

## Marco conceptual para entender la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos

WALTER A. SALAS-ZAPATA<sup>1,✉</sup>; LEONARDO A. RÍOS-OSORIO<sup>1</sup> & JAVIER ÁLVAREZ-DEL CASTILLO<sup>2</sup>

1. Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia.

2. Càtedra UNESCO de Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya, Terrassa-España.

**RESUMEN.** Los índices y marcos de indicadores de desarrollo sustentable son muy utilizados para observar si un sistema es sustentable o no, aunque son insuficientes para entender por qué un sistema socioecológico puede ser in/sustentable. En este ensayo ofrecemos una propuesta teórica desarrollada a partir del concepto de resiliencia socioecológica, la cual se asume como el fundamento y propiedad de los sistemas sustentables. Así, la generación de sustentabilidad se argumenta a partir de la comprensión de conceptos como perturbación, capacidad adaptativa y cambios de estado y de régimen, que son mecanismos y elementos involucrados en la resiliencia socioecológica.

[Palabras clave: desarrollo sustentable, resiliencia socioecológica, teoría, capacidad adaptativa, sistemas sustentables]

**ABSTRACT.** Conceptual framework for understanding the sustainability of social-ecological systems: Indices and frameworks of indicators on sustainable development are used for observing how sustainable a social-ecological system is, though they are not appropriate to understand why these systems can be sustainable. We develop a conceptual sketch based on the concept of social-ecological resilience, which is the foundation of sustainable systems. Thus, we draw on concepts such as perturbations, adaptive capacity, and state and regime shifts, for arguing mechanisms and elements involved in generation of social-ecological resilience of systems.

[Keywords: sustainable development, social-ecological resilience, theory, adaptive capacity, sustainable systems]

### INTRODUCCIÓN

El propósito esencial de la investigación en sustentabilidad es entender las interacciones entre sistemas sociales y ecológicos y el modo en que éstas pueden direccionarse en forma sustentable. De ahí que para entender la sustentabilidad de un sistema sea necesario concebir el problema de investigación a través de unidades de análisis denominadas sistemas socioecológicos, que son sistemas en los que se dan interacciones entre sistemas sociales y ecológicos (Gallopín 2004, 2006).

Para entender la sustentabilidad de estos sistemas se han desarrollado índices y marcos de indicadores como el modelo Presión, Estado, Respuesta (PER), el triángulo de Daly, el modelo de Bossel, la huella ecológica, el índice de sustentabilidad

ambiental y el índice de bienestar económico sustentable (ISEW), entre otros (Gallopín 2006; Böhringer & Jochem 2007). No obstante, estos índices y marcos de indicadores son más apropiados para describir la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos que para explicarla, pues si bien permiten observar cuán sustentable es un sistema, no sirven para entender los modos de organización, los procesos ni los elementos que hacen que un sistema sea in/sustentable.

En parte, esto se debe a que el desarrollo de teorías y conceptos acerca de la in/sustentabilidad de los sistemas socioecológicos aún es incipiente (Clark & Dickson 2003; Kajikawa 2008). Por esa razón, en este ensayo proponemos un marco conceptual que permita entender los mecanismos y elementos involucrados en la in/sustentabilidad de los

✉ Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia. Calle 67, #53-108, oficina 5-238. Medellín. Colombia. Tel.: +57-4-2198490. Fax: +57-4-2195486. wsalas@udea.edu.co.

Recibido: 16 de julio de 2011; Fin de arbitraje: 22 de octubre de 2011; Revisión recibida: 28 de octubre de 2011; Aceptado: 7 de noviembre de 2011

sistemas socioecológicos, que contribuya a la construcción de teoría sobre el tema y al desarrollo de nuevos indicadores.

### LA RESILIENCIA SOCIOECOLÓGICA DE LOS SISTEMAS

En la búsqueda por entender qué hace que un sistema sea sustentable, el concepto de resiliencia se ha desarrollado bajo tres perspectivas diferentes (Tabla 1), aunque no todas ellas son apropiadas para entender la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos. La primera perspectiva parte del supuesto de que los sistemas tienden constantemente a un punto de equilibrio y, en consecuencia, luego de sufrir una perturbación retornan de manera inmediata a este punto. No obstante, si bien este supuesto se puede aplicar en los sistemas fabricados, es falso para los sistemas socioecológicos, que no tienen uno sino varios puntos de equilibrio y que con frecuencia están sometidos a perturbaciones (Holling 1994; Gunderson et al. 2002). Por esa razón, la segunda perspectiva parece ser más apropiada al postular que lo que hace que un sistema mantenga sus relaciones y funciones esenciales es la posibilidad de encontrar varios estados posibles luego de sufrir una perturbación (Holling 1994). Sin embargo, un sistema no podría encontrar diferentes estados posibles si no tiene capacidad de experimentar cambios adaptativos que le permita alcanzarlos. Por esa razón, entendida como capacidad adaptativa, la resiliencia es considerada la propiedad y el fundamento de los sistemas socioecológicos sustentables (Holling 1996; Perrings 1998, 2001; Fiksel 2003, 2006).

