¿CRECIMIENTO SOSTENIDO A COSTA DE PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD?

Francisco Cabo & Guiomar Martín-Herrán

Dpto. Economía Aplicada (Matemáticas)

Universidad de Valladolid

Resumen:

Se estudia un modelo de comercio Norte-Sur. El Norte produce un bien de consumo para lo cual precisa trabajo, capital y un bien intermedio que es producido en el Sur utilizando recursos naturales. Se plantea un juego diferencial en el que el Norte debe decidir la proporción de capital a ahorrar, y por tanto a invertir, mientras que el Sur debe fijar el número de especies naturales que se ven afectadas a la hora de producir el bien intermedio, es decir, como se conserva la biodiversidad. Se trata de estudiar la posibilidad de crecimiento sostenido. Se encuentra una condición que garantiza la existencia del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque la idea de la conservación es probablemente tan vieja como la especie humana, el uso del término en su contexto actual es relativamente reciente. Con el paso de los años la conservación ha adquirido muchas connotaciones: para algunos significa la protección de la naturaleza salvaje, para otros la producción sostenida de materiales útiles a partir de los recursos del planeta. La definición más comúnmente aceptada, presentada en 1980 en la Estrategia de la Conservación Mundial por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales es la de "la gestión del uso humano de la biosfera de forma que pueda proporcionar el beneficio sostenible más grande mientras que se mantiene su potencial para alcanzar las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras". El documento define los objetivos de la conservación de los recursos vivos como: mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales y de los sistemas que soportan la vida, preservación de la diversidad genética y garantía del uso de las especies y ecosistemas.
De una forma más general, la conservación implica prácticas que perpetúen los recursos del planeta del cual dependen los seres humanos y que mantengan la diversidad de organismos vivos que comparten el planeta. Esto incluye actividades tales como la protección de especies amenazadas, el uso cuidadoso o reciclaje de recursos minerales escasos, el uso racional de los recursos energéticos y el uso sostenible de los suelos y los recursos vivos.

Dentro de los conceptos importantes para la conservación está la necesidad de recursos naturales. Como la conservación, el término recursos naturales ha experimentado una expansión en su significado como resultado de un más amplio entendimiento de la relación entre los seres humanos y el mundo en el que habitan.

Al principio del siglo XX los recursos naturales se veían principalmente como fuentes de bienes útiles. Eran los materiales primarios que se utilizaban o eran susceptibles de ser utilizados para cierto propósito: minerales, bosques y recursos agrícolas, pesquerías, etc. En un sentido estricto, el término todavía se utiliza de esta forma. Más recientemente, sin embargo, el concepto de recursos naturales se ha expandido para incluir el medio ambiente natural total - la superficie entera del planeta -, ya que todas las partes de la superficie de la tierra son de uso y de valor en el sentido de que contribuyen a satisfacer las necesidades y proporcionar el bienestar que la gente necesita y demanda. Así, cuando se consideran en este sentido, la atmósfera, océanos, desiertos y regiones polares, todos pasan a ser recursos valiosos que deben ser gestionados con cuidado para asegurar el futuro.

La conservación de los recursos naturales incluye un gran rango de conceptos subsidiarios. Uno de estos conceptos es el del uso racional del medio ambiente, que incluye la preservación de ciertas áreas o recursos, ya sea por su interés científico, aspecto estético o valor recreacional. Preservar también sirve para un propósito ecológico a través del mantenimiento de la función del medio ambiente total, tal como la protección de los bosques para asegurar una producción sostenible de agua para las reservas urbanas o la protección de los estuarios para perpetuar la pesca oceánica. Pero la preservación o la protección de los recursos naturales no es la única preocupación de la conservación, el uso racional también implica el uso directo de los recursos por sus valores de mercancía o recreacionales. Así, la recolección de cultivos, el pastoreo del ganado, la pesca y la caza de animales salvajes pueden considerarse una parte legítima del uso racional de los recursos naturales cuando se llevan a cabo de forma que el recurso se perpetúa y no se amenaza. Tales actividades conllevan otro concepto, el de "producción sostenida". Con esta expresión se entiende que, por ejemplo, la caza y la pesca deben extraer sólo el excedente anual de cada especie, de forma que no se amenacen el stock de reproducción de los animales y peces. Como otro ejemplo, la tala de árboles y el pastoreo deben eliminar sólo el incremento anual o tal porción capaz realmente de ser reemplazada en un periodo mediante procesos naturales y con la ayuda humana cuando sea necesario. En este trabajo nos planteamos si es posible alcanzar un crecimiento económico sostenido sin dañar de forma irreversible la biodiversidad o diversidad biológica.

La semilla de la idea para una convención internacional sobre diversidad biológica se planteó en el Tercer Congreso Mundial sobre Parques Nacionales y Áreas Protegidas, que tuvo lugar en Bali en Octubre de 1982. En la siguiente década, numerosas reuniones y congresos internacionales llevaron al desarrollo del Convenio sobre Diversidad Biológica que fue firmado por la mayoría de los gobiernos en Río de Janeiro en 1992.
El Convenio comienza con una base biológica, pero se desarrolla atendiendo a la economía, sociología y otras ciencias sociales. Muchas decisiones conllevan un proceso político que debe empezar en el nivel de gobierno nacional, o incluso al nivel de comunidad local, antes de plantearlas en términos internacionales. Mientras tanto, la Evaluación de la Biodiversidad Global, publicada por el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas en 1995, establece claramente que la biodiversidad es especialmente importante para proporcionar la capacidad de recuperación o de adaptación de los ecosistemas, permitiendo que estos se adapten a las condiciones cambiantes. Si los principales costes de la pérdida de biodiversidad recaen en la pérdida de capacidad de recuperación de los ecosistemas afectados, la biodiversidad es valiosa para cada país, no sólo para aquéllos que tienen la ventaja de disponer de un gran número de especies. Se puede incluso argumentar que la pérdida de especies puede imponer unos costes mucho mayores en los sistemas pobres en especies que en aquéllos que son más ricos en especies.

