

## LOS PROYECTOS DE INGENIERÍA Y SUS IMPACTOS

María José Bastante-Ceca

Nolberto Munier

*Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Proyectos de Ingeniería*

### Abstract

Projects impact differently according to their type, scope and interaction with the medium they are involved. This paper suggests a methodology to quantitatively determine the effects of each impacting action on the final objective. It works with a series of steps, some already commented and documented (Conesa, 2003) such as grouping projects according to large areas (dams, irrigation, energy, etc.), analyzing and evaluating impacts quantitatively on the grounds of averages, data, experience and similar projects. However, having each impact quantitatively evaluated doesn't necessarily mean that the largest value matches the most influential impact, for such evaluation is subjective and because it doesn't consider impacts over impacts, i.e. serial impacts. A hydroelectric project for instance, produces many impacts which can be revealed and evaluated, but what is important is not so much as to learn how much its weight is but how it influences the objective. This methodology – based on Linear Programming – is able to compute the marginal contribution of each effect and because of that to proceed with an ordering of impacts, and also – very important – to analyze the sensitivity of each effect, i.e. how much it can vary without changing the result found.

**Keywords:** *impacts; restrictions; objective; criteria; linear programming; simus*

### Resumen

Los proyectos influyen de manera diferente según su tipo, alcance e interacción con el medio que afectan. Se sugiere aquí una metodología para determinar cuantitativamente qué efecto tiene cada actividad impactante sobre un objetivo final. Trabaja en una serie de pasos, algunos ya sugeridos y documentados (Conesa, 2003) tales como agrupar los proyectos según grandes áreas (presas, riego, energía, etc.), analizando y evaluando cuantitativamente los impactos que se producen sobre la base de promedios, datos, experiencia y proyectos similares. Sin embargo, el evaluar cuantitativamente cada efecto, no significa necesariamente que el mayor valor corresponda al más influyente, porque dicha evaluación es subjetiva y porque no considera los impactos sobre impactos, es decir, los impactos seriados. Un proyecto ferroviario, por ejemplo, produce muchos impactos que pueden ser determinados y evaluados, pero lo que interesa conocer no es cuánto pesa cada uno, sino cómo influye en un objetivo, tal como minimizar el impacto ambiental. Esta metodología - apoyada en la Programación Lineal - puede precisar la contribución marginal de cada efecto y con ello llegar a un ordenamiento de impactos, y también - muy importante - analizar la sensibilidad de cada efecto, es decir cuánto puede variar sin cambiar un resultado hallado.

**Palabras clave:** *impactos; objetivo; restricciones; criterios; programación lineal; simus*

## 1. Introducción y antecedentes

El presente trabajo propone una metodología aplicada a un ejemplo concreto; sin embargo, también se hacen referencias a otros proyectos para demostrar que la técnica puede usarse para cualquier tipo de desarrollo proyectual. Se emplea para demostrar la técnica un proyecto-ejemplo ficticio que consiste en la construcción de la infraestructura para un tren de alta velocidad entre dos ciudades A y B, distantes 400 km. La vía férrea atravesará terrenos de llanura, de montaña, ríos y ciudades. Se detallan aquí los pasos propuestos para analizar el proyecto, el cual tiene tres rutas alternativas. Si bien la metodología es aplicable a cualquier proyecto, no importa su complejidad, se entiende que aquí se ilustra sólo como ejemplo - y de ahí la corta extensión de este trabajo - y abarca secuencialmente los siguientes aspectos:

1. Definición del objetivo.
2. Identificación de las áreas que afectará el proyecto.
3. Identificación y evaluación de los impactos que producirán las tres alternativas para cada área.
4. Establecimiento de umbrales o límites a cada impacto.
5. Planteamiento general del proyecto con todos sus datos en una matriz única.
6. Resolución del problema.
7. Discusión y análisis de sensibilidad.

Las opciones se refieren exclusivamente a las diferentes alternativas de trazado para ir de A a B considerando los impactos de tipo económico, político, social y ambiental que produce cada una.

Esta estrategia de trabajo respecto a los impactos seriados, conjuntamente con la metodología de la PL y Simus ha sido probada en muchos proyectos de diversa índole, alcance y complejidad. Como ejemplo se mencionan brevemente algunas de estas aplicaciones:

- Seleccionar obras de infraestructura a ejecutar en cada período fiscal (desagües y pavimentos) - Córdoba, Argentina.
- Determinar la mejor localización urbana de centros de salud - Córdoba, Argentina.
- Determinar las mejores medidas para disminuir accidentes de tránsito - Córdoba, Argentina.
- Seleccionar y programar la reparación de puentes en un contexto urbano rural- Ontario, Canadá.
- Determinación de una lista final de indicadores ambientales a partir de una extensa lista de indicadores propuestos – Hull, Canadá.
- Determinación de la mejor política gubernamental para reciclaje de papel- Ottawa, Canadá
- Selección de asentamientos urbanos para proveerles de infraestructura básica - Ghana (Banco Mundial, Washington, Estados Unidos).
- Determinación de proyectos urbanos - Róterdam, Holanda.
- Identificación de indicadores urbanos y periurbanos - Universidad de Aberystwyth, Inglaterra
- Determinación de la mejor localización de incineradores de residuos domésticos - Reggio Emilia, Italia.

