

Desarrollo sostenible y manejo de incertidumbres

Celso Vargas*

Este artículo constituye mi primera aproximación al problema del manejo de las incertidumbres desde el punto de vista del desarrollo sostenible, por tanto, algunos de los aspectos discutidos pueden no ser tan importantes a partir de una investigación posterior. No he encontrado mucha bibliografía sobre el tema. Tampoco he encontrado que se tome muy en serio el concepto de incertidumbres cuando se discute sobre desarrollo sostenible, sobre todo entre los científicos y tecnólogos nacionales. Sin embargo, considero que es una dimensión que siempre debe ser tomada en consideración, y que proporciona un nuevo ángulo metodológico para abordar el desarrollo sostenible.

Se insiste mucho en este artículo en el cambio de actitud del científico y del tecnólogo a fin de evaluar de manera crítica su propio trabajo tomando en consideración el nuevo marco del desarrollo sostenible. Finalmente, quisiera indicar que en este artículo se analizan únicamente las incertidumbres que se dan a nivel científico y tecnológico. Se dejan de lado, las fuentes de incertidumbre relacionadas con las dimensiones sociales y políticas del desarrollo sostenible. Estas otras fuentes no pueden separarse de la discusión sobre el desarrollo sostenible.

* Departamento de Computación.
Departamento de Ciencias Sociales.
Instituto Tecnológico de Costa Rica.

1. Contexto

En este artículo no entramos a discutir aspectos relacionados con las características y dimensiones del desarrollo sostenible, o de si éste es una ideología o no. Respecto al primer aspecto tomaremos como base la caracterización del desarrollo sostenible que se presenta en el **Programa 21** de las Naciones Unidas. Con respecto al segundo aspecto, asumiremos que es un modelo de desarrollo con el cual debemos comprometernos y orientar nuestros esfuerzos hacia ese modelo de desarrollo para enfrentar algunos de los problemas teóricos que surgen.

La evolución de las sociedades modernas se ha caracterizado por su no sostenibilidad, esto es, por dejar de lado la evaluación y previsión del impacto de las prácticas e intervenciones humanas en el planeta. Esta no sostenibilidad se pone de manifiesto en un sin número de situaciones y prácticas entre las que se pueden mencionar: el uso y explotación indiscriminado de los recursos naturales, el desarrollo urbano no planificado, el crecimiento demográfico desproporcionado y la actitud claramente intervencionista e incontrolada de la ciencia y la tecnología. Son estas prácticas las que atentan contra el planeta como sustentador de la vida.

Por otro lado, no se puede negar que el desarrollo científico y tecnológico es, sin duda, la característica más visible de estas

sociedades. No es posible, actualmente, lograr niveles significativos en desarrollo sostenible sin la ciencia y la tecnología. De ahí que cuando se piensa en desarrollo sostenible en las actuales condiciones, la ciencia y la tecnología están destinadas a cumplir un papel central. Pero se requiere reorientar esta forma de obtener conocimiento, de tal manera que garantice que el planeta siga manteniendo el carácter de sustentador de la vida.

Los logros en pro del desarrollo sostenible, dependerán fuertemente del cambio de actitud, de concepción y de práctica respecto al modo como se han estado haciendo las cosas.

2. Ejemplos de prácticas no sostenibles

Se puede afirmar con bastante certeza que un alto porcentaje de prácticas humanas han sido no sostenibles. Como ejemplos que destacan se pueden mencionar, las aplicaciones del DDT, la tecnología de radiaciones (industria nuclear), emisiones de gases con efecto de invernadero y la distribución e infraestructura de los asentamientos humanos. Todos estos ejemplos tienen la característica de que la evaluación de su impacto ambiental fue hecha *a posteriori*, es decir, hasta que se descubrieron efectos no deseados. Las normas que regulan las aplicaciones, o que prohíben usos han sido el resultado de evaluaciones posteriores.

Uno de los ejemplos más espectaculares en este sentido fue el de las aplicaciones del DDT como agroquímico. Este producto fue sintetizado en el siglo pasado, pero su aplicación para el control de enfermedades vectoriales y como insecticida se intensificó a partir de la década de 1940. En 1972, el gobierno de los Estados Unidos prohibió su uso. En esos 30 años se utilizaron, solo en los Estados Unidos, mil trescientos cincuenta millones de libras de DDT. Nunca se previó

el tipo de consecuencias que este agroquímico produciría en el ámbito mundial.