También está claro que el Convenio sobre Diversidad Biológica no puede resolver por sí mismo los problemas de la pérdida de biodiversidad. Por el contrario, los acuerdos de comercio internacional, al cambiar el precio relativo de los recursos o eliminar barreras comerciales, pueden significar una amenaza mucho mayor para la biodiversidad del planeta. Así, todas las negociaciones internacionales deben considerar su impacto sobre la biodiversidad, debiendo tenerse en cuenta el Convenio en las discusiones que traten sobre cooperación económica, comercio internacional, bosques, desertificación, océanos, clima, población, y en cualquier otro aspecto de la sociedad moderna que influya en la biodiversidad.

En décadas recientes ha habido un rápido crecimiento de la investigación dedicada a estudiar la interdependencia de las actividades económicas y el medio ambiente natural (Perrings [14], Costanza [9]. En particular, la preservación de la biodiversidad ha recibido una atención creciente, como muestra el acuerdo en la Agenda 21 de la Conferencia de las

Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo, que tuvo lugar en 1992 en Río de Janeiro.

La principal razón para este aumento de la preocupación es que la biodiversidad es un factor muy importante para la estabilidad ecológica de nuestro medio natural (Perrings et al, [15]). Otra razón recae en que la extinción de especies amenazadas puede significar la pérdida de nuevas fuentes de alimentación y farmacéuticas útiles potencialmente, así como stocks genéticos que pueden ser importantes en el futuro (Barney [2], Tisdell [16], Barbier & Aylward [1]). Aunque el comportamiento normal para ciertas especies es acabar extinguiéndose según la ley de evolución, el impacto de las actividades humanas en el tanto de pérdida de las especies es tan grande que hace trivial las causas normales de reducción de las especies. Para conseguir desarrollo sostenible deben hacerse esfuerzos para disminuir la velocidad de pérdida de especies, de forma que se preserve la diversidad biológica.

Ya que el problema implica un gran rango de disciplinas, estudios desde diferentes campos tienden a centrarse en áreas específicas con pocos intentos de desarrollar un enfoque integrado para intentar conseguir un entendimiento del problema como un todo. La valoración de las especies amenazadas se ha realizado la mayor parte de las ocasiones sin tener en cuenta el mercado, aunque sí los incentivos económicos para conservarlas. Sin embargo, poco trabajo se ha realizado para formalizar las interrelaciones dinámicas entre la actividades humanas y el sistema ecológico donde se tienen en cuenta la dinámica de las especies explícitamente.

El énfasis sobre la dimensión internacional de numerosos problemas medioambientales ha llevado al desarrollo de una nueva línea de investigación en economía. Algunos temas como los flujos de polución entre países o la importación y exportación de recursos naturales caen en el ámbito de la coordinación política ¿bajo qué condiciones deben coordinarse las políticas medioambientales? ¿Deben los países harmonizar sus objetivos y coordinar sus instrumentos? ¿Es posible evaluar correctamente el daño medioambiental importado? Estas cuestiones son cruciales para entender que política es la más apropiada.

Por otro lado, la política medioambiental no puede considerarse independientemente de otras políticas que afectan a la interdependencia entre países. Esta es la razón por la que es importante analizar las interacciones entre política medioambiental y comercio internacional, la relación estricta entre economía política y economía medioambiental. En particular, existen muchas situaciones en las cuales la política medioambiental tiene efectos sobre el comercio, y la política comercial tiene efectos medioambientales relevantes.

También está ampliamente reconocido que la dimensión internacional de los fenómenos medioambientales, la estructura oligopolística de muchos mercados, los bajos efectos de sustitución inducidos por las eco-tasas, pueden empujar a los economistas a desarrollar nuevos instrumentos para la protección medioambiental y/o reconsiderar el papel de las herramientas medioambientales estándar. En ocasiones se señala que la innovación tecnológica es crucial para evaluar los efectos de la política medioambiental sobre la producción, el crecimiento, la sostenibilidad. ¿Cómo deben diseñarse los instrumentos políticos cuando se tiene en cuenta la innovación medioambiental? ¿Debe dirigirse la política a estimular la innovación tecnológica en lugar de a reducir el consumo de energía o la producción de polución?

Otro tema político relevante es ¿cuál es el papel del progreso tecnológico en los procesos que lleva a menores emisiones y a una mayor protección medioambiental?

Este trabajo intenta desarrollar un modelo dinámico de conservación óptima de la biodiversidad de un ecosistema. La riqueza de las especies (número de especies) se utiliza como una medida de la diversidad y sus interacciones con el stock de capital se estudian utilizando un modelo de juego diferencial entre dos regiones, Norte y Sur, con una única variable de estado para ambos y una variable de control por cada jugador. El número de especies entra en la función de bienestar social debido a la contribución en términos de su valor de atracción y sus usos opcionales en el futuro. Las trayectorias dinámicas se ilustran mediante técnicas numéricas. Éstas muestran que bajo determinadas condiciones sobre los parámetros del modelo puede conseguirse un crecimiento ilimitado del stock de capital, aún cuando se adopta una buena política desde un punto de vista de preservación de la biodiversidad. Bajo otras condiciones se establece la imposibilidad de alcanzar un crecimiento económico sostenible. La posibilidad de cambiar de escenario, y pasar de un tipo de condiciones a otro, puede alcanzarse con un proceso de innovación tecnológica, lo que subraya el importante papel que ésta juega en la consecución de un crecimiento económico indefinido, que tenga en cuenta la conservación medioambiental, en este caso, la conservación de la diversidad biológica.

