

Organización y sostenibilidad en un sistema urbano socio-ecológico y complejo.

Alejandro D. Crojethovich Martín* y Alejandro J. Rescia Perazzo**

*SinergyBrains. Paseo de la Infanta Isabel, 19 3C Escalera Derecha, 28014 Madrid, España.
<http://www.sinergybrains.com> e-mail: acroje@yahoo.com

**Departamento Interuniversitario de Ecología, Facultad de Biología, Universidad Complutense de Madrid. C/José Antonio Novais, 2 Ciudad Universitaria 28040 Madrid, España.
<http://www.ucm.es/info/ecologia/> e-mail: alejo296@bio.ucm.es

Resumen

El enfoque tradicional consiste en tratar a la sostenibilidad a partir de la interacción entre tres subsistemas: el social, el económico y el ecológico, con algún grado de dependencia entre ellos, y donde en cada uno se puede definir un tipo especial de sostenibilidad que está relacionada con los objetivos a alcanzar en cada subsistema. Otro punto de vista, es que la sostenibilidad es una medida del mantenimiento de la organización y estructura de un sistema. A pesar de los avances, sin embargo siguen prevaleciendo los enfoques estáticos e individuales sobre los dinámicos y sistémicos. Este trabajo se realiza tomando como ejemplo la integración a nivel sistémico de una ciudad y la sostenibilidad como una propiedad emergente de las interrelaciones entre los distintos aspectos mencionados, aplicados dentro del marco teórico de la ecología urbana.

La metodología desarrollada considera a la ciudad como un sistema complejo, al ambiente en sus múltiples dimensiones (físico, social, económico, cultural, entre otras) y enfoca el análisis de la sostenibilidad a la gestión de los recursos hídricos urbanos. Para ello se ha construido un sistema que permite estudiar las interrelaciones que dan cuenta de la calidad del recurso hídrico (superficial y profundo), sus formas de uso, las condiciones socioeconómicas de los consumidores, las principales actividades productivas de una región y sus consecuencias sobre el estado del recurso (vertidos domiciliarios e industriales), las condiciones de vulnerabilidad y riesgo ambiental, así como los principales procesos ecológicos (contaminación, inundación, entre otros) como producto de dichas interrelaciones.

Descriptor: sostenibilidad urbana, recursos hídricos, sistema complejo, metabolismo urbano.

1 Introducción

El enfoque tradicional al hablar de la sostenibilidad parte de pensar en la interacción entre tres subsistemas: el social, el económico y el ecológico, con algún grado de dependencia entre ellos, y donde en cada uno se puede definir algún tipo especial de sostenibilidad que está relacionada con los objetivos a alcanzar en cada subsistema (Giljum, Hinterberger y Köhn, 2001, p. 363-378). Este enfoque se puede aplicar a diferentes “escenarios”, entre ellos los más importantes son las aproximaciones del concepto que utilizan las empresas (sostenibilidad empresarial), la sostenibilidad de las ciudades, el uso sostenible de los recursos naturales y el desarrollo social sostenible.

Para muchas empresas ser sostenible significa ser ambiental y socialmente responsable. El “Greenwashing” de los informes de sostenibilidad y otros que incluyen aspectos no económicos ha dado lugar a un movimiento empresarial en rapido crecimiento (Figura 1).

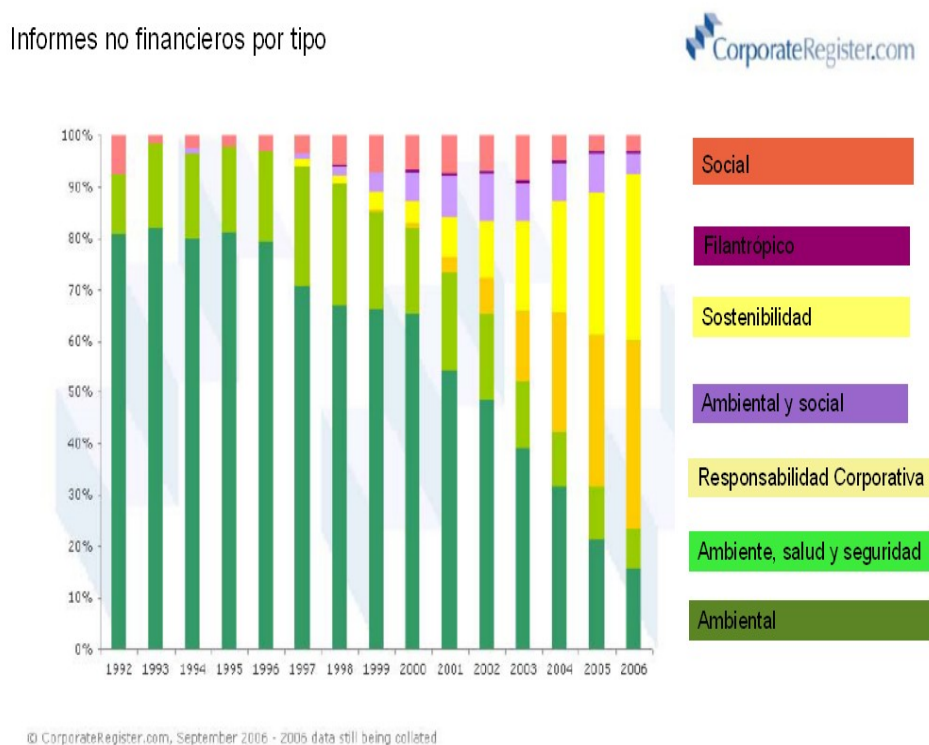


Figura 1. Número de informes no económicos emitidos por las empresas, clasificados por el tema del cual trata el informe, desde el año 1992 al 2006. Fuente: www.corporateregister.com

La tendencia va a hacia la utilización de auditorías externas a las empresas que certifiquen que la información contenida en los informes es verdadera, aunque el problema de fondo no debiera ser tanto que los datos contenidos en los informes sean verdaderos, sino mas bien cuan relevantes son esos datos con respecto a los objetivos finales de mejora medioambiental y desarrollo social.

Un repaso de las distintas concepciones tradicionales sobre la sostenibilidad permite proponer una clasificación básica de dos aproximaciones aplicables al mundo natural:

- La referida al uso de recursos y ciclos materiales,
- La ligada a la resiliencia de los sistemas.