En pocos años prácticamente todo el planeta presentaba concentraciones significativas de DDT, por dispersiones residuales. Los primeros estudios sobre estas dispersiones se realizaron hacia finales de la década de 1950. Se encontró la presencia de DDT en muchas especies marinas de todos los niveles tróficos, en los pingüinos, las focas del Antártido, en las aves, insectos, mamíferos, en la vegetación, etc. Se determinó su influencia en la dinámica de reproducción de muchos organismos, se encontraron variaciones en las tasas de reproducción, adelgazamiento de la cáscara de varios tipos de huevos de aves, dosis importantes en alimentos humanos (como carnes y productos lácteos), y en humanos.

Por otro lado, se determinó un alto nivel de permanencia en el ambiente (muchas aves morían hasta un año después de las aplicaciones, incluso varios años después de que fuera prohibido su uso), toxicidad, interacción con otras sustancias químicas que aumentaban su efecto, y resistencia a este insecticida y a otros. Como señala el National Research Council:

"La cancelación del uso del DDT se basó en la persistencia, transporte, bio-magnificación, efectos tóxicos y ausencia de beneficios del DDT, que se podían evitar con sustancias menos dañinas para el ambiente. En el curso de las investigaciones sobre el DDT y sus metabolitos, se desarrollaron muchas ideas sobre el movimiento, destino y efectos del contaminante en el ambiente. El DDT fue el primer plaguicida hacia el cual se desarrollaba una resistencia rápida y extensiva"
(National Research Council (1994) 469)

Desde el punto de vista del tema que nos ocupa, el ejemplo del DDT es ilustrativo en tres sentidos:



1. Tenía efectos ambientales que no fueron predichos cuando se introdujo. El DDT "no tuvo efectos laterales obvios, y era muy activo contra plagas de insectos. Como resultado, se usó ampliamente [...]. Pero al igual que otros productos químicos, el DDT tenía efectos impredecibles" (National Research Council (1994) 467). Esto refleja el hecho de que la tendencia dominante en ciencia y tecnología ha consistido en poner énfasis en los éxitos (verificaciones) más que en los posibles fracasos (refutaciones). Como se indicó anteriormente, **cuando se piensa a partir del desarrollo sostenible, esta tendencia debe ser ampliada, se tiene que introducir la dimensión crítica.**
2. Ni en la introducción del DDT ni en las evaluaciones posteriores hasta su cancelación, se utilizó el conocimiento ecológico existente. "No se hizo ningún esfuerzo formal para identificar los componentes valiosos del ecosistema, aunque fueron los efectos sobre estos los que llevaron a la disminución del DDT" (pág. 476). Este aspecto refleja una deficiencia muy común en el tipo de práctica no-sostenible, que puede resumirse en "**probemos y luego evaluemos**". Desde el punto de vista del desarrollo sostenible el modelo debe ser "**es mejor prevenir que lamentar**".
3. No hubo una estrategia formal de estudio de los impactos del DDT. En su estudio predominó la cooperación informal más que sistemática, ya algunos resultados fueron utilizados para presentar nuevos proyectos. Solo más adelante se llevaron a cabo estudios sistemáticos y de cooperación formal entre agencias e instituciones nacionales e internacionales. Nuevamente, el DDT nos proporciona una lección importante en el sentido de que, en el desarrollo de proyectos

científicos y tecnológicos, es necesario contar con estrategias para la evaluación y previsión de posibles efectos ambientales.

3. Niveles de incertidumbre

Desde el punto de vista del desarrollo sostenible conocer las fuentes de incertidumbre y cómo manejarlas adquiere una importancia fundamental. El ejemplo discutido en la sección anterior pone de manifiesto la necesidad de que se prevean las posibles consecuencias de un proyecto o de una práctica. En este sentido, la incertidumbre está directamente relacionada con la capacidad de predicción. A partir del conocimiento ecológico existente es posible considerar algunos tipos de incertidumbre, otros no. Es por tanto importante comenzar con un recuento de los tipos y fuentes de incertidumbre, para pasar luego a analizar las formas en que pueden ser tomadas en cuenta. Los niveles que se presentan a continuación no son claramente separables. Sólo se separan por razones metodológicas.