2. EL JUEGO DIFERENCIAL NORTE-SUR

En esta sección planteamos el modelo de comercio Norte-Sur como un juego dinámico entre las dos regiones. Siguiendo el trabajo de Galor [11], suponemos que la producción de un bien de consumo en el Norte se rige por la siguiente función de producción con coeficientes fijos:

$$Y(t) = \min\left[aR(t),\, bK(t),\, zL(t)\right], \qquad b > 1,\, a > 0,\, z > 0,$$

donde los inputs son las cantidades de un bien intermedio, $R(t)$, de capital, $K(t)$, y de trabajo, $L(t)$. El Sur para producir el bien intermedio, $R(t)$, que el Norte utiliza como input, selecciona un número de especies naturales de entre la diversidad de especies de que dispone. En el Sur suponemos una economía de tipo Lewis con trabajo ilimitado, el cual puede ser exportado a su vez al Norte. Bajo esta, hipótesis la función de producción del Norte puede escribirse como una función que depende exclusivamente del capital: $Y(t) = bK(t)$. Por su parte, la función de producción del Sur puede expresarse como dependiente de su único input, el trabajo, de la forma: $\mathrm{R(t)} = a\left(n(t)\right)L\left(n(t)\right)$.

En esta expresión $L(t) = \int_0^{n(t)} l_i(t)di$, representa el trabajo agregado, donde $n(t)$ es el número de especies utilizadas por el Sur en su proceso productivo para obtener el bien intermedio demandado por el Norte, y l_i representa el trabajo utilizado en la especie *i*. Suponemos que esta última función es proporcional a *R*, cantidad de bien intermedio demandada por el Norte, de tipo exponencial y decreciente con *i*. En particular, consideramos la siguiente forma funcional: $l_i(t) = R(t)\ \exp[-i/m]/m^2$. En esta especificación el parámetro *m* valora el grado de homogeneidad en la utilización del trabajo entre las especies. Así, consideramos que cuanto mayor sea su valor menor será la diferencia en el trabajo dedicado entre las especies que se utilizan más y menos intensivamente.

Por lo que se refiere a la productividad, $a(n(t)) = m/(1-\exp[-n(t)/m])$, se supone uniforme entre las especies, y negativamente dependiente de *n*. Este supuesto indica que cuanto menor sea el número de especies utilizadas en el Sur en su proceso productivo, mayor será el ratio de trabajo por especies. Por tanto, suponiendo economías de escala, mayor será la productividad. Por el contrario, el efecto de *m* es positivo; así, según crece *m* el trabajo decrece en las especies utilizadas más intensivamente, y a la inversa en las utilizadas menos intensivamente. Estamos suponiendo implícitamente que la pérdida de productividad debida al primer efecto es menor que la ganancia debida al segundo. Esta especificación de la función de producción del Sur obliga a que la demanda del Norte del bien intermedio siempre iguale la oferta del Sur.

Mediante la elección del tanto de ahorro, *s(t)*, el Norte decide la parte de su renta que dedica a invertir o a consumir, tras pagar todos los inputs. Se considera que cada trabajador consume, como mínimo, el salario del nivel de subsistencia, $\overline{w}$. El consumo en el Norte viene dado por: $c_N(\mathrm{t}) = [y(t) - \overline{w}L(t) - p(t)(1+d_1)R(t)](1-s(t)) + \overline{w}L$ o bien de forma alternativa exclusivamente en términos de la variable capital, $K(t)$:

$$c_N(t) = bK(t)[1 - q - p(t)(1+d_1)/a](1-s(t)) + \overline{w}L \text{ donde } q = \overline{w}/\mathrm{z}.$$

Por su parte, el Sur no ahorra nada, pues no existe ningún proceso de inversión. Esto lleva a que todo lo que se obtiene de la exportación de $R(t)$ al Norte sea consumido, excepto una porción dada por d_1 que es utilizada para mejorar el medio ambiente, en procesos tales como limpieza de polución o conservación de ecosistemas. De esta forma el consumo en el Sur viene dado por: $c_S(t) = p(t)R(t)$.

Se supone la existencia de competencia perfecta así como libre entrada de empresas en la industria productora del bien intermedio en el Sur. Esto obliga a que las ganancias de la venta del bien intermedio, descontando la parte que se dedica a mejoras en el medio ambiente, debe igualar los gastos de producción, que se componen exclusivamente por salarios, $p(t)R(t) = \overline{w}L(t)$. Esta igualdad lleva a que, una vez fijado por el Sur el número de especies a utilizar en su proceso productivo, $n(t)$, y por tanto el trabajo, $L(t)$, y dada la demanda de este bien intermedio que realiza el Norte, $R(t)$, el mercado fijará su precio:

$$p(t) = \overline{w}[1 - \exp(-n(t)/m)]/m\ .$$

Se considera que el Sur necesita, al menos, un número mínimo de especies, $n_{\min}$, para producir el bien natural intermedio. Este número establece un precio mínimo, que denotamos por $p_{\min}$. La expresión del precio muestra que éste crece con el número de especies utilizadas en el proceso productivo. Además, se ha supuesto que el consumo en el Norte es mayor que el nivel de subsistencia, $\overline{wL}$. Así, $d(t) = b(1 - q - p(t)(1 + d_1)/a)$ debe ser positivo. Este término representa lo que le queda al Norte una vez que éste paga el trabajo y el bien intermedio que compra al Sur. Esta cantidad puede bien dedicarse al consumo o bien a la inversión. Surgen dos posibles casos:

- Escenario I: si para un precio suficientemente alto, esta expresión se anula, esto llevaría a establecer una cota superior para el número de especies utilizadas por el Sur, $n_{\max}$. Por encima de esta cota no sería posible la producción.
- Escenario II: si, por el contrario, esta expresión es positiva para cualquier precio, independientemente de lo grande que éste sea, esto implicaría que el proceso productivo en el Norte y en el Sur continuaría, utilizándose cada vez más especies. El Norte consumiría siempre por encima de su nivel de subsistencia, fuera cual fuera el precio establecido por el Sur.

