

# EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS CON LÓGICA BORROSA

Raúl Martín<sup>1</sup>, Raquel Caro<sup>2</sup>, Luis Garmendia<sup>3</sup>, Alfonso Garmendia<sup>4</sup>

<sup>1</sup> [raul.martin@estumail.ucm.es](mailto:raul.martin@estumail.ucm.es)

<sup>2</sup> [rcaro@doi.icaei.upcomillas.es](mailto:rcaro@doi.icaei.upcomillas.es)

<sup>3</sup> [lgarmend@fdi.ucm.es](mailto:lgarmend@fdi.ucm.es)

<sup>4</sup> [algarsal@upvnet.upv.es](mailto:algarsal@upvnet.upv.es)

## Resumen

La sostenibilidad constituye un criterio esencial para evaluar la calidad de un proyecto. En este sentido este trabajo presenta el desarrollo de una metodología y un programa para la evaluación de la sostenibilidad social, económica y medioambiental de proyectos para llegar a conseguir una evaluación global de sostenibilidad de dichos proyectos. Tradicionalmente los estudios y evaluación de proyectos se realizan solo desde el punto de vista económico. Se aplica la lógica borrosa a cada uno de los cálculos que se realizan en el análisis global de la sostenibilidad: valoración de indicadores, la evaluación cuantitativa y cualitativa del impacto que produce un proyecto en los diferentes factores medioambientales, sociales y económicos. Cabe destacar que dependiendo del tipo de proyecto se tendrá un peso de cada indicador y de cada factor distinto. Se ha tomado como base la normativa existente para la Evaluación de Impacto Ambiental

**Palabras Clave:** Impacto ambiental, lógica borrosa, soft computing, sostenibilidad medioambiental, sostenibilidad social, sostenibilidad económica

## 1 INTRODUCCIÓN: SOSTENIBILIDAD Y LÓGICA BORROSA

El problema del cambio climático y la necesidad de conseguir un desarrollo sostenible, están produciendo un cambio de paradigma no solo social, con la creciente concienciación ciudadana respecto a la problemática

medioambiental, sino también económico e incluso empresarial.

Tradicionalmente los estudios y evaluación de proyectos se realizan solo desde el punto de vista económico [9, 10], sin embargo, esto en la actualidad ya no es suficiente [3, 6]. Resulta de vital importancia también evaluar en qué medida el proyecto en cuestión, además de reportar un crecimiento económico, es capaz de representar un impacto social favorable y de no impactar de manera agresiva o desfavorable sobre los recursos del medio ambiente que emplea, lo que en otras palabras se resume en como evaluar si el proyecto es o no sostenible [1, 11].

Por tanto, la sostenibilidad de un proyecto constituye un criterio esencial para evaluar su calidad. Solo aquellos proyectos que introduzcan cambios equitativos y aborden de forma duradera las causas de la vulnerabilidad estructural contribuirán a generar sistemas de sustento sostenibles y un desarrollo humano también sostenible. Para lograrla es preciso que las instituciones públicas, la comunidad o las familias destinatarias se impliquen y asuman la responsabilidad en el mantenimiento o gestión de las infraestructuras y bienes creados (que los bosques sean conservados, los sistemas de irrigación mantenidos, las carreteras reparadas, etc.).

La evaluación de la sostenibilidad de un proyecto se realiza a partir del impacto que se produce o se puede producir no sólo en el ámbito económico, sino también en lo social y en lo medioambiental [8].

Es difícil decidir en la evaluación de un proyecto si éste es o no sostenible de manera absoluta. Además, para hacer dicha evaluación, se parten de unos indicadores que permiten dar un valor al impacto producido en los factores sociales, económicos y medioambientales. Todas estas valoraciones no siempre tienen valores concretos, de ahí que la inclusión de la lógica borrosa en la sostenibilidad del proyecto sea tan apropiada y sea el elemento principal de nuestro estudio.

Hemos desarrollado un sistema en Java, y hemos utilizado la herramienta XFuzzy 3.0 para el diseño inicial de los conjuntos borrosos y para la implementación del motor de inferencia con reglas [5]. Debido a la gran cantidad de combinaciones posibles en algunas de las reglas, se ha tenido que realizar un desarrollo propio de generación de reglas y almacenarlas en ficheros de librerías para no saturar el sistema.

