

1. Introducción

No todos los recursos naturales que conforman el medio ambiente son renovables, lo que demanda su protección y uso controlado en el desarrollo de los proyectos emprendidos por los seres humanos. La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento de carácter jurídico-administrativo que tiene por objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que un proyecto o una actividad produciría en caso de ser ejecutado, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos, todo ello con el propósito de ser aceptado, modificado o rechazado por parte de las administraciones públicas [6, 15]. La EIA permite establecer si un determinado proyecto, sometido a evaluación, es o no compatible con el medio ambiente, y por lo tanto determinar si debe o no ejecutarse, así como las condiciones que deben seguirse en su ejecución, en caso de ser aceptado.

Una EIA se realiza siguiendo dos perspectivas fundamentales, o bien se basa en la cuantificación de los impactos mediante el uso de indicadores, o bien se emplean los juicios de expertos. Esta investigación se centra en el segundo tipo, llamado Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental (EIIA) y específicamente en la etapa en la que se valoran los impactos.

Existen diversos métodos de EIIA, pero independientemente de cuál se aplique, deben confrontar la complejidad creciente de este proceso, la cual se caracteriza por:

- La multiplicidad de las alternativas a evaluar en un mismo problema, debido a que por un lado, se requiere ordenar los impactos, factores y acciones y, por otro lado, una evaluación global del proyecto, que también podrá ser utilizada para su comparación con otras alternativas de ejecución para un mismo proyecto y por tanto permitirá además obtener un orden de tales opciones.
- El carácter predictivo de la EIIA sobre la forma en que un proyecto repercutirá sobre el entorno implica que el análisis de las decisiones se realice bajo incertidumbre [1, 7, 14, 18, 22].
- La necesidad de un tratamiento preciso, es decir, sin pérdida de información, de datos de diferente naturaleza, cualitativa o cuantitativa, de acuerdo a la naturaleza de los criterios evaluados.
- La necesidad de obtener resultados interpretables por los involucrados en el proceso evaluativo, de manera que se facilite la comprensión de la EIIA y su empleo posterior como instrumento jurídico y administrativo.
- La naturaleza dinámica de los elementos del problema y con ello la necesidad de obtener resultados que tengan en cuenta los cambios en el tiempo de los impactos ambientales.

Tradicionalmente los problemas de EIIA se han resuelto aplicando métodos donde los expertos emplean únicamente escalas numéricas para valorar los impactos ambientales [2, 6, 9, 16, 19, 21], sin importar la naturaleza, cualitativa o cuantitativa de los criterios de evaluación involucrados. Esto implica que, aunque la incertidumbre es inherente a la EIIA, esta no sea modelada de forma acertada. Además, se obtienen resultados numéricos que pueden no representar el conocimiento y la información imprecisa adecuadamente y a veces son difíciles de interpretar, lo cual ensombrece el papel de la EIIA como instrumento de apoyo a la toma de decisiones sobre la aceptación o no de un proyecto.

La relevancia de la EIIA para la protección del medio ambiente y las limitaciones de los métodos tradicionales para llevar a cabo este proceso en contextos complejos actuales, motivaron la siguiente hipótesis de partida de esta investigación:

Las limitaciones de los métodos tradicionales de EIIA no permiten modelar adecuadamente la naturaleza incierta, heterogénea y dinámica de este proceso, por lo que se obtienen resultados de baja interpretabilidad y con pérdida de información. Esto provoca que sea necesario, por una parte, flexibilizar el marco de evaluación de la EIIA, de manera que los expertos puedan expresar sus preferencias en diferentes dominios de expresión, que representen tanto la incertidumbre como la naturaleza cualitativa y cuantitativa de los criterios que se evalúan en el problema de toma de decisión; y por otra parte, mejorar el método de evaluación mediante la implementación de un modelo que permita tomar decisiones teniendo en cuenta los cambios en el tiempo de las acciones del proyecto, de los factores ambientales afectados y por tanto, de los impactos ambientales.

1.1. Objetivos

El propósito fundamental de esta investigación radica en: *Desarrollar modelos para la EIIA en contextos complejos bajo incertidumbre.* Este propósito general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. *Actualización del estado del arte sobre la EIIA basada en Análisis de Decisión.*

Para ello se analizarán en profundidad los elementos de proceso de EIIA y los métodos más representativos para desarrollarla. Esto permitirá delimitar las dificultades existentes, de manera que podamos identificar las consecuentes limitaciones que lastran la EIIA.