- Selección de planes de acción para la construcción de subdivisiones urbanas – Toluca, México.
- Selección de indicadores de sostenibilidad – Guadalajara, México.
- Planeamiento urbano – León, México.
- Selección entre dos alternativas para tratamiento de aguas negras – Oslo, Noruega
- Selección de proyectos para rehabilitación urbana en zona arrasada por la guerra - Franja de Gaza, Palestina.
- Determinación de la mejor ruta para una línea de alta tensión- Kwa Zulu, Natal, Sud África.

## 2. Definición del Objetivo

Es evidente que no todos los proyectos se refieren a obras de ingeniería. Hay por supuesto proyectos de caminos, de edificios, de presas, de ferrocarriles, etc., pero los hay también de investigación y desarrollo, de informática, medioambientales, educativos, de salud, etc. Sin embargo, todos ellos tienen un común denominador, esto es que modifican algo, tanto sea la mente de un niño mediante la educación, la salud de la población por medio de planes de erradicación de enfermedades infecciosas, el medioambiente, a través de un plan masivo de plantación de árboles, o el paisaje de una zona rural con la construcción de un parque eólico. Sin embargo, muy a menudo algunos tipos de impactos no son tenidos en cuenta en el desarrollo de un anteproyecto considerando especialmente el medioambiente y la sociedad, y menos aún el tema de sostenibilidad, y desde ese punto de vista se entiende que hay una carencia.

En consecuencia, frecuentemente el objetivo es maximizar los beneficios o minimizar los costes, lo cual es correcto pero no suficiente, porque no se tienen en cuenta otros objetivos como pueden ser mejorar el bienestar de la población, minimizar el impacto ambiental o maximizar la fiabilidad de un sistema. En el ejemplo propuesto el objetivo es seleccionar la ruta que ofrezca el menor coste, pero que a la vez ofrezca los mayores beneficios a las poblaciones que atraviesa, y que al mismo tiempo produzca el menor impacto posible en el medioambiente; es decir, se trata de hallar una solución de compromiso entre las diversas áreas. Por otro lado, un objetivo es algo que se desea conseguir y puede tener distintos alcances; pero con ello no se está diciendo que el beneficio económico debe lograr un cierto valor, ni se está especificando en cuanto se beneficiará la población, ni que el perjuicio al medioambiente debe alcanzar como máximo un cierto límite. Es decir, no se establecen cotas o valores, ya que lo que se desea es alcanzar una solución o ruta, en este caso, que equilibre de la mejor manera posible estos objetivos tan dispares. Para ello, se emplea la siguiente secuencia para los impactos:

1. Identificar.
2. Evaluar y calcular consecuencias.
3. Incorporar en el análisis los efectos de estos impactos.

## 3. Identificación de Impactos

¿Qué se entiende por *'impacto'*?

Es un efecto que produce un cambio en algunas condiciones existentes ya sea en la salud humana, animal o vegetal, en la alteración de un paisaje, en el ecosistema, en la posición económica o financiera de una compañía, en las condiciones de vida de la gente afectada por el proyecto, etc. (Munier, 2004). La metodología propone identificar impactos sobre la base de las siguientes premisas:

1. Determinar a qué áreas afecta directa e indirectamente el proyecto.
2. Determinar, dentro de cada área, los efectos directos.
3. A partir de los efectos directos, determinar los efectos indirectos o seriados.

### 3.1. Determinación de las áreas.

Para este ejemplo se puede construir la Tabla 1.

**Tabla 1 Proyecto de construcción de una línea férrea de alta velocidad. Áreas que estarán afectadas por el proyecto y naturaleza de los impactos**

| Áreas que afectará el proyecto | Naturaleza de los impactos |  |                   |   |
|--------------------------------|----------------------------|--|-------------------|---|
|                                | Impacto positivo           | Explicación del impacto  | Impacto negativo  | Explicación del impacto   |
| <b>Economía</b>                | Comunicaciones             | Mejorará las comunicaciones entre A y B  | Comercio regional | Se reducirá el tráfico vehicular entre A y B lo cual perjudicará el comercio de las localidades intermedias                     |
|                                | Energía                    | Debido al uso de energía eléctrica por los trenes, el país se beneficiará al tener que importar menos combustibles fósiles | Tarifas           | El coste del viaje en el nuevo sistema será casi el doble del actual comparado con el autobús                                   |
|                                | Productividad              | Debido a alta velocidad de los trenes se incrementan las horas disponibles para el trabajo                                 | Balanza de pagos  | Dado que las mayor parte del equipo rodante será importado, el proyecto tiene un impacto negativo en la economía del país       |
| <b>Sociedad</b>                | Tiempo de viaje            | Se reducirá drásticamente de las actuales 6hs a 2 hs 15 m.   | Accesibilidad     | La implantación del servicio eliminará los servicios de autobuses entre las ciudades intermedias que quedarán aisladas entre sí |
|                                | Empleo                     | La construcción y operación de la línea generará miles de posibilidades de empleo directos e indirectos                    | Relocalización    | Sera necesario relocalizar una gran cantidad de personas cuyas propiedades están en la servidumbre de l línea                   |