En la primera aproximación al concepto, el centro de atención es puesto en el mantenimiento en el tiempo de los sistemas naturales, como base del desarrollo económico y social (WWF, 1993. Holdren, Daily y Ehrlich, 1995. Azar, Holmberg y Lindgren, 1996). Se dice que el desarrollo debe estar en concordancia con la capacidad de la naturaleza para proveer servicios: la sostenibilidad requiere de una relación equilibrada entre las necesidades humanas, por un lado, y el tamaño limitado y la capacidad finita de recursos de la Tierra, por otro, mientras que el bienestar humano debe buscarse dentro de la capacidad del medio ambiente natural para tolerar, sostener y absorber tal uso, cuyos niveles actuales son excesivos y no sostenibles. Para Bailey (1996) la sostenibilidad asociada a un manejo óptimo de la tierra (usos del suelo), está relacionada con mantener la productividad de los recursos y los procesos ecosistémicos y sus funciones, esto es igual a la capacidad ecosistémica. La producción primaria neta puede ofrecer una base para conocer los límites de la sostenibilidad en uno de sus fundamentales aspectos: el biogeofísico, siendo que más del 40% de la producción primaria neta de todos los ecosistemas terrestres esta siendo usada directa o indirectamente para uso humano (Vitousek et al., 1986).

Por otra parte, la integridad ecosistémica tanto en lo que hace a la solidez de un sistema natural (Campbell y Heck, 1997), a las funciones de la biosfera (Munasinghe y Shearer, 1995) y a la resiliencia (Lele, 2000) está relacionada con la sostenibilidad ecológica, concepto que supone la propuesta de criterios necesarios para establecer la evaluación de cambios, adaptaciones y límites del sistema ecológico, frente a la presión ejercida por los procesos de desarrollo socioeconómico.

Una visión alternativa de la sostenibilidad es la de considerar que hay que sustentar los procesos sociales y económicos necesarios para el bienestar y el desarrollo, preferentemente urbanos (Mitlin y Satterhwaite, 1994. National Science Foundation, 2000). Se focaliza más el concepto de sostenibilidad sobre los procesos de reproducción social y ecológica, contextualizados en el mantenimiento de las condiciones de vida y el sustento en las ciudades.

2 Acerca de la sostenibilidad sistémica

El concepto de sostenibilidad aplicado a sistemas ha sido tratado desde diferentes puntos de vista: el mantenimiento del sistema mientras él mismo se encuentra desarrollándose o cambiando su estado de organización (Warren, Allen y Haefner, 1979), energéticamente como un balance entre el desorden de las actividades humanas y la energía solar (Balocco y Grazzini, 2000) o la minimización de la pérdida de exergía (Suganthi y Samuel, 2000). Sin embargo aunque estos puntos de vista puede parecer más sistémicos, sigue habiendo dos problemas:

1. La consideración de la sostenibilidad en forma aislada para diferentes escenarios, por ejemplo para una ciudad o un ecosistema natural.
2. La dificultad de pensar a la sostenibilidad en términos de espacios geográficos, redes y ciclos.

A partir de la definición de un sistema complejo como aquel “formado por un gran número de elementos simples, que interactúan entre sí, capaces de intercambiar información entre ellos y el entorno, y, a su vez, capaces de adaptar su estructura interna como consecuencia de tales interacciones” (Schuschny, 1998) es posible plantearse a la sostenibilidad como una medida del mantenimiento de la organización y estructura de un sistema con múltiples caminos para evolucionar (Whitesides y Ismagilov, 1999). En este marco se puede estudiar tanto la sostenibilidad de los componentes del sistema como las relaciones entre los componentes.

El enfoque planteado aquí es radicalmente diferente al estudiar la sostenibilidad como una propiedad emergente que se transmite en forma metabólica. Los supuestos básicos de este trabajo son los siguientes:

- La sostenibilidad es una propiedad emergente de sistemas complejos.
- La sostenibilidad se transmite a través de redes y cadenas. Aumenta o disminuye en cada paso y se acumula.
- La sostenibilidad es una propiedad que se da en estructuras que pueden tener diferentes niveles de organización, una estructura jerárquica.

Definimos la unidad básica de sostenibilidad (UBS) (Figura 2) como un elemento en un sistema complejo donde se producen tres actividades:

- La “creación” o emergencia de la sostenibilidad, basada en un proceso de decisión que incluye una serie de objetivos y estrategias.
- Su acumulación en la UBS.
- La transferencia de la sostenibilidad a otras UBS.

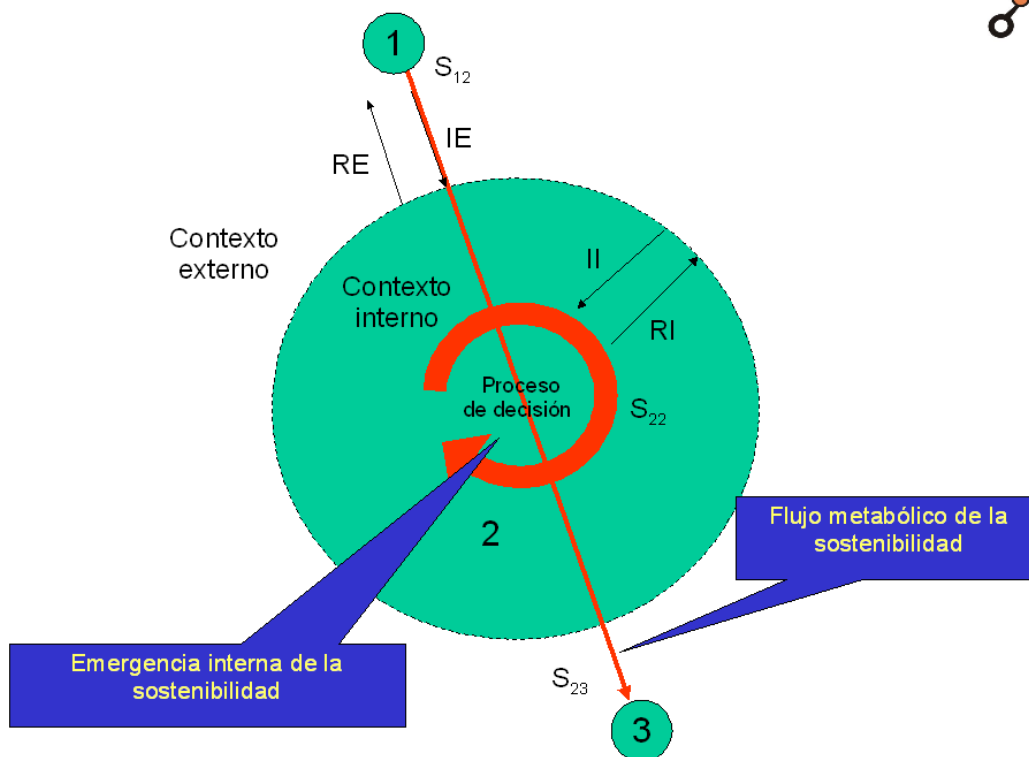


Figura 2. La unidad básica de sostenibilidad sistémica (UBS), en un ejemplo con tres unidades. La unidad 2 se relaciona a través de flujo de sostenibilidad (S_{12} y S_{23}) con los elementos 1 y 3. IR y RE son fuerzas restrictivas internas y externas que establecen las condiciones limitantes y fuerzas impulsoras (IE, II) hacia la sostenibilidad. La creación de la sostenibilidad en cada UBS (S_{22}) es el resultado de un proceso de decisión interno.