2. *Desarrollo de un modelo de EIIA con información heterogénea.*

Para ello debemos estudiar los diferentes dominios de información que usualmente se utilizan en problemas de toma de decisión, centrándonos en aquellos que permiten representar la incertidumbre que puede aparecer en la EIIA, así como la naturaleza heterogénea de los criterios de evaluación. Luego analizaremos los distintos enfoques existentes para el tratamiento de esta información heterogénea y seleccionaremos el más conveniente para la EIIA. Por último, definiremos el modelo de EIIA con información heterogénea y lo aplicaremos a un problema de EIIA real para analizar los resultados y contrastar la hipótesis de partida.

3. *Desarrollo de un modelo de EIIA en contextos dinámicos.*

Este objetivo específico requiere que inicialmente analicemos la naturaleza dinámica de la EIIA en determinadas situaciones, así como las propuestas que existen en la literatura para resolver problemas de Toma de Decisión Dinámica (TDD) y valoremos si es posible implementar alguna de ellas para la EIIA. Esto nos permitirá definir el modelo de EIIA con información heterogénea en contextos dinámicos, de manera que las evaluaciones finales representen la evolución temporal de los impactos ambientales de un proyecto. Para ello, se definirán las herramientas necesarias que permitan modelar estos fenómenos. De igual forma, aplicaremos el modelo propuesto a un problema de evaluación para comprobar la hipótesis de partida.

4. *Desarrollo de un software para la EIIA que soporte el modelo de EIIA con información heterogénea.*

1.2. *Estructura*

Para explicar con claridad cómo se alcanzan los objetivos anteriores, la memoria está organizada en siete capítulos y tres apéndices. El contenido de cada una de estas partes se introduce brevemente a continuación.

Capítulo 2: En este capítulo inicialmente se revisan conceptos básicos, elementos fundamentales y las etapas principales en el proceso de EIIA y se describen algunos de los métodos de EIIA más representativos. En una segunda parte, se describen los problemas de toma de decisión a partir de sus características, estructura y clasificaciones. Esto nos servirá para presentar la EIIA como problema basado en el Análisis de Decisión y evaluar las principales limitaciones que presentan los métodos convencionales.

Capítulo 3: En este capítulo inicialmente se revisan diferentes enfoques para el tratamiento de información heterogénea en problemas de Análisis de Decisión y se valora cuál de ellos es el apropiado para la solución de un problema de EIIA con información heterogénea. Además, se revisan distintos modelos para la resolución de problemas de toma de decisión dinámica y se analiza cuál puede emplearse para la EIIA en contextos dinámicos.

Capítulo 4: Se propone un nuevo modelo de EIIA en contextos heterogéneos basado en el esquema general de un proceso de Análisis de Decisión. Se describe su estructura y la relación entre sus distintas etapas, así como los pasos que se realizan en cada una de ellas. Además se aplica el modelo a un problema de EIIA real para ilustrar y analizar los resultados en la implementación del modelo propuesto.

Capítulo 5: Se propone un modelo de TDD que, a partir de un coeficiente discriminativo basado en operadores de agregación bipolares y asociativos, permite diferenciar las alternativas de acuerdo a su comportamiento a lo largo de diferentes períodos. Esta

propuesta se utiliza para integrar el modelado dinámico en procesos de EIIA con información heterogénea y que se ilustra sobre un problema de EIIA.

Capítulo 6: Presenta un software que soporta el modelo de EIIA en contextos heterogéneos. Para ello se explica la arquitectura, las herramientas y los lenguajes utilizados en su desarrollo así como los módulos y funcionalidades del sistema.

Capítulo 7: Este capítulo finaliza esta memoria mostrando las conclusiones y resultados más relevantes obtenidos en la investigación realizada, así como las futuras líneas de investigación a seguir. También se muestran las publicaciones obtenidas durante el desarrollo de esta investigación.

Apéndices: Se incluyen tres apéndices. Los dos primeros están dedicados a introducir el modelado lingüístico difuso de información lingüística y los operadores de agregación, debido a que ambos temas completan las revisiones presentadas en los capítulos 3 y 4 respectivamente, y mejoran la comprensión de los modelos de EIIA propuestos en los capítulos 5 y 6. En el tercer apéndice se presentan los datos utilizados en el problema de EIIA del capítulo 4.

Consideramos importante destacar que esta investigación constituye un esfuerzo por promover la conciencia ambiental, en especial en el entorno cubano, y el papel de la ciencia en favor de la búsqueda de soluciones a la crisis medio ambiental.

A continuación se describen las principales propuestas presentadas en esta tesis de doctorado.

2. Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea

Se ha indicado como limitación en los métodos tradicionales EIIA, la incapacidad para modelar de forma adecuada la incertidumbre en la EIIA y para tratar la información heterogénea, debido a que se restringen al uso de escalas numéricas para todos los tipos de criterios ya sean cualitativos o cuantitativos. Para solucionar esta dificultad, apostando por la obtención de resultados comprensibles, se presenta un nuevo *Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea (MH-EIIA)* basado en la fusión lingüística utilizando el Modelo de Representación 2-tupla.

2.1. Esquema General

Para poder realizar el proceso de EIIA en una forma racional y bien organizada, el MH-EIIA se estructura siguiendo las fases del proceso general de Análisis de Decisión [5]. El esquema general del MH-EIIA, tal y como se muestra en la Figura 1, consta de tres fases principales:

- 1) Definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación.

- 2) Recopilación de Preferencias.
- 3) Evaluación de Alternativas.

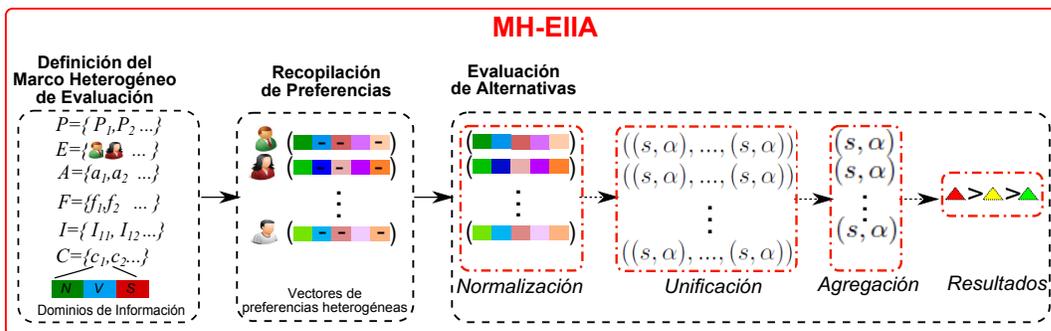


Figura 1: Esquema general del MH-EIIA

Como los criterios propuestos por diferentes autores difieren en número como en carácter, un marco adecuado de EIIA debe permitir la recopilación de esa información heterogénea dependiendo de la naturaleza de estos criterios. Así, en la primera fase de nuestro modelo se especifica la estructura y la representación de los elementos del problema y los dominios de información en los que los expertos proporcionarán sus preferencias sobre cada criterio para cada impacto. Tales preferencias se recogen en la segunda fase.

La tercera fase lleva a cabo los procesos de Computación con Palabras para obtener los valores de importancia de cada una de las alternativas evaluadas, ya sean los factores, acciones, impactos y del proyecto en general. La información heterogénea es unificada en un dominio lingüístico 2-tupla común. A continuación, la información lingüística se agrega en un proceso de múltiples etapas para obtener los diferentes valores de importancia que se comparan para obtener una valoración final de los impactos, factores y acciones.

2.2. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

En esta investigación se ha buscado un acercamiento a la etapa de “Evaluación de la Importancia” de una EIIA. Como se muestra en la Figura 2, el MH-EIIA recibe como entrada los resultados del Análisis del Proyecto, el Inventario Medioambiental y la Identificación de los Impactos Potenciales, donde se han identificado los elementos de nuestro problema de EIIA.

En la Definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación se declaran los elementos del problema de EIIA:

- $\mathfrak{P} = \{P_r | r \in (1, \dots, v)\}$ es el conjunto de proyectos a evaluar. Para mayor simplicidad en la presentación del modelo, en lo adelante se hace referencia a la evaluación de un único proyecto, $\mathfrak{P} = \{P_1\}$.