Dado que la expresión del precio muestra que éste toma valores siempre por debajo de $\overline{w}/m$, entonces, el primer caso aparece cuando $am(1-q) < \overline{w}(1+d_1)$. Recíprocamente, el segundo caso aparece cuando esta desigualdad se cumple en sentido opuesto, $am(1-q) \geq \overline{w}(1+d_1)$. En el primer caso, el Sur podría fijar un número tan grande de especies utilizadas, y por tanto, un precio tan alto, que llevaría a que el consumo del Norte fuera menor que $\overline{wL}$, que por ello no produciría cantidad alguna. Para que esto no suceda, es necesario imponer una cota superior para el precio, $p_{\max}$, que es la que hace $d(t)$ igual a cero. Como consecuencia se tiene una cota superior para el número de especies utilizadas:

$$n_{\max}(t) = -m \ln\left[1 - m(1-q)a / \left(\overline{w}(1+d_1)\right)\right].$$

En Cabo & Martín-Herrán [5], [6], [7], se considera el primer caso. La razón es que se supone que no puede aceptarse un crecimiento económico indefinido si éste se consigue utilizando especies naturales sin límite.

El problema se plantea como un juego diferencial donde el Norte decide su tanto de ahorro, así, su inversión, con el objetivo de maximizar su flujo de utilidad descontada. Aunque su utilidad coincide con su consumo, el Norte también tiene en cuenta el número de especies preservadas, en cuanto acepta pagar un precio extra por el bien natural intermedio, medido por la porción d_1.

$$\max_{s(t)} W_N = \max_{s(t)} \int_0^{\infty} e^{-rT} c_N(t) dt$$
$$s.a.: \quad \dot{K}(t) = K(t) d(t) s(t), \quad K(0) = K_0 > 0, \quad 0 \leq s(t) \leq 1.$$

Por lo que se refiere al Sur, éste fija el número de especies que utiliza en su proceso productivo, con el fin de maximizar su flujo de utilidad. En este caso la utilidad se establece, por un lado, en términos del consumo y por otro, de la biodiversidad, a través de $d_2 n(t)$.

$$\max_{n(t)} W_S = \max_{n(t)} \int_0^{\infty} e^{-rT} \left(c_S(t) - d_2 n(t) \right) dt$$
$$s.a.: \quad \dot{K}(t) = K(t) d(t) s(t), \quad K(0) = K_0 > 0, \quad n_{\min} \leq n(t).$$

En el escenario I, además hay que añadir una restricción adicional en la variable número de especies utilizadas, que corresponde a una cota superior: $n_{\max}$.

Aunque se consideran dos regiones, el modelo se plantea con una única variable de estado, el capital en el Norte, $K(t)$. La dinámica del stock de capital se expresa como una función de esta variable y de las variables de control de ambos jugadores, $s(t)$ y $n(t)$. La preocupación del Norte sobre la biodiversidad del Sur, medida por d_1, influye en su consumo y en la evolución del stock de capital. Por su parte, el interés del Sur en conservar su biodiversidad, medida por d_2, únicamente afecta a su utilidad.

3. TRAYECTORIAS ÓPTIMAS

Los equilibrios de Nash del juego diferencial anteriormente planteado, se obtendrán como soluciones de los dos problemas de control óptimo por separado para cada uno de los jugadores, [3], [12].

Por lo que se refiere a las trayectorias óptimas del Norte, las condiciones necesarias que éstas satisfacen se deducirán a partir del Principio del Máximo de Pontryagin:

$$\dot{K}(t) = K(t) d(t) s(t), \qquad K(0) = K_0,$$
$$\dot{m}_N(t) = \left[r - d(t) s(t) \right] m_N(t) - d(t) \left(1 - s(t) \right),$$

donde $m_N(t)$ es la variable de coestado asociada a la variable de estado $K(t)$.

La expresión óptima para la variable de control, que maximiza el Hamiltoniano asociado al problema, viene dada por la siguiente solución bang-bang:

$$s^*(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } m_N(t) < 1, \\ 1 & \text{si } m_N(t) > 1. \end{cases}$$

El Norte ahorra, y por lo tanto invierte a su tasa máxima o no invierte nada, según que el valor de su variable de coestado supere o no a 1.

En cuanto al Sur, las condiciones necesarias establecen:

$$\dot{K}(t) = K(t)d(t)s(t), \qquad K(0) = K_0,$$
$$\dot{m}_S(t) = [r - d(t)s(t)]m_S(t) - bp(t)/a,$$

siendo $m_S(t)$ la variable de coestado del Sur asociada al capital.

Su variable de control óptima puede escribirse como:

$$n^*(t) = \begin{cases} n_{\min}, & \text{si } \; b\overline{w}K(t)\big(1 - m_S(t)(1+d_1)s(t)\big)/\big(am^2 d_2\big) < \exp(n_{\min}/m), \\ n_{\max}, & \text{si } \; b\overline{w}K(t)\big(1 - m_S(t)(1+d_1)s(t)\big)/\big(am^2 d_2\big) > \exp(n_{\max}/m), \\ m\ln\big[b\overline{w}K(t)\big(1 - m_S(t)(1+d_1)s(t)\big)/\big(am^2 d_2\big)\big], & \text{en otro caso.} \end{cases} \tag{1}$$

Esta expresión define una función a trozos, de forma que el Sur decidirá un número mínimo de especies para determinados valores del capital y de su variable de coestado, y a partir de ciertos valores de estas variables este número de especies se establece en función de la tercera expresión. Por último, otros valores darán lugar a la elección de un número máximo de especies. Este último supuesto, no se dará cuando se cumpla la condición que implica el escenario II, pues no existe una cota máxima para $n(t)$.

Las estrategias óptimas de ciclo abierto del juego, vienen dadas por el par $\left(s^*(t), n^*(t)\right)$ que son las funciones definidas a trozos anteriormente. Estos pares podrán ser de la forma $s^*(t) = 0$ y el valor correspondiente de $n^*(t)$ que se obtiene al sustituir $s(t)$ por cero en (1). En caso de que el Norte juegue $s^*(t) = 1$, el valor correspondiente de $n^*(t)$ se obtiene al sustituir $s(t)$ por uno en (1). Dependiendo del par que los jugadores elijan en cada momento, se tendrá una función para el precio óptimo $p_1^*(t), p_0^*(t)$. Dado que hemos definido el precio como una función del número de especies, la expresión del precio óptimo en cada caso estará definida a trozos al igual que el número óptimo de especies.