En el primer apartado es una introducción de porqué aplicar la lógica borrosa a la sostenibilidad. En la siguiente sección hacemos una introducción a la sostenibilidad y la evaluación de proyectos. El punto tres habla de los conjuntos borrosos que cubren las variables lingüísticas del sistema. El apartado cuarto explicamos que operadores, reglas y métodos de defuzzyficación utilizamos en el estudio. En el quinto se muestran ejemplos realizados y su comparación. Luego comentamos las conclusiones obtenidas durante este estudio y terminamos con los agradecimientos y la bibliografía.

## 2 EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

Hasta ahora, la evaluación de la sostenibilidad de un proyecto se realiza basándose en la evaluación de impacto ambiental, mediante métodos poco automatizados y en muchos casos, hasta manuales. La metodología más utilizada es la matriz de Leopold: se basa en una matriz donde en las columnas hay 100 acciones y en las filas 88 factores ambientales. Los cruces son efectos ambientales o posibles impactos. Las cuadrículas del cruce que presenten impactos significativos se dividen con una diagonal marcando en la parte superior la magnitud del impacto, valorada entre 0 y 10, y en la inferior la importancia también en una escala de 0 a 10. Sumando por filas, se obtiene el impacto producido sobre un determinado factor ambiental, y sumando por columnas el impacto producido por una cierta acción. Aunque para la evaluación de impacto ambiental si existe bibliografía al respecto, no hemos encontrado método informático estándar que evalúe la sostenibilidad de un proyecto. Nosotros lo hemos resuelto con lógico borrosa.

En la solución que aportamos, para ver si un proyecto es sostenible, primero hay que evaluar la sostenibilidad social, económica y medioambiental del proyecto, y con estos tres resultados, se determina la sostenibilidad global.

En la Evaluación de Impacto Ambiental [2] se definen las acciones que produce el proyecto, los factores a los que afectan y que indicadores los representan, para que el usuario pueda realizar la evaluación del impacto producido por estas acciones. De esta manera, el usuario asigna valores a los indicadores para la valoración cualitativa y cuantitativa, y con ambas, se evalúa el impacto producido en un factor medioambiental, social o económico.

El cálculo de la evaluación de cualquiera de los tres ámbitos se realiza de la misma forma, tomando como base la

normativa existente para la Evaluación de Impacto Ambiental: primero hemos obtenido los diferentes factores sociales, medioambientales y económicos sobre los que puede afectar un proyecto. El usuario puede asignar un peso a los factores y a los indicadores que afectan a cada uno de ellos según el tipo de proyecto. Una vez identificado el proyecto e indicado el tipo, se habilitarán los efectos que son potencialmente víctimas de impacto. Dentro de cada efecto, el usuario debe asignar los valores a los diferentes indicadores según el daño o beneficio causado para evaluar la magnitud. El siguiente paso es evaluar la importancia, a partir de sus propiedades (extensión, recuperabilidad, signo, periodicidad, reversibilidad, momento, acumulación, intensidad, persistencia y efecto).

Con la importancia y la magnitud, se obtiene el impacto producido en cada uno de los factores de cada ámbito. Con estas valoraciones de los impactos, se obtiene la sostenibilidad por ámbitos, sostenibilidad social, económica y medioambiental, y a partir de estos tres datos, la sostenibilidad global del proyecto, pudiendo ver de manera sencilla, los puntos débiles de los proyectos.

Como hemos comentado, nuestro sistema ofrece la posibilidad de definir los indicadores para las dos valoraciones (cualitativa y cuantitativa). Dependiendo del tipo de proyecto, pueden utilizarse unos indicadores u otros, pudiendo indicar a su vez al usuario el peso con el que afecta un factor a un tipo de proyecto, y el peso con el que afecta un indicador al mismo.