Incertidumbres debidas a la naturaleza del conocimiento humano

El conocimiento científico-tecnológico es el mejor medio que poseemos los seres humanos de conocer la realidad y procurar su transformación. Una teoría científica -un conjunto de ellas- está constituida por una red de hipótesis de diferente nivel con base en las cuales se intenta predecir y comprender el comportamiento de los eventos. Una teoría científica es un modelo de la realidad. La capacidad de construir teorías científicas está limitada por varios factores, entre ellos, por nuestra capacidad de representación. Una teoría que no tenga una representación coherente es muy difícil de comprender. Un ejemplo de ello son las teorías físicas y cosmológicas



contemporáneas. En el caso de la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica, principios como el de la complementariedad son difíciles de comprender y sobre todo de establecer sus límites. En efecto, proporcionar criterios de medición es un problema muy importante en estas teorías. En el caso de los modelos cosmológicos, no es fácil la determinación de unidades de tiempo cósmico, son difíciles de determinar. Así pues, **un primer nivel de incertidumbre está directamente relacionado con nuestra capacidad de representación.**

Por otro lado, el conocimiento científico no es acumulativo, sino que progresa a saltos. Cada revolución científica está marcada por un cambio importante en la manera de ver las cosas y aproximarse a la realidad. Cosas que eran improbables para una teoría son centrales en la nueva. Por ejemplo, dentro de la teoría newtoniana era muy improbable que la luz se curvara al pasar por un campo gravitacional. Esto es así, dado que los newtonianos no estaban en condiciones de plantearse estas cuestiones sobre la naturaleza de la luz. Sin embargo, fue central para corroborar la teoría de relatividad de Einstein. Ahora bien, dado que el conocimiento científico no es acumulativo, no podemos esperar que llegue un momento en que tengamos una teoría comprensiva sobre la realidad. El conocimiento científico es inagotable. Esta consideración introduce un segundo componente de incertidumbre que en términos de desarrollo sostenible puede plantearse así: **ninguna teoría científica puede agotar la realidad, y aspectos que son muy improbables pueden tornarse decisivos cuando se realiza un nuevo desarrollo tecnológico en el contexto del desarrollo sostenible.**

Aun así existen ciertos criterios para evaluar las teorías científicas y determinar cuándo una teoría constituye un progreso sobre una anterior: simplicidad, presuposiciones y contenido empírico, pero

el punto es que esta evaluación no puede hacerse a priori, es decir, sin tener dos o más teorías que evaluar.

Un tercer aspecto, que puede ser una consecuencia de los dos anteriores, es que el conocimiento científico es conjetural. Una conjetura o hipótesis se mantiene hasta que encontremos una explicación que sea menos problemática que la anterior o que nos permita hacer mejores predicciones. La revisión de ciertos supuestos y de conocimientos que en otras épocas se consideraron seguros ha sido una constante en la historia del desarrollo científico. Esto introduce nuevamente un tercer nivel de incertidumbre que podemos enunciar de la siguiente manera: **la probabilidad de que cualquier hipótesis sea falsa es muy alta desde el punto de vista lógico, aunque desde nuestra perspectiva, su falsación sea improbable.**

En el contexto del desarrollo sostenible el conocimiento ecológico cumple un papel fundamental. Es muy importante tomar en consideración que el conocimiento ecológico constituye un conjunto estructurado de conocimientos. Por tanto, está sometido a los mismos problemas de incertidumbre que cualquier otro campo empírico.

El manejo de las incertidumbres en este campo es muy complejo, y no existe receta sobre cómo tratarlas. El único método, como ha señalado Popper, consiste en ver las cosas no desde el punto de vista de que un experimento o aplicación se confirma o se sostiene, sino desde el punto de vista de la falsación, es decir, desde el punto de vista de los posibles argumentos en contra. Desde el punto de vista del desarrollo sostenible es importante anticipar algunas de las posibles consecuencias negativas que se pueden derivar, tomando siempre en consideración el carácter no definitivo del conocimiento ecológico existente. **El ejercicio de la crítica bien encauzada contribuirá a**

atenuar las incertidumbres a este nivel.

