dinámica de poblaciones de la broca, segundo nivel trófico, depende tanto de la dinámica poblacional de los frutos y de su calidad (tamaño), primer nivel trófico, como de la acción de los parasitoides y depredadores, tercer nivel trófico. En este último están incluidos dos depredadores, los Bethylidae Cephalonomia stephanoderis y Prorops nasuta y el Eulophidae Phymastichus coffea.

su explotación debe mantenerse dentro de las capacidades regenerativas de los ecosistemas, sin sobrepasar la capacidad de almacenamiento que estos tengan.

La premisa de que partimos —la imposibilidad del crecimiento continuo— nos enfrenta a un principio económico que asume el crecimiento como condición necesaria para el desarrollo de los países. Sin embargo, como bien lo apunta Goodland (1995), es necesario separar los conceptos de *crecimiento económico* y *desarrollo*. El segundo tiene dimensiones relacionadas con el conocimiento, la educación, la utilización eficiente de lo que tenemos, temas relevantes para el mejoramiento de los niveles de vida de las personas y que, si bien dependen de un desarrollo económico mínimo, no necesitan de una acumulación excesiva de bienes.

El hecho de que la humanidad tenga la capacidad de cultivar el "capital natural", por ejemplo mediante la agricultura, ha ampliado la base de soporte de la vida humana sobre la cual se desarrolla nuestra civilización, y ha sido un argumento utilizado por quienes piensan que la creatividad humana resolverá todos los problemas. Esto también tiene límites. Conocemos el caso de la revolución verde que, a pesar del aporte que hizo a nuestra sociedad con variedades que permitieron aumentos impresionantes de productividad, ha exigido simultáneamente el aumento de los insumos agrícolas que se utilizan, con consecuencias ecológicas a veces inesperadas. Por ejemplo, en el cultivo del arroz, las plantas mejoradas reciben un manejo agronómico que ha tenido consecuencias en el incremento de las plagas y muy especialmente de los problemas relacionados con el control de malezas (Kenmore et ál. 1986).

Algo similar puede anticiparse con los cultivos transgénicos que, a pesar de los beneficios que en muchos aspectos pueden traer a la humanidad, no están exentos de inconvenientes y, para que contribuyan a las soluciones, nunca deben ser considerados como herramienta única, fuera del contexto ecológico en el que se encuentran. Los sistemas transgénicos tienen la capacidad de transformar las relaciones ecológicas entre los niveles tróficos, generando refugios en las propias plantas, por ejemplo, pues hay diferencias de concentración de las toxinas del Bt entre los órganos jóvenes y los órganos maduros de estas plantas, dando lugar a una especie de refugios temporales que tiene importancia en la generación de resistencia (Gutiérrez y Ponsard 2006, Gutiérrez et ál. 2006). Se ha detectado también que las toxinas generadas por el gen del Bt, incorporado en esos genomas, son lixiviadas en el agua y pueden tener efectos negativos sobre organismos del suelo y sobre otros niveles tróficos, principalmente bacterias, disminuyendo el reciclaje de la materia orgánica del suelo y requiriendo la aplicación de una mayor cantidad de fertilizantes inorgánicos (d'Oultremont y Gutiérrez 2002). De Janvry v Qaim (2005) estudiaron algodón transgénico sembrado en Argentina y encontraron ventajas ecológicas en su utilización. Ambos tipos de estudio afirman que, aparentemente, las consecuencias ecológicas del transgénico pueden ser ventajosas en el corto plazo. En el largo plazo, sin embargo, hay toda una gama de probables consecuencias desfavorables, tales como contaminación genética de los genomas de las plantas cultivadas; explosiones de plagas secundarias como consecuencia de los efectos subletales de las toxinas introducidas en los transgénicos; mayor necesidad de herbicidas en los sistemas en donde hayan cultivos tolerantes a los mismos; reducción masiva de material genético en la medida que los intereses corporativos de las compañías, buscando maximizar sus utilidades, sustituyan los principios de estabilidad que han guiado tradicionalmente a los fitomejoradores y colecciones de germoplasma. En todo caso, las consecuencias de utilizar los transgénicos deben ser analizadas desde una perspectiva temporal más amplia y dentro de un contexto ecológico determinado.

