

FRAMEWORK PARA EL DESARROLLO DE MODELOS SISTÉMICOS BASADOS EN ÍNDICES E INDICADORES CUANTITATIVOS

Dante Barbero, Carlos Discoli.

IIPAC, Instituto de Investigación y Políticas del Ambiente Construido, FAU, UNLP.
Calle 47 N° 162. CC 478 (1900) La Plata.

E-mail: dantebarbero@yahoo.com.ar discoli@rocketmail.com.

Tel/fax +54-0221-4236587/90 interno 254.

RESUMEN: Este trabajo presenta un modelo genérico (framework) que permite representar relaciones de interdependencia en modelos basados en conjuntos de índices e indicadores cuantitativos. La capacidad de ser implementado mediante macros en entornos de SIG (Sistema de Información Geográfica) hace que se puedan visualizar geográficamente los cambios producidos en una variable (índice o indicador) y, al mismo tiempo, observar su efecto en el resto de las variables del modelo.

Palabras claves: Framework – modelo – genérico – sistémico – índices - indicadores.

INTRODUCCIÓN

Cuando se abordan estudios que involucran temas complejos relacionados con el “desarrollo sostenible” o la “calidad de vida” surgen fuertes interrogantes acerca de cuáles son las metodologías válidas para su tratamiento. A partir del análisis del estado del arte se han podido verificar significativos avances en lo que respecta a metodologías válidas para el análisis y la modelización de estos temas (Hersh 2006, Barbero 2008), y se llega a la conclusión de que ambos pueden ser tratados en todas sus dimensiones (básicamente las dimensiones económica, social y ambiental) con 3 metodologías posibles, a saber: optimización multicriterio, dinámica de sistemas y lógica borrosa.

En cuanto al estado del arte de estas 3 metodologías en el marco del “desarrollo sostenible” aparecen trabajos basados en optimización multicriterio (Quaddus y Siddique. 2001), en lógica borrosa (Andriantiatsaholainaina et al. 2004a, Andriantiatsaholainaina y Phillis 2004b, Cornelissen et al. 2001, Ducey et al. 1999, Phillis y Andriantiatsaholainaina 2001) y en dinámica de sistemas (Meadows et al. 1972, Meadows et al. 1992). Un ejemplo de este último es el informe del Club de Roma de 1972. Todos ellos tienen en común el hecho de intentar representar la “realidad” mediante un conjunto de índices e indicadores cuantitativos. Es preciso destacar que cada índice o indicador no es independiente del resto, sino que existen relaciones de interdependencia entre ellos. Como bien señala Jiménez Herrero acerca de la naturaleza interdependiente de la realidad *“necesitamos una visión global integradora que persiga el conocimiento de las partes en relación al todo en evolución; en definitiva, un nuevo concepto de doctrina científica que abarque la compleja realidad que forman, la sociedad y la ecósfera. La ciencia, primero empírica después experimental, pasará ahora a su tercer estadio como integradora o “evolucionista”*.

Interpretar los sistemas humanos interactuando con los sistemas ambientales y los procesos ecológicos y económicos (degradación ambiental y agotamiento de los recursos) en su plena dimensión, precisa de un tratamiento global e integrador. La teoría económica clásica ha mantenido una actitud demasiado “economicista”, materialista y reduccionista. (...) “Una ciencia económica que no abarque y profundice en la realidad de los flujos materiales, energéticos y en las relaciones del mundo viviente, estará evidentemente limitada para responder a los problemas planteados fuera de la lógica cerrada del sistema de mercado, como son los que conciernen al cambio global ambiental y social” (Jiménez Herrero 1997).

Es, por lo tanto, necesario y útil el desarrollo de una herramienta que permita representar modelos sistémicos, es decir, que vinculen las distintas variables que componen un sistema, y que además permita observar geográficamente aquellos índices o indicadores que admitan una representación espacial y como se ven afectados cuando se modifica el valor de otro índice o indicador relacionado. En este sentido, el trabajo propone una metodología genérica para abordar dicha problemática y da respuestas a situaciones similares existentes en la modelización de la calidad de vida urbana (Proyecto CONICET PIP 2009-2011 N° 0606 y Proyecto UNLP 11/U083).