Sin embargo, como se ha señalado anteriormente, la crítica depende de aquellos factores que se consideran relevantes o probables. Todos aquellos casos catalogados de **improbables** se dejan de lado y pueden jugar un papel importante en la previsión. Así pues, hay un nivel de incertidumbre que no puede ser eliminado del todo pero sí minimizado mediante una actitud crítica y vigilante.

Incertidumbres debidas a la naturaleza de los ecosistemas y de los procesos ecológicos

El conocimiento ecológico del que se dispone en este momento deriva, por un lado, del estudio de casos de intervenciones no sostenibles similares a los ejemplos discutidos en la sección anterior, en particular aquellos bien documentados, y por el otro, del desarrollo teórico y de las aplicaciones de las ciencias biológicas y otras disciplinas. La incertidumbre en este nivel tiene su origen en tres fuentes principales: la complejidad y sensibilidad de los sistemas ecológicos; los problemas de orden político y organizacional de los sectores que están involucrados directamente en la toma de decisiones relativos a los ecosistemas, y los problemas asociados con la vinculación intersectorial involucrada en el desarrollo sostenible. Estas dos últimas fuentes de incertidumbre, sólo son mencionadas y requieren un análisis separado.

Con relación al primer aspecto, el concepto clave en ecología es el de sistemas ecológicos. La mayoría de los estudios en el campo ecológico no consideran la complejidad real de estos sistemas. Esto ha sido la causa de que, como se indica en el informe del National Research Council de los Estados Unidos, un número importante de investigaciones y proyectos no sean útiles desde el punto de vista ambiental. Pero, **no siempre se**

pueden controlar todas las interacciones que se dan a nivel de los ecosistemas, sobre todo si tomamos en consideración el hecho de que los ecosistemas son dinámicos. Esta es una fuente importante de incertidumbre.

Por un lado, las relaciones entre especies son muy complejas y en muchas ocasiones aquellas relaciones obvias y observables no son las fundamentales. Las relaciones indirectas, no siempre fáciles de establecer, son los elementos claves para el funcionamiento de muchos ecosistemas. La predicción de un efecto sobre un ecosistema basado en relaciones directas podría tener serias deficiencias. Este aspecto es particularmente relevante en el control biológico de insectos. **Muchas veces el tipo de control se hace depender de relaciones directas.**

Un segundo factor de complejidad de los ecosistemas viene dado por la densidad y la variabilidad individual entre especies. Este factor es particularmente relevante en las investigaciones en biotecnología. El carácter sostenible o equilibrado de un ecosistema que pueda tener algún beneficio para el ser humano u otros organismos dependerá de consideraciones sobre el número de individuos, depredadores, parásitos, etc., que soporte el ecosistema, así como de los factores genéticos de los individuos y de las especies involucradas. A partir de consideraciones sobre genética de poblaciones se infiere que la determinación de factores genéticos no es sencilla de establecer. Las personas que han estado en contacto con algún tipo de reproducción animal, se habrán dado cuenta que el hecho de que el padre tenga características genéticas o fenotípicas deseables, no es condición para que los hijos tengan estas características. **La predicción aquí es muy compleja.** Igualmente, es difícil cuando se trata de predecir las alteraciones que el introducir cierta variedad tendría para el ecosistema. Este aspecto tiene que

ver con el tercer factor que se discute a continuación.

Un tercer factor bastante importante tiene que ver con la determinación de las condiciones bajo las cuales un ecosistema se mantiene en equilibrio. Muchos de los modelos computacionales o matemáticos que se han propuesto, por ejemplo el modelo presentado por Momo (1995) para determinar el nivel de soporte de especies por un ecosistema, manejan un conjunto muy reducido de variables; en el caso de este ejemplo, competencia y estrés fisiológico. Estas variables normalmente son directas, y tienen el inconveniente descrito en el primer factor. No quiero decir que estas variables no son importantes por sí mismas sino que no son las únicas que deben considerarse cuando se toma una decisión y que tiene que evaluarse su rol en cada uno de los ecosistemas. De hecho, en muy pocos casos se puede conocer cuál es el número de variables involucradas.

Un cuarto factor tiene que ver con las relaciones entre ecosistemas y con otros factores como el clima. Las relaciones entre ecosistemas y las variables climáticas pueden ser muy complejas y no determinables de manera directa. Por tanto, se deben hacer esfuerzos por detectarlas e incorporarlas en la predicción en la medida de lo posible. No siempre esto es posible.

