

## II Congrés UPC Sostenible 2015

---

### EL PARADIGMA DE LA COMPLEJIDAD EN LA MODELIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESPACIOS SOCIO-NATURALES

Jorge Paolini Ruiz<sup>1</sup> y José Juan de Felipe<sup>2</sup>

Grup de Recerca Mesura de la Sostenibilitat

Cátedra UNESCO de Sostenibilidad

UPC Campus Terrassa

Barcelona 08222. España

1 [jorge.paolini@catunesco.upc.edu](mailto:jorge.paolini@catunesco.upc.edu) 2 [felipe@mmt.upc.edu](mailto:felipe@mmt.upc.edu)

**Tema del congreso:** territorio y paisaje

**Tópico transversal:** modelización numérica

#### RESUMEN

El estudio de espacios en los que existen interacciones humanas con la naturaleza es de especial importancia para la observación y modelado de la sostenibilidad. En esos espacios donde la intervención humana deja sus huellas y se deteriora el ambiente es una cuestión imperiosa la observancia y la detención de los daños. Allí, es cuando las ideas de sostenibilidad nos ayudan a esclarecer el impacto de tales interacciones. Por tanto, el diseño de modelos que cuantifiquen la sostenibilidad en estos ambientes, más que un trabajo académico es una cuestión de responsabilidad social y revela el papel que deben jugar las universidades y los universitarios para alertar a los tomadores de decisiones sobre la situación de esos espacios. Este trabajo intenta mostrar que a partir de 'lo disciplinar' se puede construir redes que conecten conceptos en un plexo de relaciones que permita hacer modelizaciones sobre la sostenibilidad de un sistema complejo. Partiendo de los principios de la complejidad se diseña una red conceptual que muestra la construcción de observables para la modelización y cuantificación de la sostenibilidad. La red conceptual se construye a partir de la consideración de las disciplinas relacionadas con la modelación de espacios socio-naturales. Se derivan de las disciplinas los observables cuantitativos para la determinación de la sostenibilidad de una cuenca hidrográfica en la Guayana venezolana.

**Palabras Clave:** sostenibilidad, modelización, complejidad, espacios naturales

## **1. Introducción**

El estudio de espacios socio-naturales en los que existen interacciones humanas con la naturaleza es de especial importancia para la observación y modelado de la sostenibilidad. En esos espacios donde la intervención humana deja sus huellas y se deteriora el ambiente es una cuestión de imperiosa observancia y detención. Allí es cuando las ideas de sostenibilidad nos ayudan a esclarecer el impacto de tales interacciones. Por tanto, el diseño de modelos que cuantifiquen la sostenibilidad en estos ambientes, más que un trabajo académico es una cuestión de responsabilidad social y revela el papel que deben jugar las universidades y los universitarios para alertar a los tomadores de decisiones sobre el estado de los espacios socio-naturales. Este trabajo intenta mostrar que a partir de 'lo disciplinar' se pueden construir redes que conecten conceptos en un plexo de relaciones que permita hacer modelizaciones sobre la sostenibilidad de un sistema complejo.

## **2. Algunos principios del pensamiento complejo**

Para la conceptualización y la construcción de las redes conceptuales se utilizarán algunos principios del pensamiento complejo desarrollados en los escritos de Morin (2004, 2005). En primer lugar se toma en cuenta el principio de integración, que nos orienta en la composición de la red considerando diversas disciplinas, imbricándolas en un tejido conceptual coherente. El principio de multi-factorialidad o multi-dimensionalidad que considera distintos factores y dimensiones en la construcción de la red: dimensión biológica, social y espacio-temporal. El principio de jerarquización permite seleccionar los datos significativos y no significativos para la concepción de los observables de la red que permitirá modelar algunos aspectos de una cuenca hidrográfica. García (2006) establece la inter-definibilidad y la mutua dependencia como principios de la complejidad. La inter-definibilidad para un sistema complejo no puede determinarse solo a partir de la suma de disciplinas sectoriales, sino a partir de la integración de sus factores. Así mismo, el principio de mutua dependencia determina que la alteración que ocurre en un sistema complejo se

propaga de diversos modos a través del plexo de relaciones que conforman el sistema observado. Se destaca en la construcción conceptual el carácter multidisciplinario e inter-definible de los fenómenos en una cuenca hidrográfica, cuya concreción se evidencia en la red.