Con el fin de construir una herramienta válida para cualquier tipo de proyecto, existe un apartado de configuración en el que el usuario puede definir que indicadores usar y asociarlos a los diferentes factores del ámbito social, económico y medioambiental. Además, para cada tipo de proyecto, se puede indicar el peso de cada indicador y de cada factor, pues no se deben tener en cuenta en la misma medida los mismos indicadores y factores para la construcción de un puente sobre un río, que para la construcción de una fábrica de cerveza en un polígono industrial a 200 metros del núcleo urbano.

En el sistema que hemos desarrollado, hemos aplicado la lógica borrosa también a la evaluación de la magnitud (valoración cuantitativa), de tal forma que existan conjuntos borrosos para los indicadores y para que el cálculo de la magnitud sea una relación borrosa entre todos los indicadores de un factor [4]. Si un usuario añade un nuevo indicador, el sistema lo incorpora, creando conjuntos borrosos para las etiquetas lingüísticas que lo caracterizan y mostrándoselos al usuario para que éste pueda realizar una valoración dentro de la lógica borrosa, quedando resuelto el problema de la ambigüedad y falta de cotas en la valoración de los indicadores. El cálculo de la magnitud del impacto (evaluación cuantitativa) se realiza igualmente con una operación borrosa entre los conjuntos borrosos de los indicadores. Dependiendo del número de indicadores, que puede ser diferente de un tipo de proyecto a otro (puentes, túneles, centros comerciales...), se aplican unas

reglas u otras, variando incluso la manera de aplicar dichas reglas, pudiendo agrupar los indicadores y obteniendo el resultado en forma de árbol.

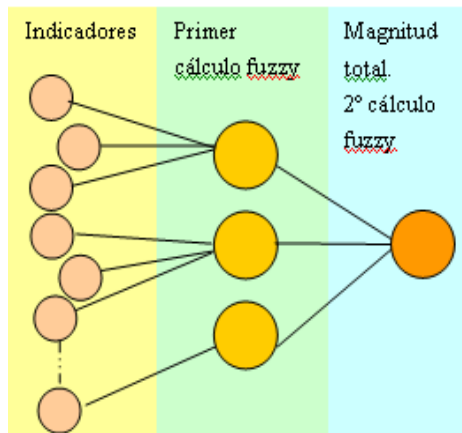


Figura 2.1: Cálculo de la magnitud del impacto en un factor

Para la evaluación cualitativa (importancia) de un impacto sobre un factor, nos hemos basado en la Evaluación de Impacto Ambiental, valorando las propiedades definidas en la Ley [9, 10] (extensión, recuperabilidad, signo, periodicidad, reversibilidad, momento, acumulación, intensidad, persistencia y efecto), de las cuales todas menos el signo son variables lingüísticas. El signo se utiliza para darle sentido positivo o negativo a los valores. Además de estos valores, en este trabajo hemos incorporado otras variables lingüísticas a tener en cuenta: espacios nacionales protegidos, patrimonio cultural, superación de niveles críticos de indicadores que catalogan el proyecto directamente como “No Sostenible”.

El resultado de la sostenibilidad se muestra con los términos lingüísticos: compatible, moderado, severo y crítico, dando como resultado un informe, que se puede descargar en formato PDF. En dicho informe se muestran las diferencias de usar unos operadores u otros. El sistema permite utilizar varios tipos de operadores, los diferentes tipos de implicación (S-implicación, residuada y QM-implicación), y método de defuzzyficación, para poder comparar unos resultados con otros, convirtiendo esta herramienta, no sólo en una herramienta útil para la evaluación de proyectos, sino en una herramienta potente para estudio de la lógica borrosa. En cada una de las entradas, se representa gráficamente el grado de pertenencia de cada entrada a los conjuntos borrosos.