Dichas funciones son posibles porque en cada UBS existen dos componentes, en distintos niveles de una jerarquía. El componente interno en cada UBS: la Intrasostenibilidad, representa sus objetivos particulares y es comunicado al resto de las UBS a través de diversas vías, pudiéndose dar el caso de que algunos de los objetivos de una unidad no sean compatibles con los objetivos de otras unidades.

En un nivel jerárquico superior, la sostenibilidad es la resultante de un sistema formado por asociaciones entre UBSs (componente Intersostenibilidad). Aquí se mantienen las diferencias internas de cada unidad, pero sus comunicaciones al exterior tienen un valor agregado superior. De igual forma el sistema formado es sostenible a un nivel superior. La sostenibilidad de cada unidad es promediada por el comportamiento del resto de modo que el sistema está sujeto a retroalimentaciones positivas que pueden hacer que el promedio sea mayor o menor que algunas

de las unidades.

Distinguimos a priori 4 tipos de UBSs (a un nivel claro está, porque por debajo y encima de este nivel los conjuntos de unidades son diferentes): Ciudades, Empresas, Sociedades y Ecosistemas naturales.

Existe para cada UBS un medioambiente (por ejemplo en el caso de las ciudades hay un ambiente urbano) y redes tróficas donde se metaboliza la sostenibilidad. Esas redes tróficas son de naturaleza multidimensional: económica, física, de valores, política. Una parte de un sistema sostenible puede ser a su vez parte de otros sistemas, como los *eco-sistemas* de Jørgensen (1992) definidos como una entidad con su ambiente.

2.1 La metodología

Hasta ahora hemos echo una revisión crítica del concepto de sostenibilidad y su aplicación a un conjunto de escenarios. Más adelante hemos explicado los fundamentos de la sostenibilidad sistémica. A continuación esa teoría es llevada a la practica con una metodología y herramientas que ha sido desarrolladas por la empresa Sinergybrains (Figura 3).

La metodología empleada puede dividirse en dos etapas:

- La modelización de un sistema complejo basado en una organización estructurada de UBSs en el marco de un análisis interdisciplinario, utilizando un conjunto de herramientas, que varían con cada caso en concreto.
- El análisis particularizado de la sostenibilidad en flujos o cadenas (por ejemplo ciclos de vida de productos), espacios (por ejemplo ciudades y territorios) o de clusters (por ejemplo asociaciones de empresas).

Desarrollaremos a continuación un ejemplo de esta metodología, el análisis de una cuenca hidrográfica urbana como un sistema complejo y analizaremos brevemente sus condiciones de sostenibilidad en el marco teórico de la ecología urbana.

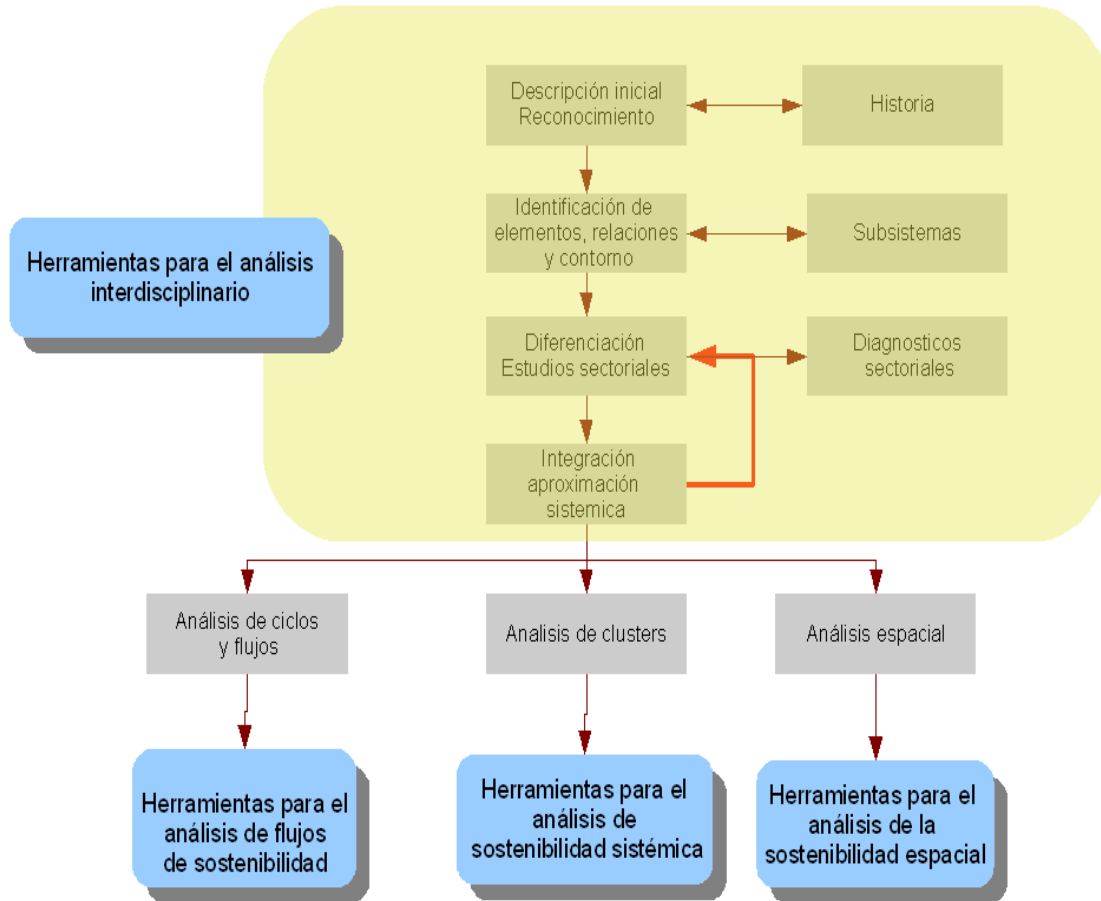


Figura 3. Diagrama de la metodología que permite el análisis de la sostenibilidad sistémica.

3 El caso de estudio

Este caso consta de dos etapas (Figura 4). En la primera (de la cual trata este trabajo) se analiza el marco conceptual en que se basa el estudio, la ecología urbana y en particular el concepto de sostenibilidad hídrica que resulta importante para los procesos de decisión que puedan generarla. Más adelante se define la unidad (UBS) al cual se aplica el estudio, el sistema y sus subsistemas y que indicadores pueden utilizarse en este caso específico. Por ultimo se describe la segunda etapa, en la cual se utilizan herramientas de análisis espacial para estudiar la emergencia de la sostenibilidad.