La segunda y la tercera fuentes de incertidumbre tienen que ver con problemas relacionados con las organizaciones y con los sectores involucrados en la toma de decisiones que afectan al desarrollo sostenible y con las presiones económicas a las que son sometidas dichas organizaciones. Hay varios factores relacionados con este punto. El primero de ellos es la dificultad de lograr una formación común cuando se trata de grupos muy diversos. El segundo factor tiene que ver con la dificultad de involucrar

a grupos heterogéneos en proyectos de largo alcance.

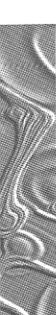
En estas condiciones es preciso llegar a consenso respecto a: las expectativas de un proyecto, los grados de predictibilidad, los tiempos necesarios para realizar el proyecto o estudio, así como a definir los límites y escalas de los proyectos o estudios. Esta segunda fuente de incertidumbre requiere un estudio separado.

Incertidumbres debidas a la intervención intencional del hombre en los ecosistemas y los procesos ecológicos

Dado que el comportamiento de los ecosistemas no sigue un "procedimiento lineal", las consecuencias de la intervención humana en ellos o de ciertas prácticas como parte de estos ecosistemas no es siempre determinable. Varios factores impiden la predicción precisa de su comportamiento. El primero de ellos tiene que ver con algo similar al principio de indeterminación que Heisenberg introdujera en física cuántica, y que está directamente relacionado con la sensibilidad de los ecosistemas. Dicho principio puede formularse de la siguiente manera:

Cualquier intervención puede modificar en escalas no determinables el ecosistema. El problema es que no se puede determinar esta influencia sin dicha intervención. El segundo factor es que dado que las relaciones entre ecosistemas pueden ser muy complejas, sobre todo por las relaciones indirectas, cualquier intervención puede tener consecuencias no previstas. El tercer elemento está relacionado con el anterior y tiene que ver con las relaciones entre los ecosistemas. Una intervención en un ecosistema puede desencadenar efectos no previstos en otros ecosistemas. Otros factores que introducen incertidumbre tienen que ver con las escalas y con las decisiones espaciales y





temporales que se toman cuando se decide realizar un proyecto. A nivel de ecosistemas los límites no siempre son bien definidos y las expectativas de un proyecto pueden verse afectadas por estas decisiones.

Incertidumbres debidas a la no incorporación del conocimiento ecológico existente

Uno de los problemas más serios y que atentan contra los esfuerzos por lograr un éxito significativo en desarrollo sostenible, es el hecho de que la mayoría de los tecnólogos no se preocupan por los aspectos teóricos relacionados con su quehacer. Su preocupación principal está en el proceso de diseño e implementación de tecnologías que resuelvan una situación determinada. He observado esta tendencia aun en tecnólogos que están comprometidos con el desarrollo sostenible. El tecnólogo busca fuentes diversas a partir de las cuales pueda darle sentido o justificación a determinado diseño, o fuentes de inspiración para proponer el diseño y la consiguiente implementación. El proceso normal, por lo menos en nuestro país, es tratar de hacer encajar las cosas. **La presión sobre los costos y la solución de problemas puntuales puede traer enormes consecuencias ambientales.** Esto es válido incluso para grupos interdisciplinarios. Esta es una fuente importante de incertidumbres.

Desde el punto de vista del desarrollo sostenible, se exige del tecnólogo que enmarque su quehacer en un contexto más general, debe tomar en consideración las tendencias, el conocimiento teórico existente, enmarcar su quehacer en proyectos a más largo plazo, así como realizar evaluaciones y monitoreos constantes para prevenir y corregir impactos ambientales negativos. Sin embargo, no se puede esperar que este cambio de actitud suceda muy rápidamente. He visto algunos software de optimización y de toma de decisiones,

realizados por profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible, en los que el conocimiento ecológico no ha sido incorporado. Un ejemplo es un software desarrollado por una institución nacional para la optimización de la producción vacuna en el que se hacían recomendaciones sobre aspectos como: optimizar los tiempos entre crías, minimizar las visitas, aumentar el índice de preñez en las vacas, etc. Sin embargo, el problema es que este tipo de productos deja de lado consideraciones sobre el tipo de suelos, ubicación del área, capacidad de soporte de los potreros, índices de pérdida de fertilidad de los suelos, etc. En muchas ocasiones optimizar ciertos procesos puede tener serias consecuencias en el futuro, y puede causar daños irreversibles en los ecosistemas.