|                      |   |   |   | férrea  |
|----------------------|---|---|---|---|
| <b>Medioambiente</b> | Menor tránsito de camiones, autobuses y tráfico en las rutas, a la vez que de trenes convencionales | Disminución de la contaminación ambiental   | Tierras de labradío<br>Vida silvestre en los bosques en las inmediaciones de las vías | El proyecto utilizará una considerable porción de tierras de cultivo<br><br>Se verá afectada por el ruido de los trenes |
| <b>Industria</b>     | Beneficios para la industria  | La industria se beneficiará debido a que los rieles y parte del parque rodante serán manufacturados en el país lo mismo que equipos eléctricos como grandes transformadores |   |   |

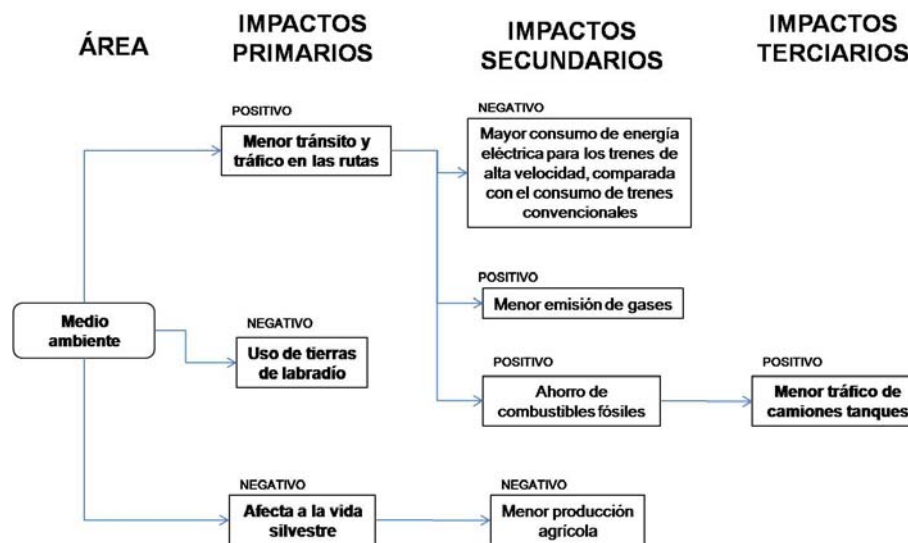
De esta manera se tiene un panorama detallado de las áreas que serán afectadas por el proyecto y los impactos positivos y negativos del mismo. Es obvio que la naturaleza del impacto depende en gran medida del tipo de propuesta, por cuanto los impactos que puede producir por ejemplo la construcción de un acueducto, son totalmente diferentes a los que puede originar la construcción de una terminal de autobuses, pero ambos tienen elementos comunes, tal como el uso del suelo, y la tarea consiste en analizar a quiénes o a qué afecta cada proyecto; hay trabajos realizados por investigadores que analizan las acciones impactantes de diversos proyectos, tal como el realizado por Conesa (1997). Esta publicación examina los elementos del proyecto considerando: Uso del suelo, emisión de contaminantes, sobreexplotación de recursos, medio biótico, deterioro del paisaje, infraestructura y entorno social y económico, y detalla para cada uno las *acciones impactantes* y los *factores impactados*. Sin embargo no hay que olvidar los efectos indirectos, es decir aquéllos que se producen por influencia de otros. Estos efectos indirectos pueden analizarse y evaluarse por medio de técnicas como el análisis por redes. Por ejemplo, se mencionó en la Tabla 1 que un impacto del proyecto en el área medioambiental es la disminución del tránsito de camiones y de trenes convencionales en la ruta que une a las ciudades A y B, y que se esquematiza en la Figura 1.

La segunda columna identifica los impactos directos, pero a su vez, la disminución del tránsito y del tráfico por ejemplo, produce otros impactos secundarios positivos, como por ejemplo: la reducción de la emisión de gases a la atmósfera, el ahorro de combustibles fósiles (que el país debe importar), el menor desgaste de la carretera, etc.

A su vez, la menor demanda de combustibles fósiles, tiene como consecuencia una menor circulación de camiones tanques que son los que abastecen a las estaciones de servicio. Por su parte el menor desgaste de la carretera significa que disminuye el presupuesto para su mantenimiento, cuyos fondos pueden destinarse a otras obras, etc.