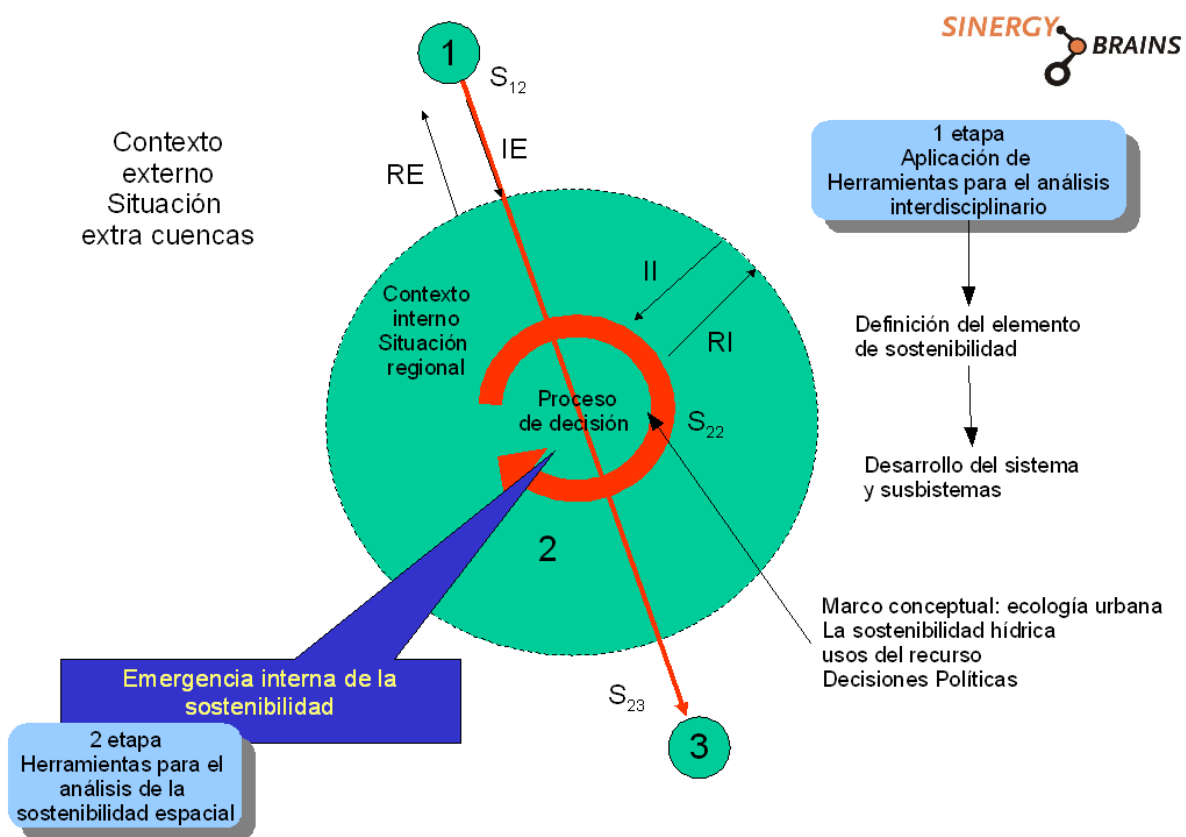


Figura 4. El elemento de sostenibilidad en una cuenca hidrográfica.

El área de estudio es la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), en la República Argentina. Al año 2001 tenía 12.859.895 habitantes en una superficie de 8.114 km². La RMBA se encuentra limitada físicamente al Norte por el delta del Río de la Plata, al Este principalmente por el Río de la Plata y al Oeste y Sur por tierras agrícolas y ganaderas de la provincia de Buenos Aires. Estas áreas corresponden a sistemas naturales con diversos grados de antropización. Esas áreas interaccionan de diversas formas con la RMBA, proveyéndola de aire, alimentos, energía, y recibiendo los productos de ella, incluidos los residuos domiciliarios e industriales.

La RMBA se encuentra en la porción terminal de varias cuencas que desagüan principalmente en el Río de la Plata. Tres de ellas, las de los ríos Lujan, Reconquista y Matanza-Riachuelo tiene un curso principal definido y único. La cuarta corresponde a pequeños arroyos que se encuentran en el litoral Sur de la región. En esta investigación consideraremos principalmente las tres primeras (Tabla 1).

Nombre de la cuenca	Superficie de la cuenca (km ²)
Cuenca del Río Lujan	2.940
Cuenca del Río Reconquista	1.574
Cuenca del Río Matanza-Riachuelo	2.034

Tabla 1. Superficie y denominación de las tres principales cuencas de la Región Metropolitana de Buenos Aires, Argentina.

3.1 El proceso de decisión

Las fuerzas que interaccionan con la UBS no bastan para explicar el comportamiento del mismo. En el interior de cada unidad existe una serie de factores de carácter histórico-cultural que filtran las fuerzas impulsoras y restrictivas del entorno externo e interno, o más precisamente transforman dichas fuerzas positiva o negativamente. Ese conjunto de factores, que denominamos el proceso de decisión, es de una naturaleza multidimensional, tanto que intervienen factores locales, económicos, políticos, científicos, entre otros. Nosotros identificamos dos en este trabajo: el marco conceptual de la ecología urbana y la sostenibilidad hídrica.

La ecología urbana tiene entre sus objetivos el análisis de la estructura de las ciudades, de sus flujos de materia y energía (Di Pace y Crojethovich Martín, 2004), las interrelaciones de la ciudad con su entorno y de su sostenibilidad (Di Pace, 2004, p. 25-34), incluyendo el análisis entrópico de los sistemas urbanos (Bettini, 1998, p. 55-76). Sus conceptos más fundamentales son los siguientes:

- a) **El ambiente urbano**, definido como una forma particular de ocupación del espacio por una población, es decir, la aglomeración resultante de una fuerte concentración y de una densidad relativamente elevada, que tendría, como correlato previsible, una diferenciación funcional y social cada vez mayor. El mismo incluye tanto al ambiente natural de la ciudad, esto es los elementos físicos de la naturaleza (relieve, clima, agua, aire, suelo, etc.), al ambiente construido, formado por las estructuras del espacio que son resultantes de la dinámica social sobre el territorio urbano (casas, comercios, rutas, vías férreas, aeropuertos, etc.), y por último incluye a la sociedad que habita en ese conglomerado (con sus características distintivas como: nivel de ingreso, acceso a educación, acceso a los servicios de salud, impacto de la contaminación sobre la salud, etc.). Es especialmente importante considerar al ambiente urbano como la resultante de diversos procesos de interacción entre tales instancias: la natural, la construida y la social

(Di Pace, Crojethovich Martin y Herrero, 2004, p. 35-66).

- b) **La ciudad funcionando como un ecosistema**, análogamente a como lo hacen los ecosistemas naturales, intercambiando materia y energía, enlazada por cadenas tróficas que definen el metabolismo urbano, en este caso donde una salida importante son los residuos (Di Pace y Crojethovich, 1999).
- c) **La ciudad analizada como un sistema complejo**, de lo cual hablaremos más adelante.