El sistema dinámico para las estrategias de control óptimas, cuyas soluciones darán las trayectorias temporales de equilibrio de las variables de estado y coestado, se construye agrupando los dos sistemas dinámicos obtenidos por las condiciones necesarias del Principio del Máximo.

$$\begin{aligned} &\dot{K}(t) = K(t)d^*(t)s^*(t), \qquad K(0) = K_0, \\ &\dot{m}_N(t) = [r - d^*(t)s^*(t)]m_N(t) - d^*(t)\big(1 - s^*(t)\big), \\ &\dot{m}_S(t) = [r - d^*(t)s^*(t)]m_S(t) - bp^*(t)/a, \end{aligned} \tag{2}$$

donde $d^*(t) = b\big(1 - q - p^*(t)(1+d_1)/a\big)$.

Deseamos estudiar el comportamiento de este sistema bajo los escenarios I y II, es decir asumiendo la existencia o no de un número máximo de especies que el Sur puede soportar sea utilizada en su proceso productivo.

Para cada uno de los dos escenarios el sistema (2) tiene un comportamiento bien diferenciado. Mientras que cuando el Norte no ahorra nada, el sistema tiene solución analítica, cuando decide ahorrar a su tasa máxima, no es posible obtenerla. Para ambos escenarios, las soluciones, cuando se supone que no hay ahorro durante todo el horizonte temporal del juego, pueden expresarse:

$$K(t) = K_0,$$
$$m_N(t) = d(p_0^*)/r + \left[m_{N0} - d(p_0^*)/r\right]\exp(rt),$$
$$m_S(t) = \left(b(1-q) - d(p_0^*)\right)/\left((1+d_1)r\right) + \left[m_{S0} - \left(b(1-q) - d(p_0^*)\right)/\left((1+d_1)r\right)\right]\exp(rt),$$

donde m_{N0}, m_{S0} son los valores iniciales de las variables de coestado, y $d(p_0^*)$ es el valor de $d(t)$ cuando el Norte decide no ahorrar. El capital se mantiene constante debido a la inexistencia de inversión. Las variables de coestado de ambas regiones crecen, decrecen o se mantienen constantes, según sus valores iniciales estén por encima, debajo o sobre sus valores de estado estacionario:

$$m_N^*(t) = d(p_0^*)/r,$$
$$m_S^*(t) = \left(b(1-q) - d(p_0^*)\right)/\left((1+d_1)r\right).$$

Cuando se parte de una condición inicial de la variable de coestado del Norte, menor o igual que su valor de estado estacionario, tenemos que el sistema evoluciona durante todo el horizonte temporal manteniendo la tasa de ahorro nula. Esta solución implica la inexistencia de crecimiento económico.

Las condiciones de transversalidad:

$$\lim_{t\to\infty} m_N(t)\exp(-rt) = 0, \qquad \lim_{t\to\infty} m_S(t)\exp(-rt) = 0,$$

se verifican cuando las variables de coestado permanecen constantes iguales a sus valores de equilibrio.

La elección óptima del Norte es $s^* = 0$, si y sólo si su variable de coestado es menor que uno. Esto establece una cota inferior para p_0^* y por lo tanto, para el valor inicial del capital, K_0:

$$K_0 > am^2 d_2(1+d_1)/\left[b\left(\overline{w}(1+d_1) - am(1-q)\right) + amr\right] = \tilde{K}.$$

Luego, para un capital inicial por encima de esta cota, no hay crecimiento.

Estudiaremos seguidamente, la posibilidad de soluciones que conlleven un crecimiento indefinido, lo que implica la necesidad de ahorrar a lo tasa máxima permanentemente. Si esto no es posible, se buscarán soluciones que impliquen al menos, la aparición de un periodo de crecimiento seguido de otro de estancamiento. Este estudio se va a llevar a cabo de forma separada para los dos escenarios anteriormente descritos.

3.1. ESCENARIO I

3.1.1. Máxima tasa de ahorro: $s^* = 1$.

En primer lugar estudiamos la posibilidad de que el Norte mantenga una tasa de ahorro máxima durante todo el horizonte temporal. El sistema dinámico que caracteriza las trayectorias óptimas no es integrable para $s^* = 1$, pero sí se pueden deducir el comportamiento cualitativo de las soluciones a través del análisis del mapa de fase *K*-m_S.

La ecuación primera y tercera del sistema dinámico en este caso toman la forma:

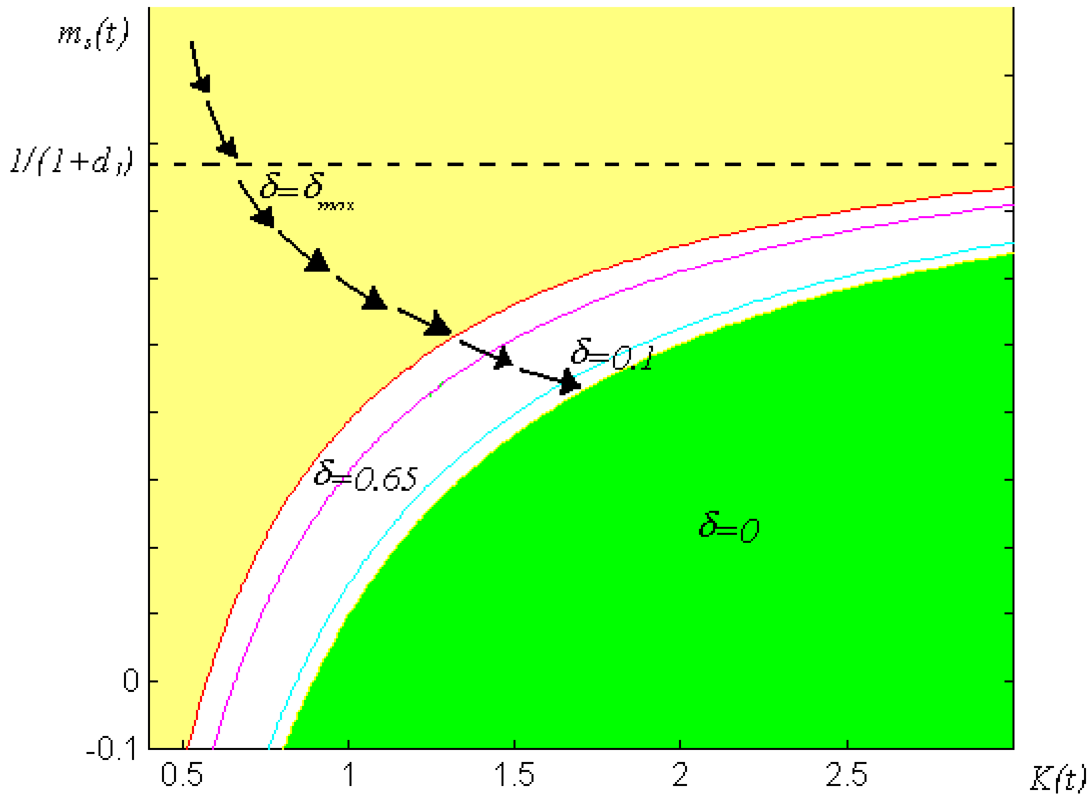
$$\dot{K}(t) = K(t) d\left(p_1^*(t)\right),$$
$$\dot{m}_S(t) = \left[r - d\left(p_1^*(t)\right)\right] m_S(t) - b p_1^*(t) / a,$$