METODOLOGÍA

En el marco de los desarrollos planteados por los proyectos antes mencionados y a partir de los desarrollos expuestos en reuniones anteriores (Discoli et al. 2008) se observó que la actualización de índices e indicadores modelizados en entornos SIG es una tarea que requiere una labor considerable. En general, el cambio o actualización de un dato normalmente requiere volver a calcular otros datos que guardaban cierta relación con el que sufrió el cambio. Este problema es muy evidente, por ejemplo, en aplicaciones catastrales.

Para dar respuesta a esta situación es posible expresar un modelo sistémico basado en índices e indicadores interrelacionados por medio de grafos dirigidos que expresen las relaciones entre ellos como muestra la figura 1.

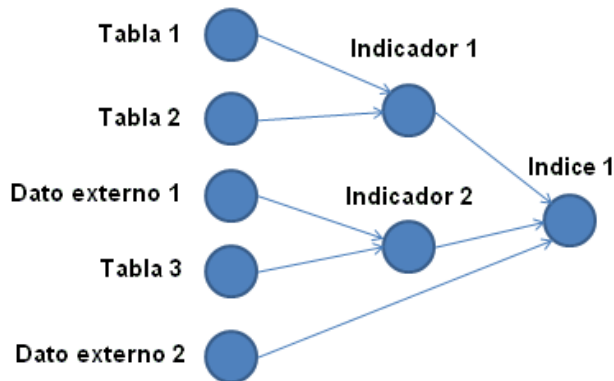


Figura 1. Ejemplo de relaciones en un modelo sistémico.

En el dibujo se observa que el indicador 1 depende de los datos de las tablas 1 y 2, por lo tanto cualquier modificación que sufran cualquiera de estas 2 tablas afectará al indicador 1. El indicador 2, por su parte, depende de un dato externo y de la tabla 3 de modo que si se modificara cualquiera de estos, el indicador 2 debería “enterarse” para actualizarse convenientemente. Por último el índice 1, depende de 2 indicadores que deben calcularse previamente, los indicadores 1 y 2, y del dato externo 2.

De este modo puede observarse fácilmente que, por ejemplo, un cambio del dato externo 1 no tiene incidencia sobre el indicador 1, pero sí lo tiene para el indicador 2 y, en consecuencia, también con el índice 1.

La idea básica para resolver este tipo de problemas es que aquel índice o indicador que cambia de valor “avise” al resto de las variables relacionadas de manera directa o indirecta para que vuelvan a recalcularse.

El resultado que se obtiene es un modelo sistémico, que ante la modificación de cualquiera de sus elementos, el resto del sistema se modifica de manera consistente, una vez que el o los objetos modificados informen al resto del sistema que cambiaron.

A continuación se muestra un ejemplo donde se tienen 2 layers o capas en un SIG: una capa corresponde a las manzanas de una ciudad y la otra a escuelas. Supongamos que existe un indicador que calcula el porcentaje de manzanas que se encuentran a una distancia de 300 metros o menos de una escuela cuya visualización puede observarse en la figura 2 en el mapa de la izquierda. Si se agregara una nueva escuela se visualiza su nueva localización y la cantidad de manzanas que tiene esa nueva escuela como área de influencia debería recalcularse produciendo el resultado de la figura 2 a la derecha.