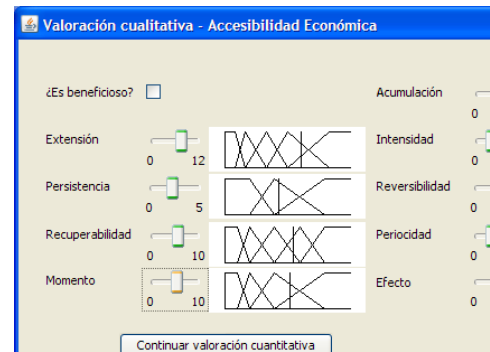


Figura 2.2: Fragmento de pantalla de la aplicación en la parte en que se ve el grado de pertenencia de cada valor a los conjuntos borrosos definidos en el sistema

### 3 CONJUNTOS BORROSOS

Hemos realizado un estudio para conseguir la evaluación de la sostenibilidad de proyectos aplicando la lógica borrosa, pudiendo utilizar datos no concretos y subjetivos. En el sistema que hemos implementado se realizan varios cálculos borrosos en diferentes puntos de la evaluación:

Cálculo de importancia (valoración cualitativa), cálculo de magnitud (valoración cuantitativa), impacto (a partir de la importancia y magnitud, impacto en un factor), sostenibilidad parcial (social, económica y medioambiente) y sostenibilidad global. Existen puntos donde el cálculo con una sola operación difusa es muy pesado para nuestros sistemas, por lo que aplicando técnicas de descomposición y reducción en problemas más sencillos, se dividen las entradas realizando cálculos parciales y, a partir de ahí, se hacen los cálculos combinando los resultados, y siempre aplicando reglas difusas.

Se definen conjuntos borrosos sobre los indicadores, su magnitud y su importancia. Hacemos una descripción de algunos de estos cálculos y mostramos sus conjuntos borrosos.

En la operación de cálculo de la magnitud, cada indicador se mide con los conjuntos borrosos definidos en la Figura 3.1 y el resultado nos da el valor de la magnitud, que será entrada de la siguiente operación “cálculo de impacto en un factor”.

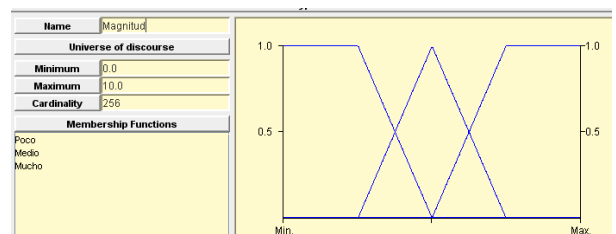


Figura 3.1: Conjuntos borrosos para los términos lingüísticos son "Poco", "Medio" y "Mucho" de un indicador.

En la operación que evalúa el impacto producido por las acciones del proyecto en un factor, intervienen como entrada la magnitud y la importancia. Esta se calcula a partir de sus parámetros (signo, momento, extensión, efecto, persistencia, recuperabilidad, reversibilidad, extensión, acumulación y periodicidad), cada uno con sus conjuntos borrosos, y obteniendo la importancia. Con la importancia y la magnitud, se obtiene el impacto producido en dicho factor.

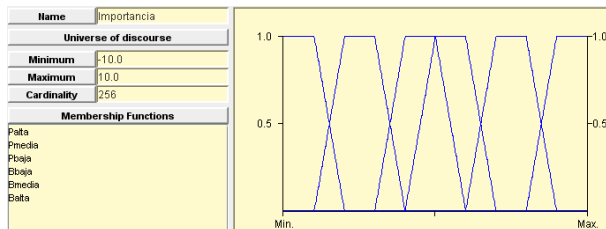


Figura 3.2: Conjuntos borrosos de la variable lingüística Impacto. Los términos lingüísticos son "Palta" (perjuicio alto), "Pmedia", "Pbaja", "Bbaja" (Beneficio alto), "Bmedia" y "Balta". Con el fin de utilizar la variable "signo" y usarlo como constante multiplicativa (-1, +1), el número de conjuntos borrosos es no impar y el valoración media es ambigua, ya que es BBaja(0.0) y PBaja (-0.001).

Una vez que se ha calculado el impacto, el sistema realiza la siguiente operación, que consiste en el cálculo de la sostenibilidad parcial a partir del impacto en cada uno de los factores. Así, se podrá calcular la sostenibilidad social a partir de los impactos producidos en cada uno de los factores sociales. Lo mismo en el ámbito del medio ambiente y del ámbito económico.