### 3. La construcción de la red conceptual

Una red conceptual se considera como *“una compleja red espacial: sus términos son representados por sus nodos mientras que los hilos que los conectan corresponden, en parte, a las definiciones y en parte a las hipótesis fundamentales y derivadas incluidas en la teoría. El sistema entero flota, por así decirlo, sobre el plano de la observación y está anclado a él por reglas de interpretación”* (Hempel, 1988: p. 52). En la figura 1 se puede ver la red conceptual que surge del trabajo de modelación de la sostenibilidad de una cuenca hidrográfica (Paolini, 2008), allí se toma en cuenta la minería de pequeña escala y un conjunto de disciplinas que se pueden considerar relevantes en el estudio. La red conceptual se diseña a partir de las disciplinas y de conceptos métricos o magnitudes, estos conceptos *“no se corresponden con del lenguaje ordinario puesto que son construcciones del lenguaje científico”* (Mosterín, 2008:30). En la red, se toma como concepto central a la Sostenibilidad, si bien es cierto que la sostenibilidad es un concepto no-métrico, Riechman (2006) dice que:

*...hay que subrayar que la sustentabilidad (y por ende el desarrollo sostenible) no es un concepto científico técnico (aunque incluya componentes que lo son), sino que tiene un carácter irremediamente normativo: que la vida humana sobre este planeta haya de perpetuarse, y en que condiciones, no son en absoluto cuestiones en absoluto de carácter científico-técnico.*

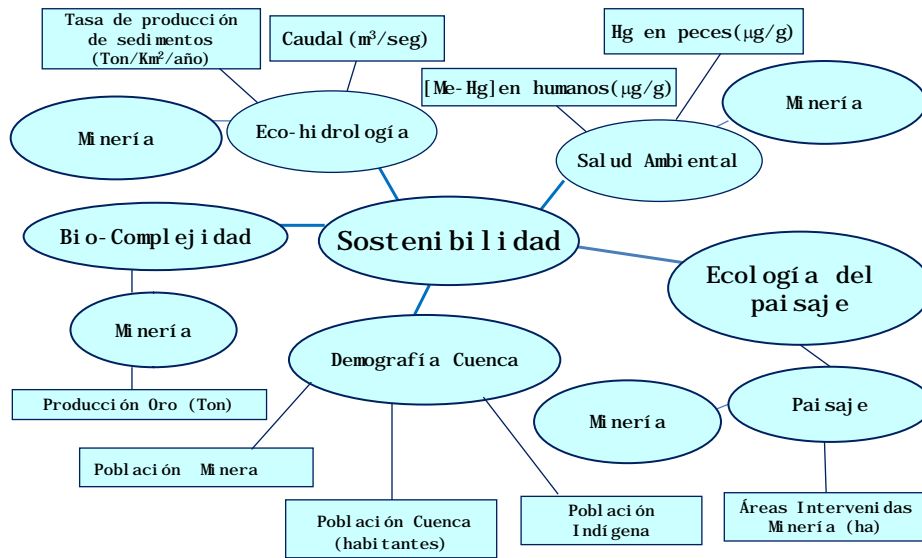


Figura 1. Red Conceptual para la modelizaci3n de la sostenibilidad en una cuenca hidrográfica considerando la minería en pequeña escala.

La sostenibilidad se puede observar y cuantificar partiendo de algunas disciplinas que podemos utilizar para el estudio de una cuenca hidrográfica. A partir de la conformaci3n de una red de disciplinas relacionadas con el objeto de estudio (cuenca hidrográfica) se establecieron cantidades observables que cuantifiquen la sostenibilidad.