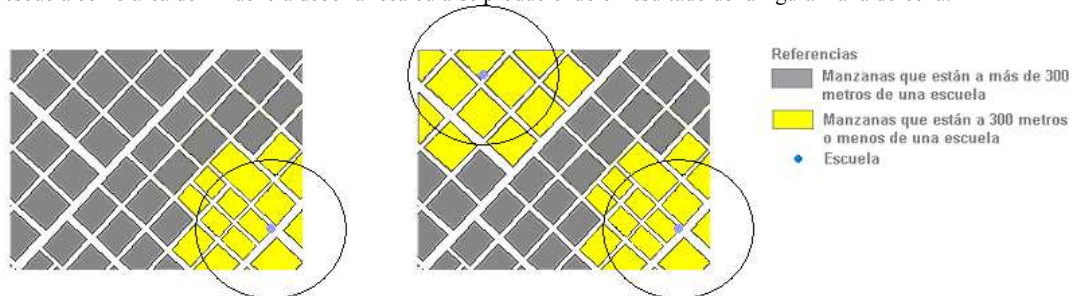


Figura 2. Actualización del área de influencia de escuelas a partir de la incorporación de una nueva escuela.

El ejemplo citado se corresponde con el modelo de la figura 3. Para calcular un área de influencia, como en el presente caso, los SIG trabajan con 2 archivos o layers. En un primer paso se selecciona del layer de escuelas, aquellos establecimientos cuyo radio de influencia nos interesa calcular para luego consultar que objetos del layer manzanas se encuentran a menos de cierta distancia de las escuelas que fueron previamente seleccionadas. El hecho de agregar una nueva escuela hace que aumente la cobertura (el número de manzanas respecto del total) que tienen una escuela a 300 metros o menos (figura 2 a la derecha).

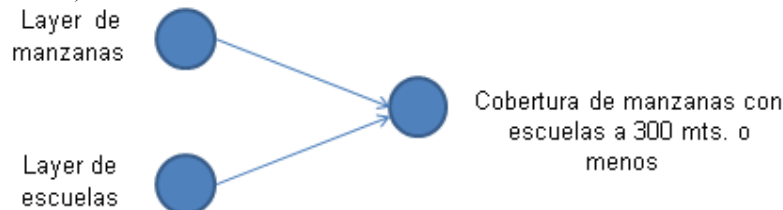


Figura 3. Relaciones entre los distintos layers involucrados.

Es evidente que la idea expresada en el ejemplo anterior podría utilizarse de la manera tradicional en ese caso, pero no siempre es así. Veamos el ejemplo que se presenta en la figura 4 que bien podría representar la dinámica poblacional entre diferentes zonas de una región. Se observa que los habitantes de la región A dependen del número que permanezcan en su región sumados a los que llegan procedentes de C menos los que emigraron hacia B. La situación de B y C es similar, excepto que cambian las regiones de donde llegan los habitantes y hacia donde se van.

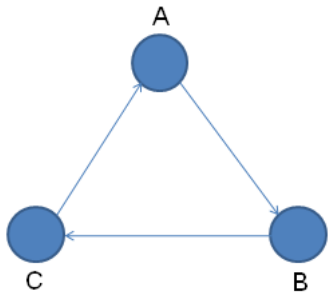


Figura 4. Otro ejemplo de posibles relaciones entre elementos de un modelo sistémico.

Aquí se observa que si el índice A sufre un cambio, deberá notificar de ello a B. Lo mismo debería hacer B con C y C con A. Se tiene entonces un modelo sistémico cuyas variables y sus interdependencias se muestra en la figura 5.

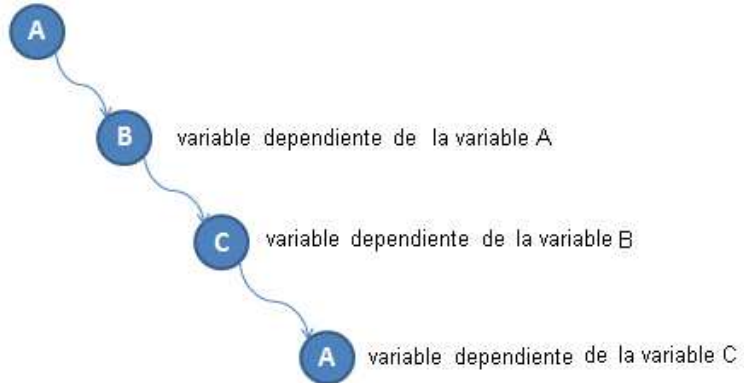


Figura 5. Dependencias entre las distintas variables de la figura 5.