Cuando se toma en consideración el ambiente y el conocimiento ecológico existente, definitivamente los criterios de optimización deben variar. La optimización de un proceso no tiene que verse exclusivamente en términos de incremento de la productividad en un momento determinado, sino también en la reducción de los costos ambientales y los recursos para que el proceso productivo pueda sostenerse en el largo plazo.

Un profesional que esté comprometido con el desarrollo sostenible y que genere proyectos dentro del esquema dominante podrá estar seguro que existe una probabilidad muy alta de que la aplicación de su proyecto tenga consecuencias ambientales negativas, aunque si no tiene conocimiento de ecología, no podrá, posiblemente, determinar esta probabilidad.

Este tipo de incertidumbre puede reducirse: ampliando los criterios de su aplicación; tratando de incorporar personas con conocimiento de la ecología y de las tendencias mundiales en desarrollo sostenible y ambiente; adoptando una actitud crítica y de evaluación constante del trabajo que realiza y de sus consecuencias.

4. Desarrollo de la propuesta

Los tipos de incertidumbre discutidos imponen retos importantes y limitaciones a los esfuerzos de desarrollo sostenible. Es decir, tenemos limitaciones en la capacidad de predecir posibles consecuencias de las prácticas humanas y otros factores sobre los ecosistemas, así como en las mediciones y evaluaciones de los ecosistemas. Sin embargo, se deben hacer todos los esfuerzos inter y multidisciplinarios para ampliar la base científica y para utilizarla en la elaboración de estrategias y en la implementación de tecnologías.

En el manejo de incertidumbres del tipo descrito se hace necesario utilizar todos los recursos a nuestra disposición, incluyendo como elemento central un cambio de actitud intelectual con el fin de minimizar las posibles consecuencias de las prácticas humanas sobre los ecosistemas. Dos recursos adquieren particular importancia: los sistemas de monitoreo de especies y los sistemas de simulación. Los sistemas de monitoreo de especies constituyen una herramienta muy útil para determinar la dinámica de los ecosistemas y su evolución. En la siguiente sección sólo hablaremos de los modelos de simulación.

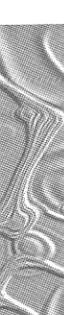
El rol de los modelos de simulación

Los sistemas de simulación constituyen herramientas muy valiosas para evaluar los posibles impactos que un determinado proyecto o intervención tendría en los ecosistemas, sin tener que experimentar directamente en los ecosistemas. Los modelos de simulación que serían más útiles, desde nuestro punto de vista, son aquellos basados en modelación no lineal, es decir, aquellos en los que modificaciones en las entradas (intervenciones) pueden tener consecuencias no medibles a priori en las salidas (impactos en los ecosistemas).

Existen varios tipos de sistemas de simulación no lineal. Consideremos únicamente aquellos modelos que introducen componentes caóticos. Estos son modelos cuya evolución está determinada por factores azarosos. (En la mayoría de los sistemas ecológicos, el azar tiene lugar dentro de ciertos límites de equilibrio del ecosistema). Estos modelos pueden jugar un papel muy importante en la determinación de posibles evoluciones del ecosistema, y es de gran ayuda sobre todo para la determinación de evoluciones no deseables del ecosistema.

Sin embargo, desde el punto de vista de la capacidad predictiva, estos sistemas presentan varios problemas, cuando se toman por sí mismos. Problemas que tienen que ver precisamente con incertidumbres. En primer lugar, las variables elegidas pueden no ser representativas de un ecosistema, esto es, puede reflejar únicamente los efectos directos y no lo indirectos. Supongamos que se construye un modelo caótico para simular el comportamiento de un ecosistema X. Se seleccionan las variables involucradas (reglas de conocimiento), se definen las escalas y límites con cierta precisión, se establecen las reglas regidas por el azar para la evolución del sistema. Supongamos que el sistema se detiene en el estado i , indicando cómo ha evolucionado el sistema hasta ese momento. Supongamos que para cada estado se lleva un registro en el que se pueden encontrar explicaciones sobre cómo ha evolucionado el sistema.