3.2 La sostenibilidad hídrica

El concepto de sostenibilidad no ha sido claramente definido con respecto a los recursos hídricos como a otros recursos (Gleick, 1998). Cuestiones como ¿qué es lo que se debe sostener?, ¿por cuánto tiempo?, ¿cuáles son los beneficios? y ¿quienes son los beneficiarios? son centrales para tratar el uso sostenible de los recursos hídricos, que incluye planificar las necesidades humanas presentes y futuras y las necesidades ecológicas con el agua que está disponible, y determinar que deseos pueden ser satisfechos dentro de los límites de los recursos.

Gleick et al. (1995) definen la sostenibilidad hídrica como: “el uso del agua que sostiene la capacidad de la sociedad humana para mantenerse y crecer dentro de un futuro indefinido sin comprometer la integridad del ciclo hidrológico o los sistemas ecológicos que dependen de él”. Podemos hacer una primera aproximación al uso sostenible de los recursos hídricos expresando que para que se de ese uso es necesario un *abastecimiento de agua en calidad y cantidad adecuadas para satisfacer las necesidades básicas de las generaciones presentes y futuras*.

El estado de los recursos hídricos puede ser un emergente privilegiado de la situación ambiental y social en una región (Hunsaker y Levine, 1995. Wear, Turner y Naiman, 1998). De acuerdo con Douglas (1983) “el sistema hídrico urbano es un buen ejemplo de la aplicación de la ecología sistémica a la ciudad”. La cuenca es la unidad territorial en la cual ocurren los procesos e interacciones socio - ecológicas de interés y que pueden ser más determinantes para el estado de los recursos hídricos. De acuerdo con Fernández Cirelli (1998): “las cuencas hidrográficas en las que el recurso hídrico es el elemento unificador, son el factor geográfico de integración y desarrollo. El conocimiento, tanto cuantitativo como cualitativo, del recurso agua se constituye en este contexto, en un elemento fundamental para la planificación regional que, vinculando el hombre y su entorno permite integrar límites políticos - administrativos y recursos económicos y sociales que se encuentran interrelacionados entre sí”. Al trabajar con las cuencas se reduce la arbitrariedad en la definición de los límites considerando que un punto de la superficie dentro del sistema se encuentra en una y solo una cuenca.

Para concluir, el proceso de decisión interno para la emergencia de la sostenibilidad en el sistema “cuencas hidrográficas de la RMBA” se basa en la respuesta del sistema a la siguiente pregunta: ¿compromete y en que forma la gestión de los recursos hídricos a la sostenibilidad de la región?

3.3 Las condiciones de contexto externo

Dos reflexiones. Primero, que los ciclos naturales que se pueden incluir como ambiente físico, el clima, el ciclo del agua, el aire, etc. son de una naturaleza (y una complejidad) que se hace imposible precisar que regiones remotas tienen algún tipo de interacción con la región analizada. Llevado a un extremo probablemente áreas muy lejanas participen de alguna forma en determinar las condiciones ambientales de la región. Un caso concreto es que la disponibilidad de agua del Río de la Plata y su calidad depende de procesos que ocurren en la “región” denominada Cuenca del Plata de más de 3, 5 millones de km². Por ejemplo las actividades mineras en la cuenca alta del río Bermejo en la frontera entre Argentina y Bolivia determinan la presencia de metales pesados en el lecho de delta del Río de la Plata frente a Buenos Aires, a miles de kilómetros de su origen.

Segundo, los sistemas de mercado internacional determinan que exista un transporte de materias primas y productos elaborados de regiones distantes, por ejemplo maderas de Asia, verduras de Europa, a la región. A una escala menor, los minerales que son usados en la RMBA se extraen de áreas distantes de la Argentina y el Mercosur. Lo mismo podríamos decir de las políticas y modelos económicos que influyen sobre la región. Con lo anterior queremos dejar en claro que es necesario acotar lo “exterior pero interactuante” del sistema en estudio. .

Hemos identificado el contexto externo organizado en una serie de niveles. El primer nivel, local, incluye:

- Usos del suelo en la cuenca
- Sistema político municipal y regional
- Estado y dinámica del Río de la Plata y de su delta
- Procesos y políticas de urbanización
- Políticas públicas y privadas de agua a nivel municipal y regional. Privatizaciones.
- Políticas industriales

El segundo nivel, macrorregional, incluye:

- Cambios en los usos del suelo a nivel de macrorregión fuera de las cuencas.
- Sistema político provincial y nacional
- Política nacional de uso del agua
- Política provincial y nacional de vivienda
- Política de industrialización en la región

Es posible definir un tercer nivel que puede incluir los modelos de desarrollo, comercio con el Mercosur e internacional, dinámica y usos del suelo en la Cuenca del Plata. Tanto las relaciones internas entre los niveles como las condiciones de contexto o condiciones en los límites se

pueden especificar en forma de flujos (de materia, de energía, de créditos, de información, etc.).

3.4 El contexto interno-los subsistemas

Es aquel en el cual se dan los procesos que determinan la intrasostenibilidad. Su análisis sistemático se realiza considerando subsistemas entre los cuales ha sido posible detectar las relaciones más significativas. Siendo que los procesos que intervienen son de carácter socioeconómico-ecológico, resulta adecuado delimitar los subsistemas en función de esa dualidad.

Existe una retroalimentación entre la organización de los subsistemas y la estructura del sistema. Los subsistemas influyen sobre los procesos y estos a su vez pueden condicionar a los subsistemas. Consideraremos tres subsistemas como fundamentales en los procesos que intervienen a nivel de las cuencas hídricas de la región: subsistema humano, productivo y natural. Una configuración similar ha sido utilizada por diferentes autores para aplicar los conceptos de desarrollo sostenible (Allen, 1996. Muschett, 1997) y analizar las relaciones entre sociedad y naturaleza, por lo que su utilización permite a los recursos hídricos y su problemática como ejemplo de estudio en ese sentido.

El subsistema humano incluye la estructura socio poblacional en la región, es decir las condiciones sociales y económicas como ser cantidad de población y su crecimiento, ingreso, población con necesidades básicas insatisfechas, etc. También las partes del sistema hídrico construidas por el hombre como el sistema de captación de agua (redes de servicios, pozos) y el sistema de desagües cloacales.

El subsistema productivo incluye básicamente la estructura industrial desde los puntos de vista de presencia y tipo de establecimientos industriales, demanda de agua y sistemas de desagües de residuos industriales, tipo de residuos emitidos en los procesos industriales y su destino.

El sistema natural incluye las características físicas y naturales de los cursos hídricos en la región, contaminación. En conjunto es lo que podemos denominar la hidrosfera urbana, más algunos elementos de la atmósfera, biosfera y litosfera.

3.5 La unidad de sostenibilidad

El estudio de un sistema complejo lleva a identificar los componentes del sistema: los elementos, los límites del sistema, y sus interrelaciones, tanto internas como externas. De acuerdo con García (1986) al elegirse los límites de un sistema complejo se plantean dos problemas estrechamente relacionados:

- 1) la definición de los límites en forma tal que reduzca al mínimo posible la arbitrariedad en la partición que se adopte.
- 2) la forma de tomar en cuenta las interacciones del sistema, así definido, con el “medio externo” o, dicho de otra manera, la influencia de lo que queda “afuera” sobre lo que queda “adentro” del

sistema, y recíprocamente.