Supóngase que se produce un cambio en la variable A. Esto produce que se notifique a la variable B. Luego B hará lo propio con C y C con A formando un ciclo que nunca termina de actualizarse. Esto constituye un grave problema dado que existe gran cantidad de ejemplos en los que la relación entre diferentes indicadores puede generar un grafo dirigido con ciclos. Por ejemplo, los ciclos biogeoquímicos que ocurren en la naturaleza cumplirían esta propiedad (ej.: el ciclo del carbono). Es por tanto necesario adoptar otra estrategia que permita trabajar con índices e indicadores interrelacionados de cualquier complejidad sin importar si entre ellos existe alguna referencia circular. Para abordar dichas situaciones se plantea a continuación un framework para el manejo complejo de las dependencias que permite resolver este inconveniente. El mismo ha sido diseñado usando técnicas de la programación orientada a objetos tales como la combinación de diferentes patrones de diseño, el uso del mecanismo de herencia y el polimorfismo.

FRAMEWORK PARA EL DESARROLLO DE MODELOS SISTÉMICOS BASADOS EN EL USO DE ÍNDICES E INDICADORES CUANTITATIVOS

Del ejemplo presentado en la figura 5 se deduce que es necesario que la solución a adoptar permita representar incluso dependencias circulares (loops) manteniendo la consistencia de los valores de las variables ante el cambio en el valor de alguna de ellas. Por lo tanto, el mecanismo de manejo de las dependencias y su actualización es de vital importancia; ya que de él depende el funcionamiento del modelo sistémico. La idea es que cada vez que ocurre un cambio en un índice o indicador, se verifican quienes están relacionados de manera directa o indirecta y se los actualiza convenientemente. Este proceso se realiza en 2 pasos:

- 1) Para cada objeto relacionado directamente o indirectamente con el que acaba de sufrir un cambio (excepto el que cambió) se calcula el nuevo valor que debería tomar y se almacena en una variable auxiliar.
- 2) Una vez que todos los objetos relacionados anteriores han terminado el paso 1) se actualiza el valor de la variable con el que se encuentra almacenado en la variable auxiliar.

Este proceso de 2 pasos es una adaptación del método stepSynchronously: presentado en el framework CORMAS¹ del trabajo desarrollado por el CIRAD (CIRAD 2003, pag.7).

¹ Desarrollado por el CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). URL: <http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>

Además del mecanismo de actualización anterior, el framework combina diferentes patrones de diseño (figura 6) como “Composite”, “Interpreter” y “Strategy” cuya coexistencia permite el manejo y la actualización consistente de las variables involucradas del modelo sistémico que se pretenda representar.

El patrón “Composite” ha sido usado para especificar índices e indicadores, donde los índices se componen de una expresión matemática que involucra el valor de más de un indicador (eventualmente pueden haber también otros índices). Dicho patrón define una estructura común para manejar de manera uniforme las operaciones comunes a índices e indicadores.

El framework emplea el patrón “Interpreter” para el reconocimiento de expresiones algebraicas válidas en las fórmulas de los índices. La idea de este patrón es bien conocida por los desarrolladores de software orientado a objetos. En este caso se divide la expresión en partes más simples hasta llegar a valores concretos para luego ir recombinándose las diferentes partes para dar como resultado el valor correspondiente a la expresión completa.