En los sistemas socioecológicos, las interacciones entre los sistemas sociales y ecológicos se dan por doble vía. Por un lado, las intervenciones y actividades de carácter cultural, político, social y económico

producen cambios y transformaciones en el ambiente y la naturaleza (e.g., la minería, la pesca y las actividades agrícolas). Por otro lado, las dinámicas de los ecosistemas influyen la cultura, las relaciones de poder y las actividades económicas de los seres humanos (e.g., las inundaciones y los cambios climáticos).

Así, la capacidad adaptativa en un sistema socioecológico significa que las actividades humanas se ajustan a las características y dinámicas de los ecosistemas con los que se relacionan de manera que estos no produzcan transformaciones que lleven a estados prolongados de sufrimiento humano (Anderies et al. 2004). Por esa razón es más preciso entender la sustentabilidad de un sistema como la resiliencia socioecológica del mismo. Así, una alta resiliencia socioecológica es sinónimo de sustentabilidad a la vez que una escasa supone una limitada sustentabilidad para el sistema (Berkes et al. 2003). Sobre esta última perspectiva parece haber un consenso creciente (Holling 1996, 2001; Perrings 1998; Levin et al. 1998; Berkes et al. 2003; Fiksel 2003, 2006; Folke 2006; Norberg & Cumming 2008).

De ese modo, entender la generación de in/sustentabilidad en un sistema socioecológico es comprender el proceso adaptativo en el que se involucran las perturbaciones, las características del sistema que determinan su respuesta a esas perturbaciones y los cambios que se producen en el sistema.

#### *Las perturbaciones*

Las perturbaciones son interacciones que alteran el sistema. Pueden ser regulares cuando forman parte de las dinámicas propias del sistema socioecológico (e.g., las inundaciones periódicas de los cultivos que se encuentran en los valles de los ríos, la alternancia de las

**Tabla 1.** Enfoques para entender la resiliencia de los sistemas.

**Table 1.** Conceptual frameworks to understand the resilience of systems.

Perspectiva centrada en el equilibrio	Perspectiva de los múltiples estados de equilibrio	Perspectiva del cambio adaptativo
Resiliencia es la capacidad que tiene un sistema de recuperar su punto de equilibrio luego de una perturbación (Holling 1994; Gunderson et al. 2002).	Resiliencia es entendida como la capacidad que tienen los sistemas de absorber las perturbaciones mientras mantienen sus relaciones y funciones esenciales (Holling 1994; Folke 2006).	Resiliencia es la capacidad que tiene un sistema socioecológico de auto-organizarse adaptativamente para preservar sus atributos esenciales luego de una perturbación (Levin et al. 1998; Holling 2001; Berkes et al. 2003; Norberg & Cumming 2008)

temporadas de lluvia y sequía), y también pueden ser extraordinarias si son ajenas a la dinámica propia del sistema (e.g., la extracción de recursos naturales, el calentamiento global). Por esa razón, las interacciones socioecológicas son en sí mismas perturbaciones del sistema (Levin et al. 1998; Holling 2001).

#### *Características que condicionan la capacidad adaptativa*

Si se tiene en cuenta que existe una amplia variedad de sistemas socioecológicos, es lógico suponer que las características que determinan su capacidad adaptativa ante una perturbación también son variables. Sin embargo, cabe destacar cuatro características que, en general han sido relacionadas con la resiliencia socioecológica de los sistemas.

**Conectividad modular.** Todo sistema está constituido por un conjunto de elementos interrelacionados. En un sistema socioecológico estos elementos pueden ser personas y/u organizaciones humanas (por parte de los sistemas sociales), y recursos y especies animales y vegetales (por parte de los sistemas ecológicos). La conectividad es el grado en el que los elementos de un sistema se conectan entre sí, y su papel en la resiliencia del sistema está dado por un criterio cualitativo más que cuantitativo. Si bien un sistema con una conectividad alta facilita aspectos como la transferencia y la distribución de información entre los individuos, también es más vulnerable a la distribución de un virus o de un efecto perturbador (Janssen et al. 2006). Cuando estos elementos se organizan en agrupamientos que tienen conectividad elevada dentro de ellos, pero son independientes y poseen conectividad baja con otros, se dice que el sistema tiene conectividad modular. La conectividad modular contribuye al comportamiento adaptativo en dos sentidos. En términos estructurales, la existencia de varios módulos lleva a que sólo una porción del sistema, y no la totalidad, se vea afectada por el impacto de la perturbación. En términos funcionales, genera diversidad debido a que los agrupamientos o módulos pueden dar lugar a diferentes comportamientos alternativos del sistema para responder a una perturbación (Low et al. 2003; Gunderson 2003; Webb & Bodin 2008; Norberg & Cumming 2008).