La red esta constituida por disciplinas de las cuales se derivan observables, es decir, términos que se caracterizan por ser observados sin intermediaci3n y sin una determinaci3n previa y que además, no requieren ser contrastados (Estany, 2006). Los observables cuantitativos son cantidades que se pueden obtener por medici3n o enumeraci3n, en la red conceptual (figura 1) se muestran utilizando rectángulos.

La ecología del paisaje la define la Asociaci3n Profesional de Ecología Ambiental (IALE por sus siglas en inglés) como el estudio de las interacciones del paisaje y su flora, su fauna y los componentes culturales, tomando en

consideración la dimensión espacio-temporal. Las interacciones son acciones recíprocas entre los sistemas y entre sus componentes producto de su existencia y de ocurrir en un territorio especificado. En esos espacios socio-culturales donde el hombre interviene la naturaleza a través de la actividad minera se dan un conjunto de interacciones que a partir de disciplinas como la Bio-complejidad se pueden comprender. Se ha conceptualizado a la Bio-complejidad como aquellas propiedades que emergen de las interacciones biológicas, químicas, físicas y sociales que influyen, sustentan o han sido modificados por organismos vivos incluyendo los seres humanos (Michener, 2001). Uno de los observables que se derivan de las disciplinas comentadas, es el área afectada por la actividad minera, cuantificada en hectáreas (ha). Castellanos (2008) determina mediante cálculos aproximados que cinco mineros durante un mes pueden devastar en una cuenca de la Guayana Venezolana un promedio de 400 m<sup>2</sup> en actividades de minería de aluvión. Esas áreas afectadas las podemos considerar como paisaje intervenido en la interacción ser-humano-naturaleza. De hecho, Naveh (2007) considera al concepto de paisaje como el más adecuado, integral y práctico para los estudios en sostenibilidad.

Una de las relaciones más complejas que se dan en la interacción ser-humano-naturaleza es la que se desprende de la actividad minera. El mercurio utilizado para amalgamar los metales en la práctica de la minería de aluvión, una vez se descompone por fusión la mezcla metálica pasa al ambiente (Veiga et al., 2004). Los enfoques ambientales en la salud humana se centran en la identificación de interacciones entre ambiente y las actividades humanas. El estudio de la concentración de mercurio en los animales, plantas y el suelo donde las actividades de minería artesanal se desarrollan es un modo de observar la cosificación de estas interacciones. Veiga y Baker (2005) recomiendan muestrear el mercurio en peces por dos razones, en primer lugar para determinar las cantidades de mercurio que pueden pasar a los habitantes ribereños a través de la ingesta de peces y también para determinar la bio-disponibilidad de mercurio debido a la minería artesanal, es decir, se desea determinar el impacto de la minería en las cadenas tróficas. La complejidad de relaciones entre los seres vivos y los componentes que pasan a formar parte

de los ecosistemas, esta más allá de la consideración de unas simples relaciones de causa-efecto, sin embargo, para poder tener una impresión del impacto de la intervención humana en la salud de los ecosistemas y la de los seres humanos se requiere observar indicadores muy específicos como la concentración de mercurio en el tejido de los peces. Por esto, la Salud Ambiental (Eco-health) como disciplina se concentra en la comprensión de las interacciones entre los sistemas sociales y los ecológicos definiendo indicadores claves determinantes en la salud humana, además se interesa por los impactos de las actividades humanas en la sostenibilidad de los procesos bióticos (De Plaen y Kilelu, 2004).

#### 4. Modelos para la determinación de la sostenibilidad

Partiendo de los observables que se derivan de las disciplinas y de los principios de la complejidad considerados, se construyen modelos que relacionan las cantidades observadas en la cuenca. El modelo de regresión que relaciona las áreas intervenidas con la población de la cuenca considerada y el número de mineros viene dado por:

$$\text{Área}_{\text{Interv}} = 23635 - 0.09 \cdot \text{PobCuenca} + 1,85 \cdot \text{mineros} \quad (\text{M.1})$$

Donde **ÁreaInterv** es área intervenida por la minería (ha), **PobCuenca** es la fracción de población de la cuenca (miles de habitantes) y **mineros** es número de mineros estimados en la región intervenida. El modelo M.1 posee un coeficiente de correlación  $r = 0,973$  y un valor de  $p=0,005$  para el estadístico F de la prueba F-ANOVA.