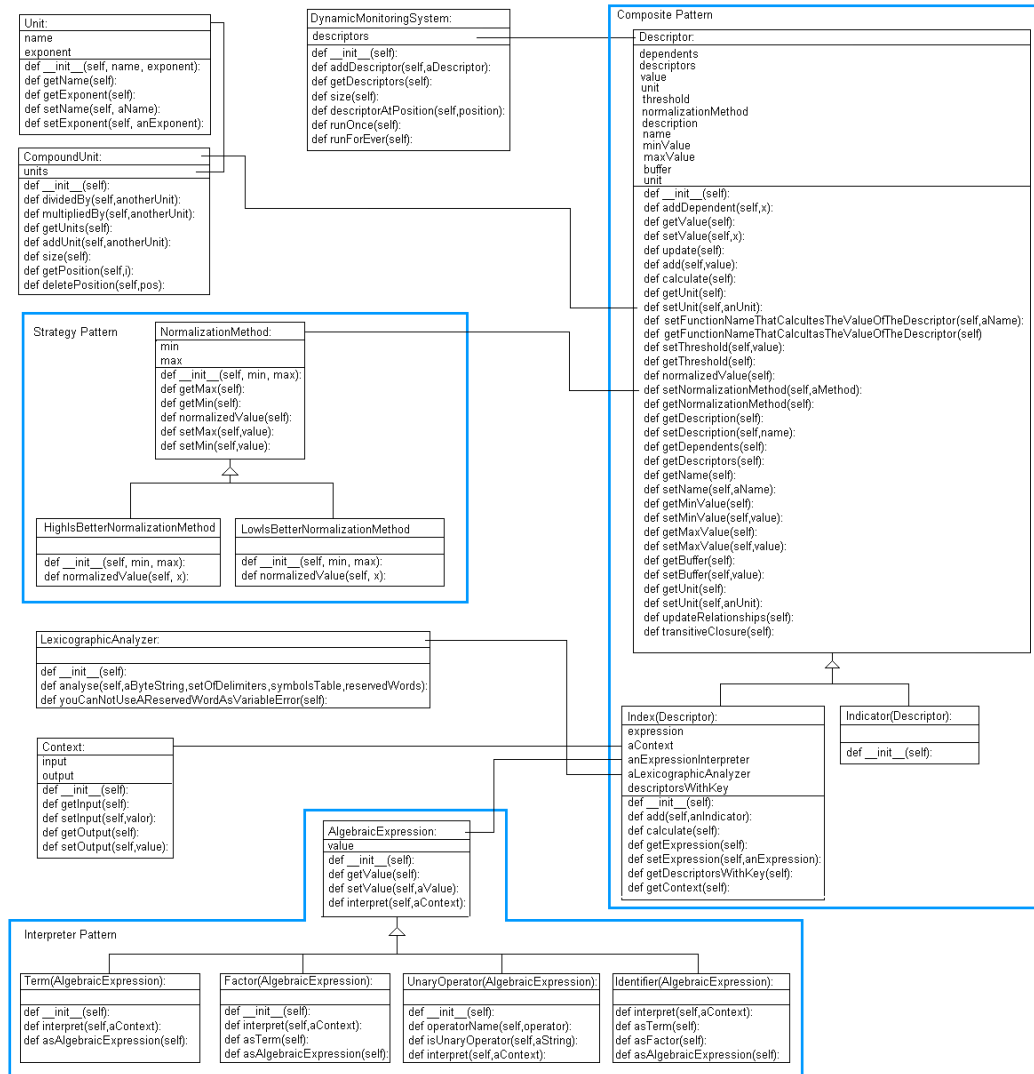


Figura 6. Framework para el desarrollo de modelos sistémicos basados en índices e indicadores cuantitativos.

El patrón “Strategy” se ha usado para poder setear el método de normalización que corresponda dado que existen 2 fórmulas posibles: a) a mayor valor tomado por el índice o indicador significa una situación mejor y b) a mayor valor tomado por el índice o indicador significa una peor situación.

El framework queda finalmente estructurado como se muestra en la figura 6, donde se sintetizan los patrones de diseño utilizados y su interacción. A los efectos de mostrar su lógica de aplicación se desarrolla a continuación un ejemplo mostrando los valores tomados por las diferentes variables en función del tiempo.