**Diversidad.** Es el rango de opciones que tiene un sistema para responder a una perturbación y continuar con sus procesos cruciales. Tiene a su vez dos formas de expresarse en los sistemas: la redundancia y la heterogeneidad. La redundancia es la existencia de múltiples unidades similares no idénticas, sustituibles entre sí, para cumplir una función o un interés común. Así, un sistema puede ser más resiliente si tiene la posibilidad de reemplazar unidades perdidas en una perturbación (Low et al. 2003; Janssen et al. 2006; Walker et al. 2006). La heterogeneidad es la variedad de comportamientos o modos de actuación de que dispone el sistema para responder a la perturbación. En ese sentido, cuando un sistema sólo tiene un comportamiento posible para cumplir un propósito es más dependiente y más vulnerable porque si esta vía de respuesta falla o es eliminada también lo hará la totalidad del sistema (Holling 1973, 1994, 2001; Levin et al. 1998; Fiksel 2003; Walker et al. 2006; Norberg & Cumming 2008; Norberg et al. 2008).

**Mecanismos de Retroalimentación.** Son acoplamientos estímulo-respuesta que le permiten al sistema responder en su interior a las perturbaciones y a los efectos de su propio comportamiento (Levin et al. 1998). Hace referencia a la controlabilidad interna del sistema y a la manera como éste responde a señales que son recibidas del entorno (Levin et al. 1998; Holling 2001; Norberg & Cumming 2008; Berkes et al. 2003).

**Eficiencia.** Es la capacidad que tiene el sistema de llevar a cabo sus procesos principales sin agotar las fuentes de los recursos de los cuales depende (Fiksel 2003). Aquí es necesario resaltar que en los sistemas socioecológicos, las unidades de costo de los recursos no son únicamente monetarias, como en los análisis de la economía clásica, sino también unidades ecológicas y sociales (e.g., la energía, el agua, las personas y los valores culturales y éticos).

La manera como estas características se expresan en un sistema socioecológico pueden variar, aunque los trabajos de Ostrom (Low et al. 2003; Norberg et al. 2008; Ostrom 2011) permiten ilustrarlas en el caso de los sistemas de gestión de agua de propiedad colectiva. En este contexto, la conectividad modular

se observa en los arreglos institucionales caracterizados por pequeñas organizaciones sociales anidadas a otras más grandes, y éstas, a su vez, en otras aun más grandes. La diversidad se manifiesta en la variedad de reglas posibles para la gestión del agua. Los mecanismos de retroalimentación se ponen de manifiesto en el monitoreo y el reconocimiento de las reglas que rigen el comportamiento del sistema socioecológico en general. La eficiencia es una variable de respuesta a las anteriores características, observable cuando el agua se puede utilizar indefinidamente debido al uso apropiado de los recursos (sociales y ecológicos) de los que depende el sistema de gestión de la misma.

*Fenómenos de cambio: estados y regímenes alternativos*

Los sistemas sustentables se caracterizan por la persistencia de sus atributos esenciales luego de una perturbación. Estos atributos pueden ser: i) los procesos centrales que un sistema lleva a cabo y que revelan una función, un propósito o simplemente corresponde a un proceso inherente a su existencia, ii) su estructura, entendida como el tipo de interacciones que constituyen el sistema, y iii) los controles internos de funcionamiento (Walker et al. 2006; Kinzig et al. 2006).

Según la capacidad adaptativa, el sistema puede responder a la perturbación con dos tipos de cambios: adaptación o transformación. En el primer caso, al sufrir la perturbación el sistema se reorganiza y cambia su configuración pero conserva los procesos cruciales, los tipos de interacciones que conforman su estructura y sus mecanismos de control (Holling 1973; Kinzig et al. 2006; Walker et al. 2006). Básicamente, los cambios adaptativos son las diferentes configuraciones o estados alternativos que un sistema puede conseguir conservando sus atributos esenciales.