Mediante una relación no-lineal se estimó el número de mineros a partir de la producción de oro (Huidobro et alia, 2004), esta relación puede observarse en el gráfico 1.

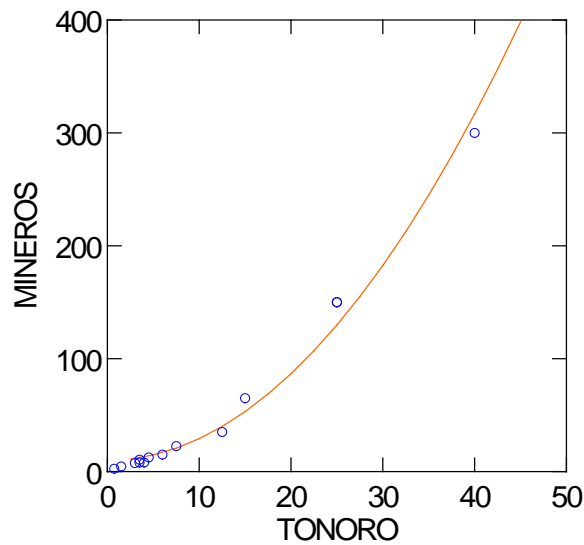


Gráfico 1. Ajuste no lineal entre la cantidad de mineros (MINEROS) y la producción de oro artesanal (TONORO). Fuente Huidobro (2004).

El estudio inter-disciplinario de las interacciones permite expresar a partir del principio de interdefinibilidad que el mercurio en los peces puede determinarse a partir de la tasa de producción de sedimentos, el área intervenida y la cantidad de pobladores en la cuenca, como se muestra a continuación:

$$Hg_{\text{peces}} = 0,140 + 0,07 \cdot \text{sedimentos} + 0,004 \cdot \text{ÁreaInterv} + 0,001 \cdot \text{PobCuenca} \quad (\text{M.2})$$

Donde  $Hg_{\text{peces}}$  es mercurio en el tejido de los peces ( $\mu\text{g}/\text{gr}$ ) y **sedimentos** es la tasa de producción de sedimentos ( $\text{ton}/\text{Km}^2/\text{año}$ ). El modelo M.2 posee un coeficiente de determinación múltiple ajustado de  $r^2 = 0,995$  y un valor de  $p = 0,000$  para el estadístico F-ANOVA. Es muy razonable esperar que todos los principios utilizados en la construcción de la red conceptual se concreten en modelos de regresión o modelos de otra naturaleza, sin embargo esto no siempre se logra a partir de la adición de otras relaciones y la introducción de nuevos observables. El principio de mutua dependencia se evidencia cuando se relaciona el área intervenida y la cantidad de sedimentos producidos por la remoción de los suelos ocasionada por la actividad minera.

Cuando se considera la dinámica demográfica de la cuenca se puede observar una disminución notable entre la proporción de indígenas (pemon) respecto de la población de criollos (poblac), esto se evidencia en la variable correspondiente **proporind** (ver Tabla 1). Utilizando las áreas intervenidas (modelo M.1), el mercurio en peces (modelo M.2) y la proporción de indígenas, se construye un índice de sostenibilidad para el espacio socio-natural considerado. La escala utilizada para el índice es 1-10, el valor mínimo de sostenibilidad es 1 y el máximo de la escala es 10.