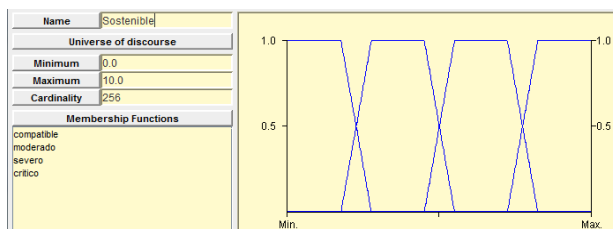


Figura 3.3: Conjuntos borrosos de la variable lingüística Sostenibilidad para evaluar si es "Compatible", "Moderado", "Severo" y "Crítico". Son las cuatro posibles respuestas a si un proyecto es sostenible

## 4 OPERADORES, REGLAS Y DEFUZZYFICACIÓN

### 4.1. OPERADORES Y DEFUZZYFICACIÓN

Para definir la intersección y unión de conjuntos borrosos (las premisas de las reglas son conjunciones de varios conjuntos borrosos), se utilizan las t-normas y t-

conormas, cuyos estudios habían sido realizados por Karl Menger [7] en "Statistical Metrics", y posteriormente axiomatizadas por B. Schweizer y A. Sklar [12].

Los operadores utilizados por Zadeh [14] para definir la intersección de conjuntos borrosos son el mínimo y el producto. Nosotros hemos incluido el operador de Lukasiewicz por satisfacer propiedades algebraicas diferentes.

El usuario selecciona que operadores utilizar en la evaluación. Además, en el informe de resultado se muestra una comparación de los resultados obtenidos en las operaciones de cálculo de importancia e impacto con los diferentes operadores.

Para las implicaciones también utilizamos distintos operadores. En la aplicación se puede escoger entre operadores de implicación residual de t-normas, S-implicaciones y QM-implicaciones [13].

Desde la aplicación, también se pueden seleccionar el método de defuzzyficación que se utiliza en nuestro sistema. Gracias a la defuzzyficación, podemos, a partir del conjunto borroso que representa el resultado, obtener un valor nítido y dar un valor a cada resultado de cada operación borrosa. Los métodos de defuzzyficación que hemos utilizado son: centro de masas, medio de los máximos, primer máximo y último máximo

### 4.2. REGLAS DE INFERENCIA

El motor de inferencia de nuestro sistema se basa en un conjunto de reglas de inferencia borrosa. La definición de las reglas del motor de inferencia se implementan utilizando la herramienta XFuzzy. En este paso, nos hemos encontrado con el problema del gran número de reglas en algunas operaciones debido al uso de muchos conjuntos borrosos para una variable lingüística o por el número de variables utilizadas en las premisas. Para solventar este problema, hemos hecho tres pasos: primero hemos creado una herramienta para crear todas las reglas y guardarlas en un archivo; el segundo paso es modificar el resultado obtenido de XFuzzy y adaptarlo para que lea las reglas del fichero, y el tercer paso es la técnica descomposición de tamaño, en la que hemos dividido los cálculos para combinarlos hasta llegar a un resultado final.

En este trabajo hemos desarrollado un mecanismo automático por el que según el número de indicadores que están habilitados por cada tipo de proyecto, se generan las reglas automáticamente. El mecanismo consiste en, si son menos de 5 indicadores, se generan reglas para resolver estas operaciones con lógica borrosa. Si son mayores que cinco, simplificamos en cálculos de menor tamaño. En la Figura 4.1 mostramos un ejemplo de reglas.

```
if(acumulacion == Simple & extension == Puntual
& intensidad == Baja & persistencia == Fugaz &
reversibilidad == Largo plazo & recuperabilidad
== Mitigable & periodicidad == Periodico & mo-
```

mento == Critico & efecto == Indirecto terciario) -> valorCualitativo = media;

if(acumulacion == Simple & extension == Puntual & intensidad == Baja & persistencia == Fugaz & reversibilidad == Largo plazo & recuperabilidad == Mitigable & periodicidad == Continuo & momento == Largo plazo & efecto == Directo) -> valorCualitativo = baja;

if(acumulacion == Simple & extension == Puntual & intensidad == Baja & persistencia == Fugaz & reversibilidad == Largo plazo & recuperabilidad == Mitigable & periodicidad == Continuo & momento == Inmediato & efecto == Directo) -> valorCualitativo = baja;

Figura 4.1: Reglas de inferencia para la valoración cualitativa de un impacto en un factor.