El siguiente paso consiste en trabajar con un ecosistema real, para determinar si el sistema evoluciona tal y como lo predice el modelo. Después de cierto tiempo el ecosistema converge tal y como lo predijo el modelo de simulación. En este caso, consideramos muy exitoso el modelo. Pero resulta que estudios más detallados del ecosistema muestran que la convergencia se dio por factores (variables) no considerados en el modelo de simulación.



En este caso tenemos que concluir que las predicciones del modelo estaban basadas en consideraciones o premisas falsas. Esta es una posibilidad que no es solo teórica sino que es un hecho muy común en la historia de la ciencia. En un momento determinado del desarrollo del conocimiento científico no siempre es posible corregir el error. Sin embargo, debemos utilizar todos los recursos que están a nuestro alcance para minimizarlo. Por ejemplo, incorporando nuevo conocimiento "comprobado" sobre el ecosistema, repitiendo las simulaciones o incorporando información nueva de monitoreos de las especies del ecosistema bajo consideración, para complementar las explicaciones dadas por el modelo.

El segundo tipo de problemas tiene que ver con la probabilidad o improbabilidad de las evoluciones que se obtienen cuando se simula con este tipo de modelos. Supongamos que se corre una simulación y se tiene un resultado en el estado *i*. De acuerdo con el conocimiento ecológico existente, los encargados de tomar decisiones al respecto, consideran que esta evolución es absolutamente improbable. Pero por insistencia del que desarrolló el modelo se hace una prueba con un ecosistema real. Resulta que el ecosistema evoluciona en el sentido predicho por el modelo.

El tercer tipo de problemas que quisiera señalar está directamente relacionado con el anterior pero en un sentido diferente. Supongamos al igual que en el caso anterior que se corre una simulación y se detiene en el estado *i*. Nuevamente el estado al que ha llegado el sistema se considera absolutamente improbable. Se hace una prueba con un ecosistema real, y la evolución del ecosistema es diferente de la predicha por el modelo. En ambos casos el rol de los modelos de simulación debe ser revisado, y sobre todo, nuestra actitud hacia lo que es esperable o no.

Nuevamente, encontramos aquí que la utilización de simulaciones se ve fuertemente afectada por las incertidumbres discutidas en la sección anterior.

Se podría pensar que estos problemas hacen que desarrollo sostenible sea muy improbable de alcanzar. Aunque graves, efectivamente, la recomendación es que cuando se está trabajando con desarrollo sostenible es necesario adoptar una posición crítica, reconocer los límites de este desarrollo y someter a crítica nuestros propios planteamientos. Sobre todo no absolutizar el papel que este tipo de herramientas desempeña en la predicción de futuras consecuencias de los proyectos. Se debe estar consciente de que se trata de una herramienta más, muy valiosa, pero que tiene sus limitaciones.

El desarrollo de simulaciones debe ser complementado con la obtención de nueva información por monitoreos y estudios más detallados de los ecosistemas; con la conceptualización de los proyectos de investigación como experimentos que se evalúen en las diferentes etapas, de tal manera que se pueda ir reduciendo el impacto sobre los ecosistemas y realizar las correcciones correspondientes con regularidad.

Evaluación de un proyecto desde el punto de vista del conocimiento ecológico existente

Este aspecto puede eventualmente ser implementado computacionalmente. La estrategia que deseo presentar es refutacional en el sentido de Karl Popper. De hecho se inspira en su planteamiento.

El problema que Popper analiza es el de cómo asignar grados de corroboración a una teoría, para dar cuenta de preguntas como: por qué la teoría de la relatividad de Einstein se considera mejor corroborada que la de Newton.



Por corroboración no se entiende el grado de probabilidad o el número de confirmaciones que haya recibido una teoría, sino el tipo y la cantidad de contrastaciones (entendida en el sentido de contraejemplos) a las que haya sido sometida la teoría y haya salido exitosa, así como la calidad de estas contrastaciones.

Considero que su enfoque puede ser utilizado para determinar el grado de compatibilidad o incompatibilidad de un proyecto o una aplicación con el conocimiento ecológico existente en un momento determinado. Para ello se deducen impactos negativos que pueden ser predichos a partir del conocimiento ecológico.

El conocimiento ecológico existente se considera como el conocimiento dado (d). Sea e una evidencia o una consecuencia de d. Nos interesan las consecuencias negativas (impactos negativos) que el desarrollo de un proyecto o una aplicación, puedan tener y puedan ser inferidas con bastante probabilidad a partir del conocimiento ecológico existente. Sea h una aplicación o proyecto.