Hay también un impacto negativo como es la necesidad de aumentar la producción eléctrica (que puede requerir combustibles fósiles), para suplir la demanda incremental de potencia eléctrica que requieren los trenes de alta velocidad, comparada con aquella de los trenes eléctricos convencionales; y ésta no es ciertamente menor, ya que se recuerda que la potencia necesaria para vencer la resistencia del aire aumenta con el cubo de la velocidad del tren.

Figura 1 Impactos primarios, secundarios y terciarios para el sector medioambiental



#### 4. Evaluar y Calcular Consecuencias

Ésta es una etapa importante porque tiene una relación directa con otros aspectos tales como el económico ¿Cuánto costará la relocalización de los pueblos? Si hay varios pueblos cercanos, ¿Será conveniente agruparlos en una o dos poblaciones? ¿Cómo se evalúa la pérdida comercial de los pueblos que quedarán más aislados? ¿Cuál es el beneficio estimado que traerá el aumento en la cantidad de horas trabajadas, que actualmente se pierden en viajes? ¿Cómo afectará la línea de alta velocidad a los habitantes de ciudades intermedias en donde parará el tren, ya que mediante el mismo parte de sus habitantes podrán conmutar diariamente a A o B?

Se conocen las áreas y los impactos que producirá el proyecto en los distintos elementos; procede ahora evaluarlos, es decir asignarles un valor cardinal a cada impacto. Hay varios métodos para llevar a cabo esta función por lo que no se desarrollan aquí, pero entre ellos están:

- *La matriz de Leopold*<sup>1</sup>
- *El sistema de McHarg*<sup>2</sup> que usa un original sistema de transparencias sobre la zona afectada, y en donde sobre cada transparencia se destaca algo especial, como por ejemplo bosques
- *El sistema de evaluación de Battelle*<sup>3</sup>
- Conesa, en la obra ya citada, desarrolla una serie de funciones de transformación. Por ejemplo, si se está analizando el ruido que producirá el tren, se entra con el nivel sonoro en decibelios - que se conoce midiéndolo para cada velocidad del tren en desarrollos similares - y mediante una gráfica determina la calidad ambiental. Por lo tanto, si se aspira a tener desde el punto de vista sonoro una calidad ambiental de

<sup>1</sup> Desarrollada por el Dr. Luna Leopold del 'United States Geological Survey', es una tabla o matrix donde en columnas se listan las diferentes acciones o actividades de un proyecto, las llamadas '*Estresantes*', y en filas las condiciones medioambientales existentes y que pueden ser afectadas por el proyecto, llamadas '*Receptores*'. <http://www.icsuscope.org/downloadpubs/scope5/chapter04.html>

<sup>2</sup> McHarg, I.L.:1968, *Design with Nature*. Natural History Press, Garden City, N.Y.

<sup>3</sup> *Detailed assessment of environmental impact - Description of a forestry project* <http://www.fao.org/docrep/t0550e/t0550e06.htm>

digamos el 70 %, se halla que el nivel sonoro no debe exceder de los 49 decibelios<sup>4</sup>. Este valor se utilizará en el cálculo como se verá más adelante.

En otro tipo de proyecto como uno forestal por ejemplo, que incluye el talado de un bosque, el impacto quizás más fuerte es el de erosión que se produce por la destrucción de la cubierta vegetal del suelo, lo cual facilita que las lluvias arrastren material produciendo un suelo estéril. En ese caso la Función de Transformación de Conesa mide la calidad ambiental en función de las toneladas métricas, por hectárea y por año, de pérdida de suelo. Siempre de acuerdo a este autor, una pérdida anual por hectárea de 10 toneladas corresponde a una calidad ambiental del 0,55. Si esta pérdida aumenta a 15 toneladas en el mismo período, la calidad ambiental decrece hasta 0,48. Conociendo estos valores es quizás posible limitar el daño, adoptando algunas medidas como evitar que el agua de lluvia arrastre el suelo, o también plantando algún tipo de vegetación para que forme una barrera que lo impida.