Estas definiciones son equivalentes a los contextos interno y externo de la Figura 2. Por lo expresado anteriormente, se ha elegido como unidad de sostenibilidad territorial y límite a la cuenca hidrográfica, en particular a las tres de la región (Figura 5).

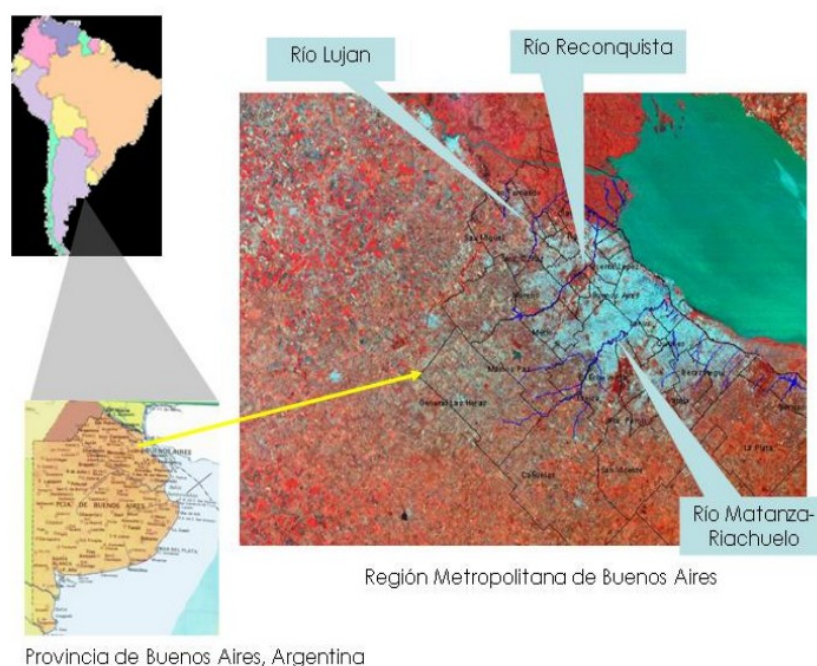


Figura 5. Ubicación de los ríos Lujan (superficie de la cuenca: 2940 km²), Reconquista (1574 km²) y Matanza-Riachuelo (2034 km²) en la Región Metropolitana de Buenos Aires, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

3.6 Estructura de la UBS

La estructura está determinada por el conjunto de relaciones y no por los subsistemas. Estas relaciones pueden ser de distintos tipos: flujos físicos de materia y energía, relaciones sociales, procesos de desarrollo urbano y productivo, etc. Cada uno de los tipos de relaciones involucra una metodología para su evaluación e indicadores. En nuestra UBS hemos identificado una serie de relaciones, entre ellas:

- Flujos de extracción de agua domiciliarios e industriales, de fuentes superficiales y

subterráneas.

- Descarga de residuos domiciliarios a fuentes superficiales (Río de la Plata y aguas continentales) y fuentes subterráneas.
- Descarga de residuos industriales a fuentes superficiales (Río de la Plata y aguas continentales) y fuentes subterráneas.
- Flujo de agua entre fuentes: infiltración de agua desde la superficie hacia las napas, escurrimiento superficial y subterráneo hacia cursos continentales y Río de la Plata.
- La vulnerabilidad y habitabilidad como relación entre el estado de los subsistemas humano y natural.
- La competitividad del subsistema productivo y su relación con el subsistema natural.
- La sostenibilidad ecológica del subsistema natural y su relación con los productivos y humanos.

4 Indicadores

Se han elegido una serie de variables que junto con las relaciones mencionadas anteriormente entre los subsistemas permitirán evaluar la sostenibilidad y organización de las cuencas.

- Indicadores de Contaminación.
- Usos del Agua.
- Usos del Suelo.
- Programas Municipales.
- Indicadores económicos.
- Calidad aguas subterráneas.

A continuación daremos algunos ejemplos de aplicaciones de los indicadores. Por ejemplo, en lo que se refiere al uso de las aguas superficiales y subterráneas, una actividad será insostenible si las extracciones superan a las reposiciones, o, si las tasas de extracción por uso superan a las tasas de extracción naturales (evaluando el grado de dominación antrópica sobre un ciclo natural). Algunos indicadores compuestos que se pueden proponer son los siguientes. Para aguas subterráneas un ejemplo de indicador sería el (1):

$$I_{\text{sub}} = (K_{\text{ext}(d+i+r)})/K_{\text{esc}} \quad (1)$$

Donde K_{extd} es la tasa de extracción de agua debida a los pozos domiciliarios y comunitarios, K_{exti} es la extracción industrial y K_{extr} es la extracción por actividades agropecuarias. Si $I_{\text{sub}}=1$ entonces la interrupción del ciclo natural del agua es importante.

Para aguas superficiales un indicador puede ser el (2):

$$I_{1\text{sup}} = K_{\text{extrd}}/K_{\text{evap}} \quad (2)$$

Donde K_{extrd} es la tasa de extracción de agua de los ríos y K_{evap} es la tasa de evaporación. El Río de la Plata es con mucho del cual se extrae la mayor cantidad de agua en la región, si bien una pequeña fracción de la población obtiene agua de los arroyos en la región, esta es despreciable para los cálculos. En este caso $K_{\text{evap}} \gg \gg K_{\text{extrd}}$ y $I_{1\text{sup}}$ tiende a 0.

Para evaluar la producción y acumulación de sustancias naturales y artificiales sobre las cuencas se pueden proponer los siguientes indicadores que evalúan magnitud de los flujos antrópicos comparándolos con los flujos naturales (para sustancias naturales). Por ejemplo para el caso del fósforo (3) (producto de los sistemas agrícolas, detergentes domiciliarios y algunas actividades industriales y el principal causante de la eutrofización) en los cursos de agua tenemos el indicador:

$$I_{2p} = (E_{\text{ap}} + E_{\text{np}})/E_{\text{np}} = 1 + E_{\text{ap}}/E_{\text{np}} \quad (3)$$

Donde E_{ap} es la tasa de adición de fósforo debido a las actividades humanas a los ecosistemas, E_{np} es la tasa natural de fósforo. Si $E_{\text{ap}} = 0$ entonces $I_{2p} = 1$. Si $I_{2p} \gg 2$ entonces la tasa de adición antrópica puede ser insostenible. Indicadores como Volumen ($\text{m}^3/\text{día}$) y DBO promedio (mg/l) de las aguas residuales dispuestas en ríos, arroyos pueden servir en los cálculos anteriores.