Finalmente, sea i un conocimiento adicional. Nos interesa determinar el grado de incompatibilidad (I) de h con e dado d, o el grado de compatibilidad (C) de no-e con h dado d. En símbolos,

$$I(e, h, di);$$

alternativamente,

$$C(\text{no-e}, h, di).$$

Nota: es necesario refinar cualquiera de las dos formulaciones por las siguientes razones. De acuerdo con el conocimiento ecológico existente, los ecosistemas normalmente toleran cierto nivel de impacto, que podemos denominar umbral. Una vez traspasado el umbral los impactos serán mayores.

Por tanto, no pueden presentarse en términos absolutos como e y no-e. Por otro lado, es necesario considerar los efectos acumulativos. Ya que un impacto puede estar dentro del límite; permisible, pero la acumulación de estas pequeñas dosis pueden traspasar ese límite este conocimiento se expresa mediante la información adicional i. Sin embargo, con el propósito de ejemplificar se considera no-e como aquel impacto que está dentro del umbral permisible.

Ahora bien, el enfoque es esencialmente probabilístico aunque posiblemente no en el sentido del cálculo de probabilidades. Esto porque las contrastaciones no son el complemento de las verificaciones, sino que introducen consideraciones cualitativas.

El hecho de que e sea una consecuencia de d, puede expresarse diciendo que la probabilidad de e dado d e i es igual a 1.

En símbolos,

$$p(e, di) = 1$$

Ahora bien, nos interesa determinar la compatibilidad de no-e con h.

Esto puede expresarse como:

$$C(\text{no-e}, h, di) = p(e, di) - p(e, hi)$$

En una implementación particular es necesario considerar el factor de normalización, que habría que definir.

El problema que se presenta de manera inmediata es cómo obtener un impacto negativo. Aquí las posibilidades son muchas (prácticamente infinitas), así que el criterio debería ser obtener primero aquellas que son más probables, y que por medio de cierta información adicional puedan determinarse relevantes.

Es decir, se requiere ubicar las posibles consecuencias bajo cierto rango de

Nota:

Aunque no he hecho muchas citas textuales, creo que este trabajo está muy influido por el informe presentado por la National Research Council y por los libros de Popper.

probabilidad. Por ejemplo, para ciertos proyectos una consecuencia que afecte las cadenas alimentarias en un ecosistema, podría tener un papel fundamental, o aquel que afecte las interacciones tróficas o, finalmente, aquel que no tome en consideración las relaciones indirectas en casos que se ha establecido que sí existen.

En resumen, se requiere una medida de relevancia, de tal manera que se comience por aquellos casos en los que la probabilidad del impacto sea mayor. Si un proyecto pasa estas pruebas se deben considerar consecuencias que hagan uso de conocimiento ecológico "más fino".

La idea de un modelo como este no es tanto descalificar un proyecto, sino más bien, dar información valiosa a los desarrolladores sobre posibles consecuencias ambientales que su proyecto podría tener.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Carlos Loría, al Dr. Luis Camacho, a la Licda. Paulina Retana y al profesor Mario Alfaro por haber discutido conmigo estas ideas y por sus valiosas sugerencias.

Literatura consultada

- Hanson, M, y otro (1994) **Control Biológico de Insectos**. CATIE, Costa Rica.
- Momo, Fernando y otros (1995) "Modelos para la Riqueza Específica en Ambientes Fluctuantes" en: Monge-Nájera, Julián editor (1995) **Desarrollo Sostenible: la Visión desde los países menos industrializados**. Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
- Naciones Unidas (1992) **Programa 21**. Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica, (1993)
- National Research Council (1986) **Ecological Knowledge and Environmental Problem-solving: Concepts and Case Studies**. Publicado en español por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, bajo el título **Conocimiento ecológico y soluciones ambientales** (1992).
- Popper, Karl (1956) (1985) **Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica (3 volúmenes)**. W.W. Bartley III (editor), Editorial Tecnos, España.
- **La Lógica de la Investigación Científica**. Editorial Tecnos, España.
- (1967) **El Desarrollo del Conocimiento Científico: Conjeturas y Refutaciones**. Editorial Paidós, Buenos Aires.