▪ *Ciclo de vida del proyecto*

Hasta ahora se ha estado analizando el proyecto ferroviario asumiendo que disminuirá la contaminación al usar energía eléctrica, pero para eso hay que generarla y ello, a menos que provenga de fuentes de energía renovable, producirá contaminación ambiental por la emisión de las centrales eléctricas cuando queman combustibles fósiles. Por otro lado existirá contaminación ambiental en la fabricación de los componente del tren sean estos rieles, material eléctrico, construcción de vagones, etc. Es decir, para fabricar por ejemplo el chasis de un vagón se necesita acero; la obtención de este acero comienza con la extracción de mineral de hierro de las minas, prosigue en los altos hornos y en los convertidores, para pasar luego a la extrusión y laminación del lingote para producir las vigas y chapas necesarias, y lo mismo sucede con el aluminio que se emplea en la carrocería. Esta secuencia se conoce como '*Ciclo de vida del proyecto*'

Todos estos procesos originan contaminación y deben tenerse en cuenta cuando se analizan los impactos. Éstos deben estimarse para cada tipo de proyecto, sean estos camineros, de construcción de edificios, de puentes, o fabricación de productos químicos. Hay una metodología para su cálculo basada en un trabajo de la Universidad Carnegie Mellon de los Estados Unidos<sup>5</sup>, y que, normalizando, ya que los distintos gases suelen expresarse en unidades diferentes, permite medir la contaminación del ciclo de vida y de diversos contaminantes, expresada en toneladas métricas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Volviendo al ejemplo del tren de alta velocidad o con cualquier otro proyecto, la metodología que se propone continúa desarrollando un modelo matemático que represente de la manera más fiel posible el escenario real. Es decir, se trata de tender una línea férrea a lo largo de 400 km que debe atravesar terrenos de distinta calidad, ciudades, cruzar ríos y montañas, con diferentes pendientes del terreno, utilizar túneles, y evitar en la medida de los posible bosques, lugares protegidos, reservas, lugares arqueológicos, etc., y además, lo más recta posible para mantener la alta velocidad.

Como se mencionó hay tres alternativas, con distintos costes, recorridos y obras de infraestructura; todo ello debe estar representado en el modelo matemático. Para una mayor exactitud se ha dividido el recorrido entre A y B en tres regiones denominadas Región Montañosa, Región Lacustre y Región de llanura.

---

<sup>4</sup> Este valor ha sido extraído de la Función de Transformación que figura en la página 198 de la obra citada de Conesa

<sup>5</sup> <http://www.eiolca.net/>.

## 5. Modelo Matemático

Consiste en construir una matriz de datos, mostrada en la Tabla 2, en la cual las columnas representan las diversas alternativas, y las filas los condicionamientos o restricciones que las alternativas deben cumplir de acuerdo a los impactos analizados. Las filas reciben normalmente el nombre de *restricciones* o *criterios*, que pueden ser unos pocos o cientos.

En este ejemplo los criterios son:

1. Costes totales, en millones de Euros.
2. Distancias, en kilómetros.
3. Tierras de cultivo, en Km<sup>2</sup>.
4. Hábitat de vida silvestre, en Km<sup>2</sup> situados a menos de 2 km de las vías.
5. Cantidad de personas a desplazar de su lugar actual de residencia.
6. Cantidad de aldeas a trasladar.
7. Bosques a talar, en hectáreas.
8. Alteración del paisaje (medida subjetiva).
9. Ruido de los trenes, en decibelios, en poblaciones a menos de 1 km de las vías y en el paso de estaciones sin parada del tren de alta velocidad.
10. Tiempo del viaje, en horas.
11. Cantidad de ríos a cruzar mediante puentes a construir.
12. Cantidad de túneles a construir.
13. Cantidad de estaciones existentes a reformar para el nuevo sistema.
14. Beneficio económico para la Región Montañosa en cientos de millones de Euros.
15. Beneficio económico para la Región Lacustre, en cientos de millones de Euros.
16. Beneficio económico para la Región de Llanura, en cientos de millones de Euros.
17. Cantidad de puestos de trabajo que generará la construcción y la operación de la nueva línea férrea.

**Tabla 2 Matriz de datos.**

| <b>Criterios</b>  | <i>Alternativa 1</i> | <i>Alternativa 2</i> | <i>Alternativa 3</i> | Sentido de la optimización |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| 1. Costes totales (Millones de €)   | 475                  | 502                  | 490                  | MIN                        |
| 2. Distancias, en kilómetros  | 405                  | 425                  | 453                  | MIN                        |
| 3. Tierras de cultivo, en Km <sup>2</sup>   | 50                   | 85                   | 29                   | MIN                        |
| 4. Hábitat de vida silvestre, en Km <sup>2</sup> , situados a menos de 2 km de las vías                                 | 124                  | 41                   |                      | MIN                        |
| 5. Cantidad de personas a desplazar   | 1.429                | 52                   | 2.327                | MIN                        |
| 6. Cantidad de aldeas a trasladar   | 12                   | 19                   | 24                   | MIN                        |
| 7. Hectáreas de bosques a talar   |                      | 26                   | 12                   | MIN                        |
| 8. Alteración del paisaje   | 5                    |                      | 9                    | MIN                        |
| 9. Ruido de los trenes, en decibelios, en poblaciones a menos de 1 km de las vías y en el paso de estaciones sin parada | 32                   | 49                   | 12                   | MIN                        |
| 10. Tiempo del viaje en horas   | 1,58                 | 1,67                 | 1,63                 | MIN                        |
| 11. Cantidad de ríos a cruzar mediante puentes a construir  | 4                    | 3                    | 8                    | MIN                        |