Los sistemas socioecológicos pueden tener varios umbrales a partir de los cuales una perturbación puede desencadenar cambios en sus atributos esenciales. Esto se denomina cambio de régimen (Walker et al. 2006). Así, si su capacidad adaptativa es escasa, la perturbación llevará a un cambio de propiedades esenciales y a la transformación

del sistema en uno diferente (cambio de régimen).

Cabe anotar que la naturaleza social y ecológica de todo sistema socioecológico lleva a que el proceso de adaptación busque un régimen del sistema socialmente deseable y ecológicamente posible. Así, un sistema socioecológico es sustentable cuando puede encontrar estados alternativos dentro de un régimen socialmente deseable y ecológicamente posible, pero será insustentable si los cambios de estado perpetúan un sufrimiento humano (socialmente indeseable) o tienden a agotar la capacidad de carga de los ecosistemas de los que depende (no viable ecológicamente).

No obstante, la transformación de un sistema socioecológico no significa su conversión a uno insustentable. Ello dependerá de las características del régimen del sistema en el presente. Así, en un sistema insustentable los cambios de régimen pueden llevar a una transición hacia la sustentabilidad y, de igual modo, en un sistema sustentable la transformación puede resultar en insustentabilidad.

Los cambios de estado y de régimen se pueden ilustrar de la siguiente manera. Un sistema socioecológico puede ser la cuenca de un río junto con los ecosistemas de la rivera y las comunidades que lo utilizan para la navegación y la pesca. Llámese a esta situación "Régimen A". Los estados alternativos de este sistema pueden ser: un "Estado A" caracterizado por lluvias fuertes, ensanchamiento del río hacia su valle de inundación, pesca escasa por parte de las comunidades pero navegación elevada en una época del año; mientras que un "Estado B" puede estar caracterizado por la temporada de verano, un río ajustado a su cauce, actividad pesquera alta por parte de las comunidades locales y navegación escasa. A pesar de los cambios, este sistema se encuentra dentro de un mismo régimen porque sin importar el estado en el que se encuentre éste conserva sus relaciones y atributos esenciales como la pesca, la navegación y el riego del suelo a causa de las inundaciones.

Este mismo sistema se podría transformar y cambiar a un "Régimen B" si en la cuenca del río se diera inicio a una extracción intensiva

de oro a través de minería de aluvión. Con el proceso de explotación de este recurso natural el suelo del río y del valle de inundación es removido, los ecosistemas se destruyen, las comunidades locales migran o cambian de vocación económica y las aguas del río son contaminadas por el mercurio utilizado durante el lavado del oro y por la remoción misma del suelo. Aquí se observa un cambio de régimen a causa de una perturbación denominada 'minería' debido a que las relaciones y propiedades esenciales del sistema cambian, pues las comunidades ya no se dedican a la pesca sino a la minería, el suelo del valle de inundación no se cultiva debido a la remoción del suelo, y los peces se extinguen a causa de la contaminación del agua. Sus atributos esenciales cambian.

Si bien la comprensión de la dinámica de un sistema socioecológico implica entender sus cambios de estado y de régimen, también cabe mencionar que el desarrollo científico en este campo es incipiente si se tiene en cuenta que existe una alta diversidad de sistemas socioecológicos posibles, pues cualquier sistema puede definirse como sistema socioecológico siempre que se consideren sus interacciones socioecológicas.

## CONCLUSIONES

Los índices y marcos de indicadores utilizados para analizar la sustentabilidad de determinados sistemas socioecológicos son más apropiados para describir su comportamiento in/sustentable más que para explicar los procesos y mecanismos que dan lugar a dicha in/sustentabilidad. En ese sentido, este ensayo ofrece un marco conceptual para entender por qué los sistemas se vuelven in/sustentables, y para la construcción de teoría y generación de nuevos indicadores.

Este marco desarrolla el concepto de resiliencia socioecológica de los sistemas, que es el fundamento de los sistemas sustentables, y de los procesos involucrados en esa resiliencia (e.g., perturbación, adaptación, cambios de régimen y de estado). Así, un sistema es sustentable cuando es socioecológicamente resiliente y es poco sustentable cuando carece de resiliencia socioecológica, pues en el primer caso el sistema solamente lleva a cabo cambios de estado porque posee las características que