## 5 EJEMPLOS

Hemos realizado tres pruebas con esta aplicación, Construcción de la carretera M-61, de sostenibilidad crítica, construcción de planta de fabricación de cerveza y cambio de red eléctrica, ambos con sostenibilidad moderada. La valoración real de los proyectos se puede observar en los documentos oficiales y públicos correspondientes: <http://www.ssreyes.org/es/portal.do?NM=3&IDM=139>, [http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=paginapdf&blobheadede-r=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=CM\\_Pagina\\_BOCM&blobwhere=1142456839486&ssbinary=true](http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=paginapdf&blobheadede-r=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=CM_Pagina_BOCM&blobwhere=1142456839486&ssbinary=true) y [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-2179](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-2179) respectivamente.

Vamos a mostrar cómo se analizó el caso de la construcción de la M-61 y comentando sus conclusiones.

Primero se introduce la descripción del proyecto. Entre estos datos están la localidad, el nombre del proyecto, la empresa que lo va a realizar, el tipo de financiación y el tipo de proyecto. Esto último activa los factores e indicadores que estarán habilitados y con qué peso cada uno.

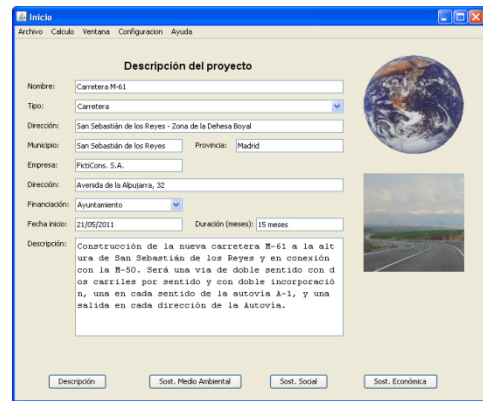


Figura 5.1: Ventana de descripción del proyecto

A continuación, el usuario debe pasar a las pestañas de sostenibilidad medio ambiental, sostenibilidad social y sostenibilidad económica. En cada una de estas pantallas, se muestran los factores para los que se analiza el impacto producido.

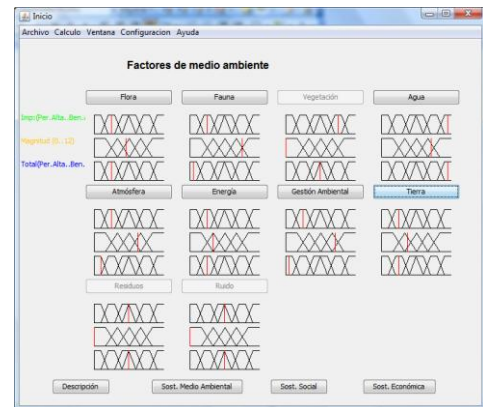


Figura 5.2: Factores de medio ambiente. Por factor, se muestra la importancia, la magnitud y el impacto producido en dicho factor.

Para que los datos de importancia y magnitud se vean completados, antes hay que valorar los datos de cada factor, que son los indicadores para la magnitud y las propiedades de la importancia, que se muestra en la figura 5.2.

El resultado final indica que el proyecto no es sostenible, dando un valor de sostenibilidad crítico, como se ve en la Figura 5.3. Dichos resultados finales se resumen en un informe en formato Pdf.