donde $d\left(p_1^*(t)\right)$ depende de las variables $K(t)$ y $m_S(t)$. La siguiente gráfica muestra las curvas de nivel para $d\left(p_1^*(t)\right)$ en el plano *K*-m_S.

El gradiente, que marca la dirección de crecimiento más rápido de $d\left(p_1^*(t)\right)$, para cada curva de nivel este gradiente señala la dirección noroeste. La evolución de $K(t)$ y $m_S(t)$ no puede ser calculada analíticamente. No obstante, sí se conoce el comportamiento cualitativo para valores positivos de $K(t)$ y siempre que $m_S(t)$ se mueva entre 0 y $1/(1+d_1)$. Cuando $K(t)$ y $m_S(t)$ se encuentran en este rango el stock de capital siempre crece, mientras que la variable de coestado del Sur disminuye. Estas variables evolucionan en dirección opuesta a la del gradiente, pasando sucesivamente a curvas de nivel, con $d\left(p_1^*(t)\right)$ cada vez más pequeños. Esto se prueba analíticamente calculando el producto escalar del vector gradiente de $d\left(p_1^*(t)\right)$ para cada uno de los niveles, por el vector que recoge la dinámica de $K(t)$ y $m_S(t)$. Sea cual sea el nivel, este producto escalar presenta un valor negativo para valores de $m_S(t)$ por debajo de la asíntota[1] de las curvas de nivel, $m_S(t)$=1/(1+d1). Según esto, el camino descrito por el stock de capital y el pseudoprecio del Sur, cruza las curvas de nivel desde el noroeste hacia el sureste. Esto implica que el sistema alcanza $d = 0$, manteniéndose en este valor desde ese momento en adelante. Esto significa la paralización del crecimiento del stock de capital. Por lo tanto no es posible el mantenimiento de un crecimiento indefinido.

---

[1] Valores de $m_S(t)$ sobre esta asíntota, se corresponden con curvas de nivel de valor negativo. Ya que nos interesan valores positivos de $d\left(p_1^*(t)\right)$ que garanticen crecimiento del capital, no tendremos en cuenta este dominio.



Del sistema dinámico (2), para el caso de ahorro a la tasa máxima se puede deducir una relación entre la evolución del stock de capital y la variable de coestado del Norte:

$$\dot{m}_N(t)/m_N(t) = r - \dot{K}(t)/K(t),$$
$$m_N(t) = C\exp(rt)/K(t) \qquad C \neq 0.$$

La condición suficiente de transversalidad para $m_N(t)$ implica una condición sobre $K(t)$:

$$\lim_{t\to\infty} m_N(t)\exp(-rt) = \lim_{t\to\infty} C/K(t) = 0,$$

lo que conlleva que $\lim_{t\to\infty} K(t) = \infty$. Por lo tanto no se puede garantizar que la solución anteriormente obtenida, que no presenta crecimiento sostenido, sea óptima.

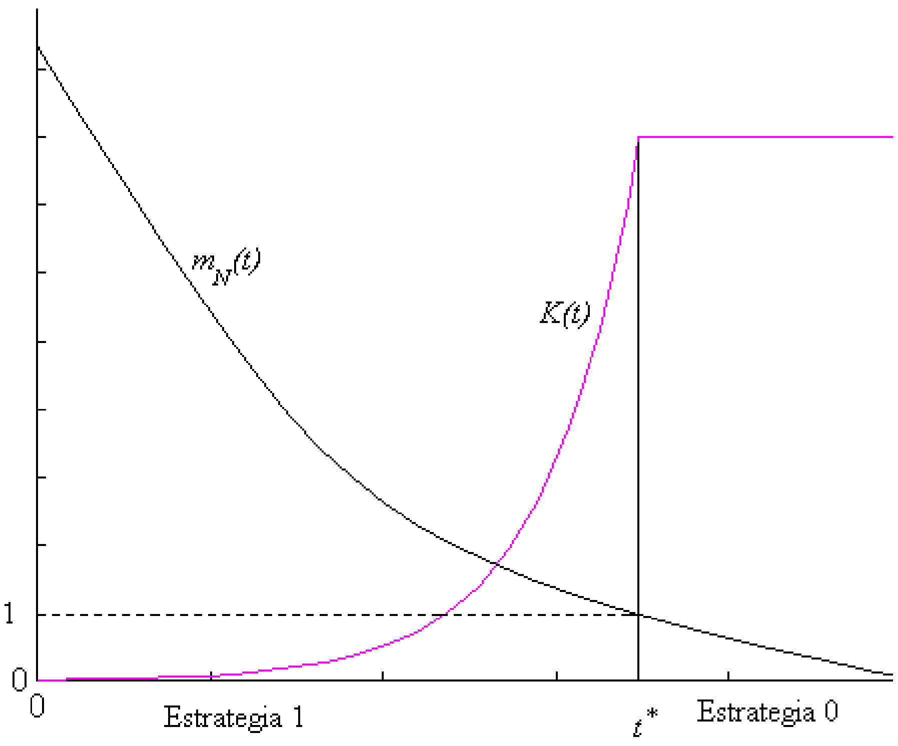
3.1.2. Máxima tasa de ahorro y no ahorro: $s^* = 1$, $s^* = 0$.