le facilitan sobreponerse a una perturbación, mientras que en el segundo lleva a cabo cambios de régimen debido a la deficiencia de estas características.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDERIES, J; M JANSSEN & E OSTROM. 2004. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecol. Soc.* 9(1):18. [www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18/](http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18/).
- BERKES, F; J COLDING & C FOLKE. 2003. Introduction. En: Berkes, F; J Colding & C Folke (eds.). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge (UK). Cambridge University Press.
- BÖHRINGER, C & P JOCHEM. 2007. Measuring the immeasurable - A survey of sustainability indices. *Ecol. Econ.* 63(1):1-8.
- CLARK, W & N DICKSON. 2003. Sustainability science: the emerging research program. *PNAS* 100(14):8059-8061.
- FIKSEL, J. 2003. Designing resilient, sustainable systems. *Environ. Sci. Technol.* 37:5330-5339.
- FIKSEL, J. 2006. Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustain. Sci. Pract. Policy* 2: 14-21. [sspp.proquest.com/archives/vol2iss2/0608-028.fiksel.pdf](http://sspp.proquest.com/archives/vol2iss2/0608-028.fiksel.pdf)
- FOLKE, C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems. *Global Environ. Chang.* 16(3):253-267.
- GALLOPIN, G. 2004. Sustainable development: epistemological challenges to science and technology. Background paper prepared for the Workshop on "Sustainable Development: Epistemological Challenges to Science and Technology", ECLAC, Santiago de Chile. October 13-15, 2004.
- GALLOPIN, G. 2006. Los indicadores de desarrollo sostenible: aspectos conceptuales y metodológicos. Seminario de expertos sobre indicadores de sustentabilidad en la formulación y seguimiento de políticas. Memorias. Santiago de Chile. 4, 5 y 6 de octubre.
- GUNDERSON, L. 2003. Adaptive dancing: interactions between social resilience and ecological crises. En: Berkes, F; J Colding & C Folke (eds.). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge (UK). Cambridge University Press.
- GUNDERSON, L; CS HOLLING; L PRITCHARD & G PETERSON. 2002. Resilience of large scale resource systems. En: Gunderson, L & L Pritchard (eds.). *Resilience and behavior of large-scale systems*. Washington DC (USA). Island Press.
- HOLLING, CS. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Ann. Rev. of Ecol. and Syst.* 4:1-23.
- HOLLING, CS. 1994. Simplifying the complex: the paradigms of ecological function and structure. *Futures* 26:598-609.
- HOLLING, CS. 1996. Surprise for science, resilience for ecosystem, and incentives for people. *Ecol. Appl.* 3: 733-735.
- HOLLING, CS. 2001. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems* 4:390-405.
- JANSSEN, M; O BODIN; J ANDERIES; T ELMQVIST; H ERNSTON; ET AL. 2006. A network perspective on the resilience of

- social-ecological systems. *Ecol. Soc.* 11(1):15. [www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art15/](http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art15/).
- KAJIKAWA, Y. 2008. Research core and framework of sustainability science. *Sustain Sci.* 3:215-239.
- KINZIG, A; P RYAN; M ETIENNE; H ALLISON; T ELMQVIST; ET AL. 2006. Resilience and regime shifts: assessing cascading effects. *Ecol. Soc.* 11(1):20. [www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art20/](http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art20/).
- LEVIN, A; S BARRETT; S ANIYAR; W BAUMOL; C BLISS; ET AL. 1998. Resilience in natural and socioeconomic systems. *Environ. Dev. Eco.* 3:222-235.
- LOW, B; E OSTROM; C SIMON & J WILSON. 2003. Redundancy and diversity: do they influence optimal management? En: Berkes, F; J Colding & C Folke (eds.). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change.* Cambridge (UK). Cambridge University Press.
- NORBERG, J & G CUMMING. 2008. Introduction. En: Norberg, J & G Cumming (eds.). *Complexity theory for a sustainable future.* New York (USA). Columbia University Press.
- NORBERG, J; J WILSON; B WALKER & E OSTROM. 2008. Diversity and resilience in social-ecological systems. En: Norberg, J & G Cumming (eds.). *Complexity theory for a sustainable future.* New York (USA). Columbia University Press.
- OSTROM, E. 2011. *El gobierno de los bienes comunes: La evolución de las instituciones de acción colectiva.* México DF (México). Fondo de Cultura Económica.
- PERRINGS, C. 1998. Introduction: resilience and sustainability. *Environ. Dev. Eco.* 3:221-222.
- WALKER, B; L GUNDERSON; A KINZIG; C FOLKE; S CARPENTER; ET AL. 2006. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. *Ecol. Soc.* 11(1):13. [www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art13/](http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art13/).
- WEBB, C & O BODIN. 2008. A network perspective on modularity and control of low in robust systems. En: Norberg, J & G Cumming (eds.). *Complexity theory for a sustainable future.* New York (USA). Columbia University Press.