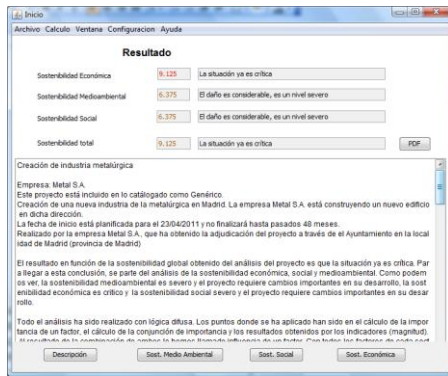


Figura 5.3: Resultado final de un ejemplo de cálculo de sostenibilidad

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para la evaluación de la sostenibilidad social, económica y medioambiental de proyectos y de esta manera obtener una sostenibilidad global. Tradicionalmente la evaluación de proyectos se realiza solo desde el punto de vista económico. El hecho de que en el cálculo de la sostenibilidad se utilizan términos ambiguos ha favorecido el uso de la lógica borrosa frente a los métodos tradicionales de análisis de impacto. Se aplica la lógica borrosa a cada uno de los cálculos que se realizan en el análisis global de la sostenibilidad: valoración de indicadores, la evaluación cuantitativa y cualitativa del impacto que produce un proyecto en los diferentes factores medioambientales, sociales y económicos.

La posibilidad de un cálculo de sostenibilidad de proyectos que sea universal es una idea que de momento es lejana. No obstante el poder acercarse a ella puede convertir a un proyecto en una herramienta imprescindible de acuerdo a la idea de sostenibilidad global de la Agenda 21, en las Cumbres de la Tierra y en las Conferencias Europeas sobre Ciudades Sostenibles.

El software realizado se puede descargar para su uso en [www.fdi.ucm.es/profesor/lgarmend/SC/sostenibilidad.jar](http://www.fdi.ucm.es/profesor/lgarmend/SC/sostenibilidad.jar)

## 7 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ayuntamiento de San Sebastián de los Reyes por la información de los proyectos evaluados de la carretera M61 y de la fábrica de cerveza.

Agradecemos el soporte del proyecto TIN2009-07901, CAM GR35/10-A.

Agradecemos a Adela Salvador su soporte y generosidad aportando su experiencia en evaluación de impacto.

## Referencias

- [1] Baylis, J. y Smith, S. La globalización de la política mundial. (3ª ed). Oxford University Press. 454-455, 2005.
- [2] Gallego, E.; González de Paula, L.; Garmendia, L. y Garmendia, A. "Método de decisión borrosa de si un efecto es impacto ambiental y su carácter". Jornadas internacionales de Didáctica de las Matemáticas en Ingeniería. ETSI Caminos, UPM. 2009
- [3] Garmendia, A.; Salvador, A.; Crespo, C. y Garmendia, L. *Evaluación de impacto ambiental*. Prentice Hall. 2005.
- [4] Gómez, R. A. *Lógicas no clásicas: principios y fundamentos*. Universidad EAFIT Escuela de Ciencias y Humanidades. Colección Académica. 2006.
- [5] IMSE Centro Nacional de Microelectrónica. *Herramientas de CAD para Lógica Difusa. XFuzzy. 3.0*. <http://www.imse.cnm.es>. 2003.
- [6] Martín, R. Directores: Garmendia L, Caro R., Garmendia A. Gestión de la Sostenibilidad utilizando Lógica Borrosa. *Trabajo Fin de Master de Investigación en Informática*. Facultad de Informática. UCM. 2011.  
[http://eprints.ucm.es/13054/1/memoriaSostFuzzy\\_5.0.0.pdf](http://eprints.ucm.es/13054/1/memoriaSostFuzzy_5.0.0.pdf)
- [7] Menger, K. Statistical Metrics. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1942.
- [8] *Primera Conferencia Europea sobre Ciudades Sostenibles*. Carta de Aalborg. 1994
- [9] *Real Decreto 1131/1988*, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental.
- [10] *Real Decreto Legislativo 1/2008*, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.
- [11] *Sexta Conferencia Europea sobre Ciudades Sostenibles*. Conferencia de Aalborg +10. 2004.  
<http://www.aalborgplus10.dk>
- [12] Schweizer B. y Sklar. A. Probabilistic Metric Spaces, North-Holland, Amsterdam. 1983.
- [13] Trillas, E. y Valverde, L. On mode and implication in approximate reasoning. *Approximate reasoning in expert systems*. Eds. M. M. Gupta. North-Holland. 157-166. 1985.
- [14] Zadeh, L. A. Fuzzy sets. En *Proceedings of the IEEE (Information and Control)*, Vol. 8., pp.338-353, 1965.