|  |      |      |      |     |
|--|------|------|------|-----|
| 12. Cantidad de túneles a construir  | 1    | 1    | 4    | MIN |
| 13. Cantidad de estaciones existentes a reformar para el nuevo sistema             | 6    | 1    | 1    | MIN |
| 14. Beneficio económico para la Región Montañosa, en cientos de millones de Euros  | 2,18 | 3,25 | 3    | MAX |
| 15. Beneficio económico para la Región Lacustre, en cientos de millones de Euros   | 2,18 | 3,12 | 3,19 | MAX |
| 16. Beneficio económico para la Región de Llanura, en cientos de millones de Euros | 1,42 | 3,1  | 3,45 | MAX |
| 17. Cantidad de puestos de trabajo que generará la nueva línea                     | 856  | 620  | 860  | MAX |

Esta matriz de datos es la base para construir el modelo matemático que se indica a continuación y que se resuelve por la metodología conocida como Programación Lineal (PL)<sup>6</sup>. En realidad, cada fila de esta matriz es una ecuación lineal que está constituida por las variables (es decir las alternativas), afectadas por los respectivos valores asociados a cada una de acuerdo a cada criterio. Por lo tanto, el conjunto de variables y de restricciones de esta matriz constituye un sistema de tres variables (en columnas) por 17 restricciones o criterios (en filas). Lo que se busca es resolver este sistema de ecuaciones, o sea hallar el valor de cada variable cumpliendo con todas las restricciones, y de manera tal que se optimice una función objetivo. Esto se lleva a cabo mediante el 'Algoritmo del Simplex'<sup>7</sup> de PL, desarrollado por el científico americano George Dantzig (Dantzig, 1948). Hay muchos programas informáticos para desarrollar este algoritmo; este trabajo emplea el llamado Solver<sup>®</sup>, que es un agregado del programa Excel<sup>®</sup> de Microsoft<sup>®</sup>.

Sin embargo, la PL puede resolver sólo problemas con un objetivo y en nuestro problema pueden existir varios, tales como minimizar el coste del proyecto, minimizar la distancia a recorrer, maximizar el desarrollo económico de ciertas zonas, minimizar el daño ambiental, etc. Por ello se emplea aquí el modelo Simus (Munier, 2010) que, aunque está basado en la PL y usa el mismo algoritmo de resolución, incorpora una técnica que permite trabajar con varios objetivos, aunque no hay seguridad de que se alcance un valor óptimo, como es el caso cuando se trabaja con PL y con sólo un objetivo.

Se comienza normalizando la matriz anterior para trabajar con valores homogéneos, para lo cual se divide cada valor por la correspondiente suma de cada fila<sup>8</sup>, y se asigna entonces a cada fila, criterio, o restricción un valor límite denominado 'umbral' que depende del sentido de la optimización, como se muestra en la Tabla 3. Así, cuando el criterio 1 'Costes totales', demanda una minimización, se aspira a que éste criterio alcance el menor valor posible<sup>9</sup>, y lo ideal sería cero, pero obviamente esto no es factible ya que no podemos construir con coste cero, y en consecuencia el criterio establece que el resultado de la ecuación del término de la izquierda (o sea la fila respectiva de la matriz), tenga un valor lo más cercano

<sup>6</sup> Técnica matemática que trata problemas lineales, de mucha aplicación práctica en la industria, el comercio, la localización industrial, en el área de la petroquímica, y en otras muchas actividades cuando éstas pueden ser representadas mediante un modelo matemático con relaciones lineales de las variables. Tiende a lograr la optimización de un objetivo, también lineal, suministrando, si existe, la solución óptima del problema, es decir aquella que no puede mejorarse teniendo en cuenta los datos suministrados.

<sup>7</sup> Algoritmo desarrollado para resolver sistemas de inecuaciones lineales, a fin de optimizar un objetivo lineal y que se basa en álgebra matricial debido a George Dantzig

<sup>8</sup> Para normalizar se puede usar este método o cualquier otro, como por ejemplo, dividir cada valor por el mayor valor de la fila correspondiente

<sup>9</sup> Es decir, la suma de los productos del valor que toma cada variable por el respectivo coeficiente de la Tabla.

posible al mínimo, pero obviamente igual o mayor que éste. Esta condición se indica con el operador '≥', es decir 'mayor o igual que', y para este criterio se expresa como:

$$475 x_1 + 502 x_2 + 490 x_3 \geq 475$$

Similarmente, para un criterio como el número 14 '*Beneficio económico para la Región Montañosa*', evidentemente se desea obtener el máximo valor de este beneficio. Sin embargo, este no es infinito, ya que tiene un valor superior o límite, fijado por condiciones socio-económicas o de mercado o por un análisis económico. Naturalmente, se desearía que el beneficio fuera incluso mayor que este valor límite, pero siendo realistas, hay que establecer una cota alcanzable y no algo utópico. En consciencia, el operador es del tipo '≤' 'menor o igual que', para este criterio y para todos aquellos que buscan una maximización, y7 la ecuación es entonces de la forma:

$$2,18 x_1 + 3,25 x_2 + 3 x_3 \leq 3$$

Estas mismas ecuaciones pueden escribirse en forma normalizada tomando los correspondientes valores de la Tabla 3.