Si creemos que la ciencia y la tecnología deben asumir la sustitución total de los sistemas naturales, el desafío sería monumental y utópico. La infinidad de estrategias de vida que componen las redes tróficas, producto de la evolución orgánica, tienen incorporadas en sus genomas un *know how*, un saber subsistir, que responde a condiciones cambiantes, que nuestra ciencia y tecnología apenas comienzan a entender y describir. Como ejemplo pensemos en las relaciones hospederopatógeno y en la infinidad de intercambios de información química que sucede entre ellos a nivel molecular, incluso en organismos aparentemente simples, como las bacterias y los hongos.

Desde el punto de vista del control de la naturaleza a partir de la tecnología, siempre nos sucede algo parecido al cuento del conejo y la zanahoria, donde la meta se corre cuando creemos alcanzarla. La naturaleza se ha encargado de mostrarnos que la solución es incompleta y que ella nuevamente está al mando al final del camino.

La unidad monetaria, utilizada en economía, es práctica, pero limitada. Compradores y vendedores normalmente no tienen en cuenta los efectos externos de sus decisiones. Llevar el petróleo de Sudamérica a China puede ser un buen negocio, pero ¿cuál es el costo ambiental del transporte y otros aspectos no contemplados?

El objetivo de alcanzar la sostenibilidad en el largo plazo, claramente deseado por nuestra sociedad, es análogo al propósito de adaptación de las especies en la naturaleza pero, a diferencia de ella, donde los organismos evolucionan a través de un proceso darwiniano de selección, las reglas que gobiernan las economías modernas son de corto plazo y cambian constantemente. De esta forma el impacto de las compañías individuales, a diferencia de los organismos en la naturaleza, podrá tener consecuencias negativas e irreversibles sobre el ambiente.

Nuestro futuro

Los seres vivos, fruto de la evolución orgánica y, en particular, cada una de las especies existentes, han permanecido sobre la tierra porque han encontrado un papel que desempeñar, su nicho, en el gran universo de los recursos existentes. Alguien en alguna oportunidad habló de hacer una tabla periódica de nichos, algo semejante a la tabla periódica de los elementos, para colocar todos los nichos existentes e, incluso, pronosticar cuales características debería tener un ser vivo para poder explotarlo. Esto para resaltar que la biodiversidad es algo lógico, consecuencia del propio fenómeno de la vida. Los nichos son tantos cuantas son las especies existentes.

Como depredador dominante, el ser humano tiene un nicho extremamente amplio, que incluye todos los niveles tróficos y esto es un privilegio que solamente podremos mantener en la medida en que la sostenibilidad sea el concepto fundamental bajo el cual la sociedad humana actúe.

Recientemente, en Europa se ha vuelto muy importante un proyecto de amplia financiación llamado la biotrónica, que trata de aprender de los seres vivos las soluciones que ellos han encontrado para problemas que son desafíos en las ciencias de la ingeniería: por ejemplo, las propiedades de adherencia a través de microfilamenteos que tienen las salamandras y que les permiten prenderse a superficies lisas, o las propiedades de antiadherencia que poseen las células de los nenúfares y otras plantas acuáticas como Victoria amazonica, que mantienen la superficie de las mismas completamente limpias, o la microestructura epidérmica de los tiburones, que genera una turbulencia laminar que permite el mejor flujo del agua y que puede ser utilizada en los aviones para mejorar su desempeño. Otro ejemplo fue el estudio de las alas de las aves rapaces, que doblan hacia arriba el extremo distal para disminuir el efecto de vórtice y que ha sido implementado en los aviones modernos, aumentando con ello la eficiencia del vuelo. Estamos apenas vislumbrando las inmensas posibilidades de la biotrónica.

Los estudios de la NASA para la supervivencia del ser humano en el espacio han venido buscando la forma de cultivar, por ejemplo, tomate en las condiciones de la estación espacial internacional. Esto ha llevado a revalorar la importancia de la biodiversidad incluso para mantener la vida en el espacio. Por ejemplo, ¿cómo enriquecer cultivos hidropónicos con microorganismos aplicados junto con los nutrientes que le permitan a esos cultivos sobrevivir en el caso de la presencia de un patógeno? (J.Sutton, Universidad de Guelph, Canadá).