Tabla 1.  ndice de Sostenibilidad ( ndice SOST)

año	poblacc	pemon	proporind	indpropind	areainter	indareaint	hgpeces	indhgpeces	Indice SOST
2000	664503	24341	0.03663	7.88599	3257	2.9649	0.0980	2.0126	7.64
2001	692479	24400	0.03524	7.42631	5789	3.0787	0.1000	2.0601	7.43
2002	721633	24458	0.03389	6.98341	7852	3.1715	0.1009	2.0838	7.24
2003	752015	24515	0.03260	6.55713	11380	3.3301	0.1670	3.6854	6.51
2004	783675	24572	0.03135	6.14688	17461	3.6035	0.1675	3.6975	6.28
2005	816669	24628	0.03016	5.75207	24523	3.9210	0.2560	5.8430	5.33
2006	851051	24684	0.02900	5.37216	37412	4.5004	0.2579	5.8883	4.99
2007	886881	24740	0.02790	5.00650	42297	4.7201	0.2565	5.8554	4.81
2008	922711	24795	0.02687	4.66901	41535	4.6858	0.2617	5.9821	4.67
2009	959989	24849	0.02588	4.34365	51905	5.1520	0.2604	5.9487	4.41
2010	998772	24903	0.02493	4.03001	61493	5.5831	0.2657	6.0773	4.12
2011	1039122	24956	0.02402	3.72765	72090	6.0595	0.2643	6.0434	3.87
2012	1081103	25008	0.02313	3.43619	82500	6.5275	0.2696	6.1739	3.58
2013	1124780	25060	0.02228	3.15524	93963	7.0428	0.2682	6.1395	3.32
2014	1170221	25111	0.02146	2.88442	105263	7.5509	0.2737	6.2719	3.02
2015	1217498	25161	0.02067	2.62340	117662	8.1083	0.2723	6.2370	2.76

Fuente: Paolini, J. (2008)

El  ndice de sostenibilidad que se muestra en el gráfico 2, se determina ponderando con igual peso cada uno de los indicadores considerados, a saber: el indicador de proporción de indígenas (**indpropind**), el indicador de áreas



intervenidas (**indareint**) y el indicador de Hg en peces (**inhgpeces**) de la Tabla 1.

Para la prospección de los valores de los indicadores y el índice de sostenibilidad se utiliza el siguiente modelo con un valor de  $\beta=0,5$ .

$$y_{t+1} = \beta \cdot y_t + \beta \cdot (1-\beta) \cdot y_{t-1} + \beta \cdot (1-\beta)^2 \cdot y_{t-2} + \beta \cdot (1-\beta)^3 \cdot y_{t-3} \dots \text{ (M.3)}$$

El modelo M.3 permite extrapolar los valores de los índices e indicadores desde el año 2009 hasta el 2015. El gráfico 2 se construye a partir del índice de sostenibilidad obtenido en los años que se consideran en la tabla 1.

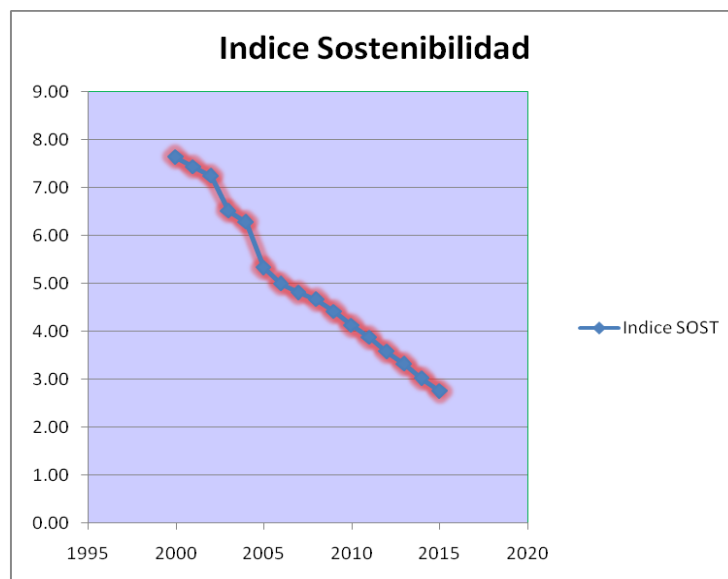


Gráfico 2. Índice de Sostenibilidad calculado a partir de los indicadores derivados de los modelos.