Para evaluar la acumulación de sustancias y elementos naturales en el sistema hídrico es necesario conocer las entradas y salidas de la sustancia al sistema. Un indicador que evalúe la relación entre las entradas (naturales y antrópicas) y las salidas (a través de flujos de agua o por la degradación natural de la sustancia) permitiría conocer si la situación con respecto a ese elemento es sustentable o no (4). Por ejemplo para evaluar la acumulación de nitritos en el sistema se propone el siguiente indicador:

$$I_{2\text{NO}_2} = (E_{\text{aNO}_2} + E_{\text{nNO}_2})/k*(C_{\text{NO}_2})_t \quad (4)$$

Donde K que es la tasa de salida de la sustancia es una función que varía ya sea que se trate de aguas superficiales o subterráneas. Para superficiales depende de las características del curso de agua, como por ejemplo el caudal, del ritmo de degradación natural de la sustancia que a su vez depende del estado trófico del cuerpo de agua, etc. Para aguas subterráneas K depende de la extracción de agua domiciliaria e industrial, de la escorrentia subterránea y de la degradación natural de la sustancia (que puede ser bastante baja). C es la cantidad de la sustancia que se encuentra en un momento t en el sistema. E_a puede ser estimado para algunas sustancias a partir de los desagües cloacales e industriales. En muchos casos puede ser despreciable cuando no existe ingreso natural de una sustancia.

Si la sustancia es artificial (por ejemplo como producto de efluentes industriales), $E_n=0$ y K puede ser muy chico porque la desintegración natural de sustancias artificiales es muy lenta. En ese caso si E_a es grande entonces I_2 será también muy grande e indicará una gran insostenibilidad. Si $I_2 = 1$ entonces el contenido de la sustancia se estabilizará en el tiempo, lo cual no indica sostenibilidad ya que depende de la cantidad de la sustancia presente.

Cambiando de tema, la estructura del paisaje urbano que incluye la configuración espacial de los usos del suelo puede ser analizada como atributo para medir sostenibilidad hídrica, aunque esta es un área que recién está comenzando a tomar impulso. Se proponen dos indicadores basados en usos del suelo (5), (6).

$$I_3 = -\sum_{k=1}^m (P_k) \ln(P_k) \quad (5)$$

donde P_k es la proporción de un uso del suelo k (por ejemplo uso urbano, rural o natural) en un sitio y m es el número de usos observados. Si I_3 es grande, estaría indicando una alta diversidad de usos del suelo el sitio estudiado, lo cual puede estar relacionado con la calidad del agua, aunque se trata de una idea que debe ser explorada más en profundidad. La información de este indicador puede complementarse con el siguiente:

$$I_4 = I_{3max} + \sum_{k=1}^m (P_k) \ln(P_k) \quad (6)$$

donde $I_{3max} = \ln m$ (la máxima diversidad cuando todos los tipos de usos del suelo están presentes con igual proporción). Cuando I_4 es grande, indica que un uso del suelo domina sobre los otros. Algunos autores han investigado las relaciones existentes entre distintos usos del suelo y la calidad de los recursos hídricos a nivel espacial. I_4 es un indicador de insostenibilidad en un sitio si el uso del suelo dominante en un sitio está asociado con una baja calidad de las aguas. Otros indicadores pueden ser del tipo general (7):

$$I_4 = \frac{S_i}{S_t} \quad (7)$$

donde S_i puede ser la superficie de suelo con uso industrial, superficie con vegetación natural, superficie impermeabilizada u otra variable que afecte alguna parte del ciclo del agua urbano, y S_t es la superficie total.

Para terminar un comentario acerca de la segunda etapa de este estudio, que consiste en utilizar la metodología descrita para analizar la emergencia de la sostenibilidad como la resultante de la combinación de procesos internos en el paisaje de la cuenca (Figura 6). Se asignará a cada porción del territorio una probabilidad de cambio ρ en dos escenarios:

- Tendencial: sin grandes cambios en la gestión actual.
- Sostenible: Aplicando criterios adecuados a los recursos hídricos.

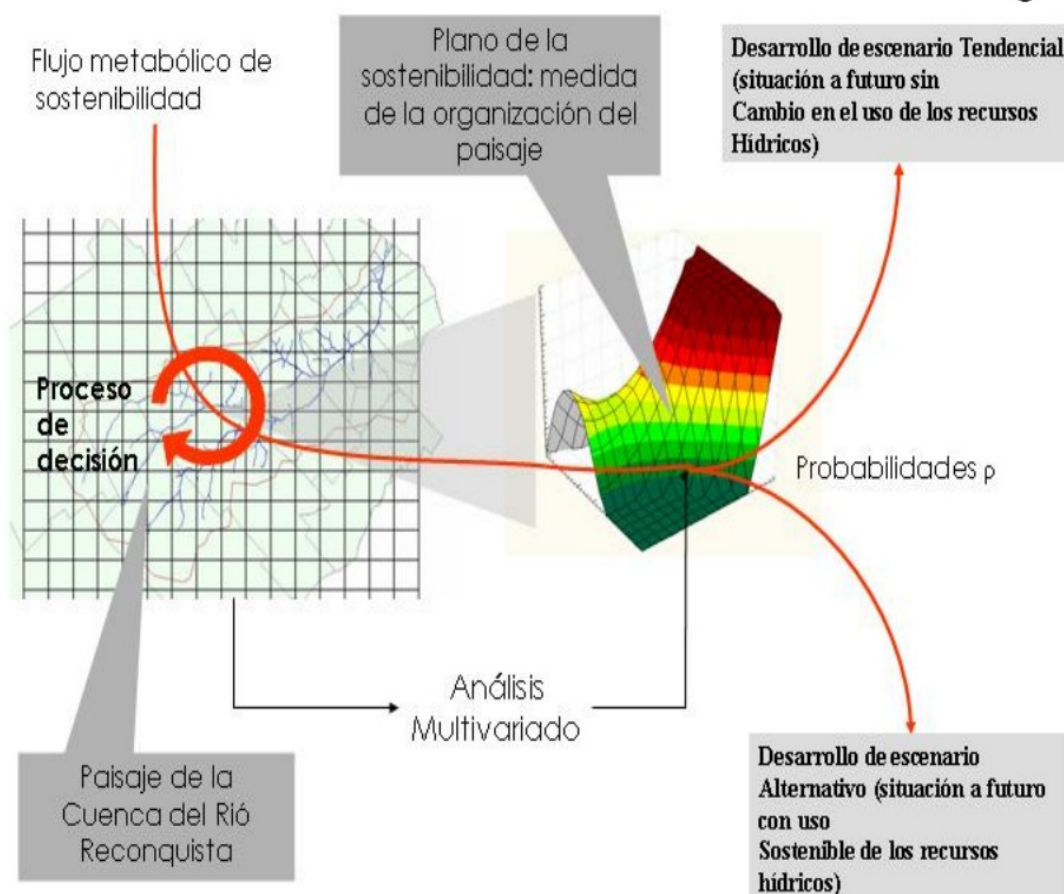


Figura 6. En el interior de la cuenca se produce la emergencia de la intersostenibilidad entre elementos del paisaje, influidos por situaciones externas. La resultante no es una fotografía sino un universo de probabilidades que se pueden resumir en dos escenarios.