**Tabla 3 Matriz de datos normalizada**

| Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Sentido de la optimización | Valor requerido |
|---------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------------|
| 0,324         | 0,342         | 0,334         | ≥                          | 0,324           |
| 0,316         | 0,331         | 0,353         | ≥                          | 0,316           |
| 0,305         | 0,518         | 0,177         | ≥                          | 0,177           |
| 0,752         | 0,248         | 0,000         | ≥                          | 0,000           |
| 0,375         | 0,014         | 0,611         | ≥                          | 0,014           |
| 0,218         | 0,345         | 0,436         | ≥                          | 0,218           |
| 0,000         | 0,684         | 0,316         | ≥                          | 0,000           |
| 0,357         | 0,000         | 0,643         | ≥                          | 0,000           |
| 0,344         | 0,527         | 0,129         | ≥                          | 0,129           |
| 0,324         | 0,342         | 0,334         | ≥                          | 0,334           |
| 0,267         | 0,200         | 0,533         | ≥                          | 0,200           |
| 0,167         | 0,167         | 0,667         | ≥                          | 0,167           |
| 0,750         | 0,125         | 0,125         | ≥                          | 0,125           |
| 0,259         | 0,386         | 0,356         | ≥                          | 0,386           |
| 0,257         | 0,367         | 0,376         | ≤                          | 0,376           |
| 0,178         | 0,389         | 0,433         | ≤                          | 0,433           |
| 0,366         | 0,265         | 0,368         | ≤                          | 0,368           |

Se ingresan estos datos en el programa Símplex usando Excel y se analizará el proyecto empleando 9 objetivos que son:

1. Coste total del proyecto.
2. Cantidad de personas que deberán ser desplazadas.
3. Cantidad de hectáreas de bosques que deberán ser talados.
4. Ruido producido por los trenes de alta velocidad.
5. Tiempo del viaje.
6. Beneficio económico para la Región Montañosa.
7. Beneficio económico para la Región Lacustre.
8. Beneficio económico para la Región de Llanura.
9. Cantidad de puestos de trabajo que generará el proyecto

Cada uno de estos objetivos se usa en forma secuencial como función objetivo y se determinan los valores óptimos correspondientes a las alternativas, como se detalla en la Tabla 4. A continuación se repone en la matriz el objetivo usado, se extrae y ejecuta otro, se anotan los resultados, se vuelve a reponer en la matriz, se extrae el siguiente elegido, y así sucesivamente hasta agotar los 9 objetivos.

**Tabla 4 Valores óptimos de las alternativas obtenidos sobre la base de emplear en forma secuencial un objetivo diferente.**

| Matriz de valores óptimos de alternativas de acuerdo a cada función objetivo |       |       | Suma de filas de valores óptimos | Criterios  |
|--|-------|-------|----------------------------------|--|
| 0,293  | 0,025 | 0,690 | 1,008                            | Costes totales (Millones. de €)  |
| 0,000  | 1,000 | 0,000 | 1,000                            | Cantidad de personas a desplazar   |
| 0,891  | 0,157 | 0,000 | 1,048                            | Hectáreas de bosques a talar   |
| 0,072  | 0,087 | 0,866 | 1,025                            | Ruido de los trenes en poblaciones a menos de 1 km de las vías y en el paso de estaciones sin parada |
| 0,286  | 0,105 | 0,640 | 1,031                            | Tiempo del viaje en horas  |
| 0,000  | 1,049 | 0,000 | 1,049                            | Beneficio económico para la Región Montañosa   |
| 0,090  | 0,297 | 0,696 | 1,083                            | Beneficio económico para la Región Lacustre  |
| 0,072  | 0,087 | 0,866 | 1,025                            | Beneficio económico para la Región de Llanura  |
| 1,463  | 0,000 | 0,000 | 1,463                            | Cantidad de puestos de trabajo que generara la nueva línea   |

Esta matriz se normaliza por filas y se suman los valores correspondientes a cada columna (Tabla 5). La alternativa correspondiente al mayor valor es la que mejor cumple con todas las restricciones, y en este caso corresponder a la alternativa 3, con un valor de 3,638.