EJEMPLO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

Supongamos que 3 áreas urbanas (A, B y C) cuentan inicialmente con 10000, 20000 y 30000 habitantes respectivamente. Supongamos que en un mismo intervalo de tiempo, el 5% de la población de A va hacia B, el 6% de B va hacia C y el 7% de C se dirige hacia A.

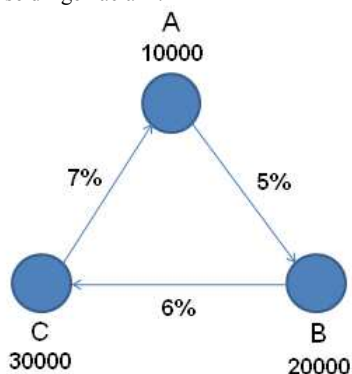


Figura 7. Ejemplo de modelo sistémico.

La relación propuesta entre las variables se observa en la figura 7. La dinámica que se tiene en consecuencia es entonces que el valor de A depende del valor de C, el cual a su vez depende de B quien al mismo tiempo depende de A. Es decir, todas las variables están relacionadas directa o indirectamente. Cada variable obtiene su valor en base a las siguientes expresiones:

$$1) \quad A = \lfloor A + C \cdot 0.07 - A \cdot 0.05 \rfloor$$

$$2) \quad B = \lfloor B + A \cdot 0.05 - B \cdot 0.06 \rfloor$$

$$3) \quad C = \lfloor C + B \cdot 0.06 - C \cdot 0.07 \rfloor$$

donde $\lfloor x \rfloor$ es la función piso (también llamada parte entera o floor)

En estos casos, al tratarse de variables enteras (personas) se ha adoptado el mecanismo de redondeo usando la función parte entera lo cual genera que en cada iteración, en la que se realizan las 3 operaciones enumeradas, se van reduciendo al entero más cercano el valor de aquellas variables (A, B o C) que no tengan un valor entero. Cabe aclarar que si se utiliza la función parte entera y se analizaran los habitantes totales (A+B+C) no se obtendría siempre el valor total (60000) debido a que la función parte entera va “eliminando” los restos decimales de los valores de A, B y C. En el caso de variables que admitan números reales no es necesario aplicar la función parte entera.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los resultados que se obtendrían serían los que se observan en la figura 8. Obsérvese que si se calcula la fórmula 1), que dará como resultado 11600 la primera vez, produce un cambio en la propia variable A y todavía ni B ni C calcularon su valor. Esto es un problema puesto que, el valor que “leerán” B y C cuando deban calcularse no será 10000 que es el valor que deberían leer. Esto pone en evidencia la necesidad de contar con un mecanismo, como el implementado en la figura 6, que pueda realizar dicha tarea manteniendo la consistencia en los valores de las distintas variables (índices e indicadores) que componen el sistema.

Se muestra a continuación los resultados obtenidos al aplicar el framework al ejemplo de la figura 7. El valor que toman las variables a través del tiempo se observa en la figura 8.

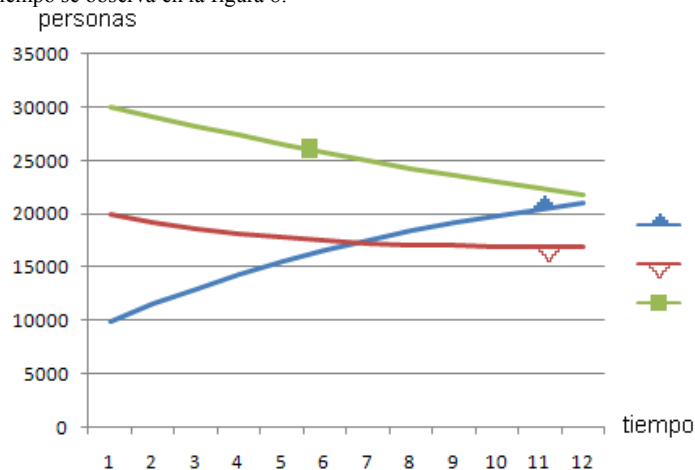


Figura 8. Evolución de los valores de los habitantes de las distintas ciudades en función del tiempo.