Estudiamos ahora el caso en el cual el Norte juega $s^* = 1$ durante un primer periodo finito, y $s^* = 0$ a partir de entonces. En el primer periodo, $(0, t^*)$ como se ha visto en la subsección 3.1.1. el capital crece y la variable de coestado del Sur decrece, llevando a una continua reducción en $d(p_1^*(t))$. La solución óptima requiere valores iniciales para las variables de coestado del Norte y del Sur. Estas condiciones iniciales deben garantizar que

$m_N(t)$ y $m_S(t)$ alcancen 1 y $(b(1-q)-r)/[r(1+d_1)]$ respectivamente en t^*. En este instante, el Norte cambia de estrategia y decide no ahorrar en adelante. El sistema dinámico que rige el comportamiento óptimo de las variables a partir de ese momento es el ya analizado en el caso en el que la política óptima es no ahorrar. El capital permanece constante así como los precios sombra. Teniendo en cuenta las condiciones de transversalidad se tiene el valor para estos precios:

$$m_N(t) = d\left(p_0^*\right)/r = 1, \quad m_S(t) = \left[b(1-q) - d\left(p_0^*\right)\right]/\left[r(1+d_1)\right],$$

para cualquier tiempo mayor o igual a t^*. Para que esto sea posible, $d(p_0^*)$ debe ser igual al tanto de descuento, *r*. De esta igualdad, es fácil deducir que el valor del stock de capital en el tiempo de cambio t^*, es igual a la cota superior $\tilde{K}$. Así, en el tiempo inicial, el Norte fija $s^* = 1$ y el capital crece hasta que alcanza dicha cota, como se muestra en la siguiente gráfica. Por tanto, si el capital inicial fuese mayor que $\tilde{K}$, no habría crecimiento, es decir, se estaría en el caso $s^* = 0$ para todo el horizonte temporal.



De esta forma se han caracterizado las posibles soluciones óptimas para cualquier valor inicial del stock de capital. Si el valor inicial es menor que $\tilde{K}$, siempre hay un periodo en el cual el capital crece, seguido de otro periodo infinito de estancamiento. Si, por el contrario, el capital inicial es mayor que esta cota, entonces permanece invariable indefinidamente. En ambos casos se alcanza el estado estacionario para la estrategia en la que no se ahorra.

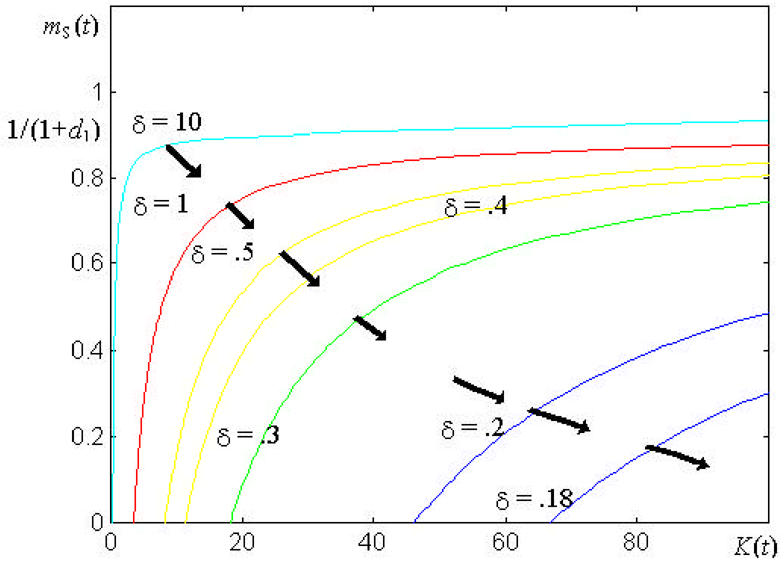
El capital y los precios sombra permanecen constantes.

3.2. ESCENARIO II

3.2.1. Máxima tasa de ahorro: $s^* = 1$.

Las variables $K(t)$ y $m_S(t)$ evolucionan como en el subapartado 3.1.1, el capital crece mientras que la variable de coestado del Sur disminuye. No obstante, para conocer como evoluciona $d\left(p_1^*(t)\right)$ de nuevo se calcula el producto escalar del vector gradiente de $d\left(p_1^*(t)\right)$ para cada uno de los niveles, por el vector que recoge la dinámica de $K(t)$ y $m_S(t)$. En este caso, este producto no tiene un signo invariable, sino que por el contrario, depende del valor del nivel de la curva sobre la cual se calcula. Así, para valores del nivel superiores a $\hat{a} = b[am(1-q) - \overline{w}(1+d_1)]/(am)$, el producto es siempre negativo, como en el escenario 3.1.1. Sin embargo, para valores por debajo de $\hat{a}$ el producto es de signo contrario.

En este escenario, al igual que en 3.1.1, según transcurre el tiempo, al aumentar el stock de capital y disminuir la variable de coestado del Sur, se van alcanzando curvas de nivel cada vez menor, tendiendo hacia aquélla con nivel $\hat{a}$ en el infinito. La diferencia entre ambos escenarios estriba en que, en el primer caso, $\hat{a}$ es un valor negativo, y, por tanto, al tender hacia ese valor, se cruza la curva de nivel cero, en la que se permanece, ya que en ese momento el stock de capital permanece constante para siempre. Por el contrario, en el caso actual, $\hat{a}$ es un valor positivo, hacia el que tienden las curvas de nivel desde valores más altos. Según esto, bajo esta hipótesis, según transcurre el tiempo nunca se alcanza la curva de nivel cero, $d\left(p_1^*(t)\right)$ es siempre positivo y por lo tanto, el capital crece indefinidamente. En la siguiente gráfica se muestran las curvas de nivel K-m_S para distintos niveles.