De acuerdo al gráfico, puede notarse como la sostenibilidad en el espacio socio-natural observado disminuye sistemáticamente, debido al aumento de las actividades minera, que a su vez incide en las áreas afectadas y la contaminación de Hg en el ambiente. El índice se ve afectado por la disminución de la proporción de indígenas en la zona. Los índices de

sostenibilidad se construyen a partir de indicadores relevantes con el propósito de evidenciar una situación o un fenómeno, en este caso, los efectos de la minería en pequeña escala sobre los espacios socio-naturales intervenidos de la cuenca donde se desarrollan estas actividades de extracción.

## 5 Conclusiones

Los principios del pensamiento complejo ayudan en la conformación de una red conceptual para la comprensión y modelización de la sostenibilidad en un espacio socio-natural, considerando para ello disciplinas que permitan observar las interrelaciones que se dan en esos espacios de encuentro ser-humano-naturaleza.

La modelización de la sostenibilidad pasa por la consideración de variables relevantes que se orienten en la comprensión del fenómeno bajo estudio sin dejar de considerar otras de menor impacto que están relacionadas con las actividades humanas.

Las redes conceptuales sintetizan en una estructura visual los principios del pensamiento complejo y materializan las interrelaciones que se dan en el espacio de lo disciplinar.

## Bibliografía

Estany, A. (2006). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Bellaterra (Barcelona): Universitat Autònoma de Barcelona.

Castellanos, H. (2008). *¿Por qué debemos conservar el Caura?* **Kuawäi** 1,1: 81-88. Universidad Nacional Experimental de Guayana. Venezuela.

De Plaen, R. y Kilelu, C. (2004). *From Multiple Voices to a Common Language: Ecosystem Approaches to Human health as an Emerging Paradigm*. **EcoHealth** 1 (Suppl. 2), 8–15.

García, R. (2006). *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona (España): Gedisa editorial.

Huidobro, P. et alia. (2004). *Strategies to Reduce Hg exposure in Artisanal and Small-Scale Miners*. Regional Awareness Raising Workshop on Mercury Pollution, Dakar.

Hempel, C. (1988). *Fundamentos de la formación de conceptos en ciencia empírica*. Madrid: Alianza Editorial.

IALE International Association for Landscape Ecology. UK Region. Disponible en: <http://www.iale.org.uk/> Consultada el 27 de enero de 2009.

Michener, W. et al. (2001). *Defining an unraveling biocomplexity*. **BioScience** Vol. 51 No. 12.

Morín, E. (2004). *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona (España): Gedisa editorial.

Morin, E. (2005). *La epistemología de la complejidad*. En *Con Edgar Morin, por un pensamiento complejo. Implicaciones interdisciplinarias*. Solana, J (Coord.). Madrid: Universidad Internacional de Andalucía/Akal.

Mosterin, J. (2008). *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial.

Nave, Z. (2007). *Landscape ecology and sustainability*. **Landscape Ecology**. 22: 1437-1440.

Paolini, J. (2008). *Diseño de un modelo para el análisis de la sostenibilidad en la Cuenca Hidrográfica del río Caroní en la Guayana Venezolana*. **Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo**. 3: 21-38

Riechman, J. (2006). *Biomímesis. Ensayos sobre imitación de la naturaleza, ecosocialismo y autocontención*. Madrid: Catarata

Veiga, M et al. (2004). *Mercury Pollution from Artisanal Gold Mining in Block B, El Callao, Bolívar State, Venezuela: Health and Technological Assessment*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization.

Veiga, M. y Baker, R. (2005). *Protocols for Environmental and Health Assesment of Mercury realeased by Artisanal and Small-Scale Miners*. Global Mercury Project. UNIDO. p 1-170.