¿Será necesario pensar en sustituir la naturaleza, cuando ella misma está ahí prácticamente a nuestra disposición con toda su riqueza? ¿Será necesario inventar un polinizador mecánico para resolver un problema de polinización cuando hay polinizadores en la naturaleza que ejercen este oficio? ¿Será que podemos darnos el lujo de destruir las redes tróficas, que la evolución de los seres vivos ha construido a través de ensayo y error a lo largo de millones de años y suponer que el ingenio humano reemplazará todo este conocimiento natural? Todas estas formas de vida, toda esta riqueza, es mantenida por la economía de la naturaleza. ¿Tendremos en la economía humana suficiente claridad para darle un lugar a la naturaleza? ¿Podremos desarrollar un sistema costo-beneficio que incluya en la contabilidad de las empresas y de los gobiernos, como un valor, los servicios que nos prestan los ecosistemas?

Hace varios años, dos grandes biólogos ya nos llamaron la atención sobre estos temas y el peligro que afrontamos, y lo hicieron de forma vehemente. Recordemos a Rachel Carlson, con su libro *Primavera silenciosa*, publicado en 1962, y a Robert van DenBosh, con su libro *La conspiración de los pesticidas*, publicado en 1978. Nuestro futuro depende en gran medida de la claridad que tengamos sobre la importancia de la naturaleza para nuestra propia supervivencia y de la capacidad que tengamos para utilizarla y conservarla, asumiendo las responsabilidades éticas que esto implica, tanto con la naturaleza como con las futuras generaciones de seres humanos.

Literatura citada

- Carlson, R. 1962. Silent spring. Houghton Mifflin Co. 40th anniversary, 2002 edition. 378 p.
- Cure, JR; Santos, HAS; Moraes, JC; Vilela, EF; Gutiérrez, AP. 1998. Fenologia e dinâmica populacional da broca do café *Hypothenemus hampei*, relacionados às fases de desenvolvimento do fruto. An. Soc. Entomol. Brasil 27(3):325-335.
- De Janvry, A; Qaim, M. 2005. Bt cotton and pesticide use in Argentina: economic and environmental effects. Environment and Development Economics 10:179-200. Cambridge University Press.
- d'Oultremont, T; Gutierrez, AP. 2002. A multitrophic model of a rice fish agroecosystem: II. Linking the flooded rice fishpond systems. Ecological Modelling 155:159-176.
- Fisher, RA. 1930. The genetic theory of natural selection. Oxford.
- Goodland, R. 1995. The concept of environmental sustainability. Annu. Rev. Ecol.Syst. 26:1-24.
- Gutiérrez, AP; Regev, U. 1983. The economics of fitness and adaptedness: the interaction of sylvan cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and the boll weevil (*Anthonomus grandis* Boh.). An example. Acta Oecolog. 4:271-287.
- Gutierrez, AP. 1996. Applied population ecology.: A supply- demand approach. Wiley, New York.
- Gutiérrez, AP; Villacorta, A; Cure, JR; Ellis, K. 1998. Tritrophic análisis of the coffee (*Coffea arabica*) coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) parasitoid system. An.Soc.Entomol. Brasil 27(3):357-385
- Gutiérrez, AP; Regev, U. 2005. The bioeconomics of tritrophic systems: applications to invasive species. Ecological Economics 52:383-396.
- Gutiérrez, AP; Ponsard, S. 2006. Physiologically based demographics of Bt cotton – pest interactions. I. Pink bollworm resistance, refuge and risk. Ecological modelling 191:346-359.
- Gutierrez, AP; Adamczyk, Jr. JJ; Ponsard, S; Ellis, CK. 2006. Physiologically based demographics of Bt cotton – pest interactions. II. Temporal refuges, natural enemy interactions. Ecological modelling 191:360-3382.
- Hardin, G. 1968. The tragedy of the commons. Science 162:1243-1246.
 Kenmore, PE; Carino, F; Perez, CA; Dyck, VA; Gutiérrez, AP. 1986.
 Population regulation of the rice brown planthoppert (*Nylaparvata lugens* Stal) within rice fields in the Philippines. J.Pl.Prot.Tropics 1:19-37.
- Loomis, RS; Connor, DJ. 1992. Crop ecology. Cambridge Univ. Press. 552 p.
- Mankiw, NG. 2004. Principles of Economics. 3 ed. Thompson. 848 p.
- Regev, U; Gutierrez, AP; Schreiber, SJ; Zilberman, D. 1998. Biological and economic foundations of renewable resource exploitation. Ecological Economics 26:227-242.