Sin embargo es necesario también considerar en cuántas restricciones participa cada alternativa y por ello se halla el cociente entre este número y la cantidad total, o sea 9. Así, para la alternativa 3 por ejemplo esta ratio vale 5 (porque participa sólo con valores en 5 criterios) / 9 = 0,556). Este porcentaje se aplica entonces a los valores anteriores lo cual suministra los valores de las alternativas considerando esta participación. Por ultimo se normalizan estos valores y se obtiene la solución final que favorece a la alternativa 2. Obsérvese como el hecho de considerar la participación de cada alternativa ha modificado el

resultado y esta última es entonces la que mejores condiciones presenta considerando todas las restricciones impuestas, y es por lo tanto la sugerida por el modelo.

Si se requiere un ordenamiento de impactos o criterios de acuerdo a su importancia esto puede llevarse a cabo mediante la observación de los valores duales<sup>10</sup> que se obtienen en forma automática cuando se resuelve el problema anterior. Registrando esos valores para cada función objetivo es posible conocer la importancia de cada criterio o restricción con respecto a los demás. Esto es lo que se conoce como '*Análisis de sensibilidad*'.

**Tabla 5 Valores normalizados**

|  | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |       |
|--|---------------|---------------|---------------|-------|
|  | 0,291         | 0,025         | 0,685         |       |
|  | 0,000         | 1,000         | 0,000         |       |
|  | 0,850         | 0,150         | 0,000         |       |
|  | 0,070         | 0,085         | 0,845         |       |
|  | 0,277         | 0,102         | 0,621         |       |
|  | 0,000         | 1,000         | 0,000         |       |
|  | 0,083         | 0,274         | 0,643         |       |
|  | 0,070         | 0,085         | 0,845         |       |
|  | 1,000         | 0,000         | 0,000         |       |
| Alternativa normalizada                    | 2,642         | 2,720         | 3,638         |       |
|  |               |               |               | Suma  |
| Participación de alternativas en criterios | 0,778         | 0,889         | 0,556         | 2,222 |
| Participación normalizada                  | 0,350         | 0,400         | 0,250         |       |
| Resultado final                            | 0,925         | 1,088         | 0,909         |       |

## 6. Conclusiones

Se entiende que el tema abordado, es decir el relacionado con los impactos producidos por proyectos, no se trata a menudo en la literatura técnica. Este trabajo propone una metodología para analizarlos usando diferentes herramientas, y se basa en estudios ya realizados de identificación y evaluación (Conesa, 1997), pero con especial énfasis en un aspecto que es aun menos difundido, y que se refiere a la naturaleza seriada de los impactos, lo cual en realidad obliga a considerar no sólo los impactos directos, sino también los secundarios, terciarios e inducidos que originan los primeros. Debido a esta circunstancia se estima que la única herramienta idónea que puede tratar este tipo de impactos es la PL, cuyo empleo que se discute en una segunda parte.

<sup>10</sup> Un problema como el planteado se denomina '*primal*'. Cuando éste se resuelve por el algoritmo del Simplex se generan a su vez los valores que corresponden a una matriz traspuesta, es decir aquella que tiene por columnas las filas del primal y por filas las columnas del primal, y que constituye el problema '*dual*' del anterior. La importancia radica en que los resultados del problema dual corresponden a las contribuciones marginales o '*precios sombra*' del problema primal e indican en consecuencia cuanto varía el objetivo para una variación unitaria de cada restricción. Obviamente, la restricción que provoca la mayor variación positiva o negativa del objetivo es la que tiene la mayor importancia, y lo mismo sucede con los otros valores para las mismas lo que permite aquilatar la importancia o peso de cada criterio o restricción.

Si bien la PL es una técnica muy conocida desde hace varias décadas son muy pocas sus aplicaciones a la toma de decisiones, debido fundamentalmente a que trabaja con un solo objetivo, que no es lo usual en el proceso de toma de decisiones. Por ese motivo se propone la metodología Simus, que se ejemplifica, y que tiende a eliminar esa desventaja al permitir trabajar con cuantos objetivos se desee.

### Referencias

- Conesa, V. (1997). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental . Ediciones Mundi-Prensa, Madrid
- Dantzig, G. (1948). Linear programming and extensions. Princeton University Press
- Dias-Chaves, R. (2005). Tesis doctoral – Universidad de Aberystwyth, Inglaterra
- Munier, N. (2004). Multicriteria environmental assessment: A practical guide. Kluwer, Dordrecht, Holanda
- Munier, N. (2010). A Strategy for using Multicriteria Analysis in Decision-Making. A Guide for Simple and Complex Environmental Projects – Springer (En prensa)
- Taha Salah (2006). Tesis doctoral – Universidad Birzait, Palestina
- Tasca, L (2007). Tesis doctoral – Universidad de Milano, Italia

### Correspondencia (Para más información contacte con):

María José Bastante-Ceca  
Phone: +34 96 387 70 00 Ext. 75685  
Fax: +34 96 387 98 69  
E-mail : [mabasce1@dpi.upv.es](mailto:mabasce1@dpi.upv.es)  
URL : [www.dpi.upv.es/id&ea](http://www.dpi.upv.es/id&ea)