CONCLUSIONES

El framework desarrollado permitió representar relaciones de interdependencia en modelos basados en conjuntos de índices e indicadores cuantitativos. Su aplicación a un ejemplo sencillo aunque altamente sistémico (todas sus variables están relacionadas de manera directa o indirecta con el resto de las variables) ha demostrado su viabilidad para mantener la consistencia en los valores tomados por índices e indicadores bajo tales circunstancias.

La capacidad de ser implementado mediante macros en entornos de SIG hace que se puedan visualizar geográficamente los cambios producidos en una variable (índice o indicador) y, al mismo tiempo, observar su efecto en el resto de las variables del modelo.

En consecuencia, estos desarrollos incorporados a los modelos que abordan problemáticas asociadas al “desarrollo sustentable” o la “calidad de vida”, pueden resolver los problemas de interdependencia de los índices e indicadores que intentan describir las dimensiones económica, social y ambiental de la región bajo estudio. Para aquellos índices o indicadores que admitan una representación territorial, la implementación del framework en entorno SIG hace que sea posible visualizar los impactos producidos a partir de las modificaciones en los valores de los índices o indicadores. Por lo tanto, la solución presentada en este trabajo es una alternativa viable para dar respuesta a esos problemas.

REFERENCIAS

- Andriantiatsaholainaina, L. A. Kouikoglou, V. S. Phillis, Y. A. Evaluating strategies for sustainable development: fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis. *Ecological Economics* 48, 149-172. 2004a.
- Andriantiatsaholainaina, L. A. Phillis, Y. A. “S.A.F.E: Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation”. European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE). 2004b.
- Barbero, D. Modelo sistémico para el manejo con SIG de indicadores de calidad de vida. Tesis doctoral. Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata (2008)
- CIRAD. “Cormas tutorial 1”. 2003. Web-site: <http://cormas.cirad.fr/pdf/CormasTutorial1.pdf>. Accessed: June 16, 2006.
- Cornelissen, A. M. G. van den Berg, J. Kooops, W. J. Grossman, M. Udo, H. M. J. “Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory”. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86 (2001) 173-185.
- Discoli, C. Martini, I. San Juan, G. Rosenfeld, E. Dicroce, L. Ferreyro, C. “Modelo de calidad de vida urbana. Contrastes urbanos a partir de los niveles de calidad de los servicios energéticos principales y de los aspectos ambientales”. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, Vol. 12. ISSN, pp 0.1-37-0.1.43. 2008.
- Ducey, M. J. Larson, B. C. A fuzzy set approach to the problem of sustainability. *Forest Ecology and Management* 115, pp. 29-40 (1999)
- Hersh, Marion. “Mathematical Modelling for Sustainable Development”. Springer. 2006.
- Jiménez Herrero, Luis M. “Desarrollo sostenible y economía ecológica”. Editorial Síntesis (1997)
- Meadows, Donella H. Meadows, Dennis L. Randers, Jørgen. “Más allá de los límites del crecimiento”. Ed. El País-Aguilar (1992)
- Meadows, D. H. Meadows, D. L. Randers, J. Behrens III, W. W. Los límites del crecimiento. Fondo de Cultura Económica, México. 1972.
- Phillis, Y. A. Andriantiatsaholainaina, L. A. Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics* 37, pp. 435-456 (2001)
- Quaddus, M. A. Siddique, M. A. B. Modelling sustainable development planning: A multicriteria decision conferencing approach. *Environmental International* 27, pp. 89-95. (2001)

ABSTRACT

This paper presents a general-purpose model (a framework) that allows to represent inter-dependence relationships in models based on a set of quantitative index and indicators. The possibility of being implemented by macros in a GIS (Geographic Information System) environment allows to show in a geographic way, the changes made in a variable (an index or indicator) and simultaneously to observe the effect produced by this change in the others system variables.

Keywords: Framework – generic - model – systemic – indexes - indicators.