5 Conclusiones

El enfoque tradicional al hablar de la sostenibilidad, considerando aspectos sociales, económicos y ecológicos resulta insuficiente cuando se quiere relacionar distintos “actores” como son las empresas, las ciudades, los ecosistemas naturales y las sociedades. Esto es así porque la sostenibilidad significa diferentes cosas para cada uno de ellos. Un enfoque sistémico también puede resultar inadecuado sinó incluye aspectos metabólicos. El desarrollo de una teoría que parte de considerar la modelización de un elemento de sostenibilidad que puede ser universal, es el primer paso para establecer un lenguaje común tanto jerárquicamente como geográficamente.

Referencias bibliográficas

- Allen, A. (1996). Paradigmas ambientales. Sustentabilidad ecológica. Modelos e indicadores. Asignatura Ecología Urbana. Módulo de apoyo a la Unidad 3. Instituto del Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento, San Miguel
- Azar, C.; Holmberg, J.; Lindgren, K. (1996). "Socio-ecological indicators for sustainability. Methodological and ideological options", *Ecological Economics.*, 18, p. 89-112
- Bailey, R.G. (1996). *Ecosystem Geography*, Springer-Verlag
- Balocco, C.; Grazzini, G. (2000). "Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban areas", *Solar Energy.*, 69(4), p. 351-356
- Bettini, V. (1998). "Lo que no es ecología urbana", en Bettini, V. (ed.). *Elementos de ecología urbana*. Editorial Trotta, Madrid, p. 55-76
- Campbell, C.L.; Heck, W.W. (1997). "An ecological perspective on sustainable development", en Muschett, F.D. (ed.). *Principles of Sustainable Development*, DSt Lucie Press, Florida
- Di Pace, M. (2004). "Ecología Urbana", en Di Pace, M. (dir.); Caride Bartrons, H. (ed.). *Ecología de la Ciudad*, Universidad Nacional de General Sarmiento y Prometeo Libros, Buenos Aires, p. 25-34
- Di Pace, M.; Crojethovich, A. (1999). La sustentabilidad ecológica en la gestión de residuos sólidos urbanos. Indicadores para la Región Metropolitana de Buenos Aires. Colección Investigación. Instituto del Conurbano. Universidad Nacional de General Sarmiento, San Miguel
- Di Pace, M.; Crojethovich Martín, A. (2004). "La sostenibilità nella gestione dei residui solidi urbani. Indicatori per la Regione Metropolitana di Buenos Aires", en Bettini, V. (ed.). *Ecología Urbana L'uomo e la città*. UTET, Torino
- Di Pace, M.; Crojethovich Martin, A.; Herrero, A.C. (2004). "Ecología y ambiente", en Di Pace, M. (dir.); Caride Bartrons, H. (ed.). *Ecología de la Ciudad*, Universidad Nacional de General Sarmiento y Editorial Prometeo, Buenos Aires, p. 35-66
- Douglas, I. (1983). *The Urban Environment*. Edward Arnold Editores, Victoria
- Fernandez Cirelli, A. (comp.). (1998). *Agua, Problemática Regional. Enfoques y perspectivas en el aprovechamiento de recursos hídricos*. EUDEBA, Buenos Aires
- García, R. (1986). "Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos", en Leff, E. (coord.). *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*, Editorial Siglo XXI, México
- Giljum, S.; Hinterberger, F.; Köhn, J. (2001). "On the interrelation of social, economic and ecological systems – Theoretical approaches and policy implications on the feasibility of comprehensive sustainability", en Matthies, M.; Malchow, H.; Kriz, J. (ed.). *Integrative systems approaches to natural and social dynamics*, Springer, Berlin, p. 363-378
- Gleick, P.H. (1998). "Water in crisis: paths to sustainable water use", *Ecological Applications.*, 8(3), p.571-579
- Gleick, P.; Loh, P.; Gomez, S.; Morrison, J. (1995). *California water 2020: a sustainable vision*. Pacific Institute Report, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Oakland, California, USA
- Holdren, J.P.; Daily, G.C.; Ehrlich, P.R. (1995). "The meaning of sustainability: Biogeophysical aspects", en Munasinghe, M.; Shearer, W. (ed.). *Defining and measuring sustainability. The Biogeophysical foundations*. The United Nations University and The World Bank, Washington, D.C

- Hunsaker, C.T.; Levine, D.A. (1995). "Hierarchical approaches to the study of water quality in rivers", *BioScience*, 45(3), p. 193-203
- Jørgensen, S.E.; Patten, B.C.; Straškraba, M. (1992). "Ecosystems emerging: toward an ecology of complex systems in a complex future", *Ecological Modelling*, 62, p. 1-27
- Lélé, S. (2000). *Resilience, Sustainability, and Environmentalism*, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Oakland
- Mitlin, D.; Satterthwaite, D. (1994). *Cities and sustainable development. Background Paper*, Global Forum '94. IIED-London
- Munasinghe, M.; Shearer, W. (1995). "An introduction to the definition and measurement of biogeophysical sustainability", en Munasinghe, M.; Shearer, W. (ed.). *Defining and measuring sustainability. The Biogeophysical foundations*. The United Nations University and The World Bank, Washington, D.C.
- Muschett, F.D. (ed.). (1997). *Principles of Sustainable Development*. DSt Lucie Press, Florida
- National Science Foundation. (2000). *Towards a comprehensive geographical perspective on urban sustainability. Final report of the 1998 NSF Workshop on Urban Sustainability*. Rutgers University
- Schuschny, A.R. (1998). "Estudio del medio ambiente desde las ciencias de la complejidad", en Matteucci, S.D.; Buzai, G.D. (comp.). *Sistemas ambientales complejos : herramientas de análisis espacial*. Colección CEA N° 21, EUDEBA, Buenos Aires
- Suganthi, L.; Samuel, A.A. (2000). "Exergy based supply side energy management for sustainable energy development", *Renewable Energy*, 19, p. 285-290
- Vitousek, P.M.; Ehrlich, P.R.; Ehrlich, A.H.; Matson, P.A. (1986). "Human Appropriation of the Products of Photosynthesis", *Bioscience*, 36, p. 368-373
- Warren, C.E.; Allen, J.; Haefner, J.W. (1979). "Conceptual frameworks and the philosophical foundations of general living systems theory", *Behavioral Science*, 24, p. 296-310
- Wear, D.N.; Turner, M.G.; Naiman, R.J. (1998). "Land cover along an urban - rural gradient: implications for water quality", *Ecological Applications*, 8(3), p. 619-630
- Whitesides, G.M.; Ismagilov, R.F. (1999). "Complexity in chemistry", *Science*, 284, p. 89-92
- World Wildlife Fund. (1993). *Uso sustentable de los recursos naturales: Conceptos, Problemas y Criterios*. Suiza