3.3. ESCENARIO I vs. ESCENARIO II

El que el sistema evolucione según uno u otro escenario, viene dado porque la expresión $am(1-q)-\overline{w}(1+d_1)$ sea positiva o negativa. Cuando es positiva rige el escenario II y viceversa. Esto es equivalente a que el nivel de la curva al que se tiende cuando el capital crece y la variable de coestado del Sur decrece indefinidamente, $\hat{a}$, sea positivo o negativo. Según esto, la aparición o no de crecimiento sostenido, viene determinada por los valores de los parámetros involucrados en la expresión anterior.

Esta expresión muestra una relación inversa entre la preocupación medioambiental del Norte, medida por d_1, y el grado de homogeneidad en la utilización del trabajo entre las especies por parte del Sur, m . Fijados a, $\overline{w}$ y q , cuanto mayor sea esta preocupación, mayor deberá ser el grado de homogeneidad para garantizar que se produzca crecimiento sostenido. Teniendo en cuenta la relación directa entre m y la productividad marginal del trabajo, lo que realmente se precisa es una mayor productividad. Es decir, la única forma de mantener una preocupación alta por la biodiversidad en el Norte, y al mismo tiempo crecimiento sostenido, será a través de una inversión en tecnología que haga aumentar la productividad del Sur a través de una utilización más homogénea de las especies. Según este razonamiento, si el Norte está dispuesto a pagar un sobreprecio alto por el bien intermedio y éste no es empleado en una mejora de la productividad, como caso más favorable se podría producir un primer periodo finito de crecimiento, pero siempre seguido de uno indefinido de estancamiento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la posibilidad de crecimiento económico sostenido, atendiendo a la necesidad de acotar superiormente o no el número de especies a utilizar en el proceso productivo por el Sur. Es decir, se suponen dos escenarios, según la producción del bien intermedio sólo sea posible utilizando especies hasta un número máximo o, si por el contrario, se admita la posibilidad de producir utilizando un número indefinido de especies. En el primer escenario, es posible encontrar soluciones que presentan crecimiento del stock de capital durante un periodo de tiempo, que en cualquier caso, nunca es indefinido. También se caracterizan soluciones que no presentan crecimiento de capital. Por lo que se refiere al segundo escenario, se prueba que en este caso sí es posible el mantenimiento del crecimiento económico indefinidamente. A la vista de la condición que establece la presencia de un escenario u otro, se comprueba que el crecimiento sostenido solamente es alcanzable cuando la mayor preocupación del Norte por la biodiversidad del Sur viene de la mano de un incremento de la productividad del trabajo en esta última región. Esto podría conseguirse a través de una inversión en tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barbier , E.B.; Aylward, B.A. “Capturing the Pharmaceutical Value of Biodiversity in a Developing Country”, *Environmental and Resource Economics* 8, 1996, pp. 157-181.
2. Barney, G.O. *The Global 2000 Report to the President off the US*, 1980, Vol. I, Pergammon, New York.
3. Benhabib, J.; Radner, R. “The Joint Exploitation of a Productive Asset: a Game-Theoretic Approach”, *Economic Theory* 2, 1992, pp.155-190.
4. Cabo, F. “Valuation of Biodiversity in a North-South Trade Model”, *Environmental Development Economics*, aparecerá en 3(4), 1999.
5. Cabo, F.; Martín-Herrán, G. “Biodiversity: A North-South Trade Differential Game”, 1998, en proceso de evaluación.
6. Cabo, F.; Martín-Herrán, G. “Biodiversity, North-South Trade and Economic Growth”, 1998, presentado en el Fifth Biennial Meeting International Society for Ecological Economics, celebrado en Santiago de Chile.
7. Cabo, F.; Martín-Herrán, G. “Efecto de la Biodiversidad en un Modelo Dinámico de Comercio Norte-Sur”, 1998, presentado en la XII reunión ASEPELT España, celebrada en Córdoba.
8. Chichilnisky, G. “North-South Trade and the Global Environment", *American Economic Review* 84, 1994, pp. 851-874.
9. Constanza, R. “Ecological Economics: A Research Agenda”, *Structural Change and Economic Dynamics*, 2, 1991, pp. 335-357.
10. Dockner, E.; Van Long, N. “International Pollution Control: Cooperative versus Noncooperative Strategies", *Journal of Environmental Economic and Management* 24, 1993, pp. 13-29.
11. Galor, O. “Global Dynamic Inefficiency in the Absence of International Policy Coordination: a North-South Case", *Journal of International Economics* 21, 1986, pp. 137-149.
12. Kaitala, V.; Pohjola, M. “Economic Development and Agreeable Redistribution in Capitalism: Efficient Game Equilibria in a Two-Class Neoclassical Growth Model”, *International Economic Review* 31, 1990, pp. 421-438.

13. Keller, H.B. *Numerical Methods for Two-Point Boundary-Value Problems*, 1992. Dover Publications, Inc. New York.
14. Perrings, C. *Economy and the Environment: A Theoretical Essay on the Interdependence of Economic and Environmental Systems*, 1987. Cambridge University Press, Cambridge.
15. Perrings, C. et all. “The Ecology and Economics of Biodiversity Loss: The Research Agenda”, *AMBIO* 21 (3), 1992.
16. Tisdell, C. *Environmental Economics: Policies for Environmental Management and Sustainable Development*, 1993, Edward Elgar, Cheltenham.
17. Yeung, D.; Cheung, M. “Capital Accumulation Subject to Pollution Control: a Differential Game with a Feedback Nash Equilibrium”. *Advances in Dynamic Games and Applications*. Eds. Basar, T. and A. Haurie. 1994, pp. 289-300. Birkhäuser, Boston.