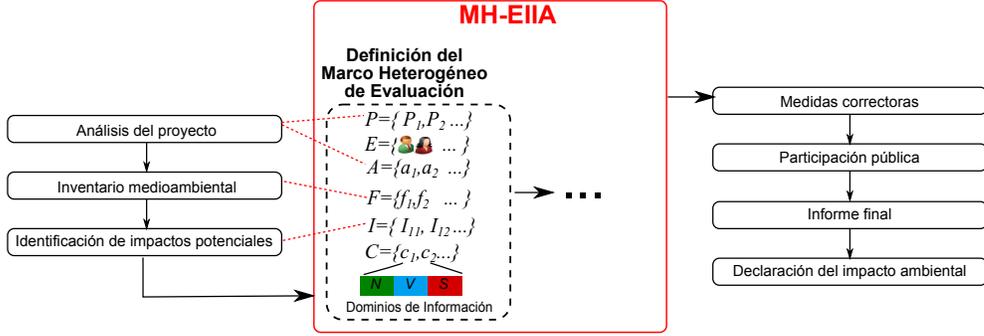


Figura 2: MH-EIIA en el proceso general de EIIA

- $A = \{a_j | j \in (1, \dots, n)\}$ es el conjunto de acciones ejecutadas durante el proyecto evaluado.
- $F = \{f_i | i \in (1, \dots, m)\}$ es el conjunto de factores ambientales afectados cuya importancia o peso está dada por el vector $W^f = (w_i^f | i \in (1, \dots, m)), w_i^f \in [0, 1]$ con $\sum_{i=1}^m w_i^f = 1$.
- $I = \{I_{ij} | i \in \{1, \dots, m\}, j \in \{1, \dots, n\}\}$, es el conjunto de impactos ambientales. Cada impacto I_{ij} representa el factor medioambiental (f_i) impactado y la acción (a_j) que lo causa.
- $U = \{u_{ij} | i \in \{1, \dots, m\}, j \in \{1, \dots, n\}\}$, $u_{ij} \in \{-1, 1\}$ es el conjunto que representa la naturaleza de los impactos del conjunto I , donde el valor -1 indica que el impacto será negativo mientras que 1 indica que el impacto será positivo.
- $E = \{e_k | k \in (1, \dots, q)\}$ es el conjunto de expertos que evalúan los impactos medioambientales de acuerdo a,
- $C = \{c_h | h \in (1, \dots, p)\}$, que es el conjunto de criterios cuyos pesos están dados por el vector $W^c = (w_h^c | h \in (1, \dots, p)), w_h^c \in [0, 1]$ donde $\sum_{h=1}^p w_h^c = 1$.
- Como los criterios representan diferentes dimensiones de un impacto, pueden entrar en conflicto entre sí [25] y es necesaria la división de C en dos subconjuntos: C^1 con los criterios de beneficio y C^2 con los criterios de costo. Eso significa que para los criterios de beneficio, el experto prefiere tener un valor máximo entre las alternativas, mientras que para los criterios de costo, el experto prefiere tener un valor mínimo entre las alternativas. Además $C = C^1 \cup C^2$ y $C^1 \cap C^2 = \phi$ donde ϕ , es un conjunto vacío.
- x_{ij}^{hk} representa la preferencia del experto $e_k \in E$ sobre el impacto I_{ij} de acuerdo al criterio $c_h \in C$. Cada preferencia podrá ser dada a través de valores en $O = \{N, V, S\}$ que es el conjunto de los dominios de información.

Además, dependiendo de los criterios de selección se podrá emplear un dominio específico de acuerdo con la esencia del criterio.

2.3. Recopilación de Preferencias

Una vez definido el Marco Heterogéneo de Evaluación, las valoraciones de los expertos son recolectadas. Cada experto provee sus preferencias a través de vectores de preferencias $X_{ij}^k = (x_{ij}^{1k}, \dots, x_{ij}^{pk})$ que pueden registrarse como muestra la Tabla 1.

Tabla 1: Preferencias heterogéneas de los expertos

Experto	Criterio	I_{11}	\dots	I_{mn}
e_1	c_1	x_{11}^{11}	\dots	x_{mn}^{11}
	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
	c_p	x_{11}^{p1}	\dots	x_{mn}^{p1}
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
e_q	c_1	x_{11}^{1q}	\dots	x_{mn}^{1q}
	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
	c_p	x_{11}^{pq}	\dots	x_{mn}^{pq}

2.4. Evaluación de Alternativas

La fase de Evaluación de Alternativas es fundamental en el MH-EIIA porque en ella, las preferencias heterogéneas recopiladas, se sintetizan en valores de importancia mediante procesos de Computación con Palabras. Para ello, seguimos los cuatro pasos que se presentan en la Figura 1:

- A) Normalización.
- B) Unificación.
- C) Agregación Multietapa.
- D) Resultados.

En primer lugar la información heterogénea se normaliza con el fin de eliminar los conflictos de costo/beneficio. En segundo lugar, la información se unifica en un dominio común para facilitar posteriormente la agregación de las preferencias para obtener los valores lingüísticos de importancia para los impactos, factores, acciones, así como la importancia global del proyecto. Por último, estos valores son utilizados para ordenar descendientemente las alternativas anteriores como resultado final.

2.4.1. Normalización

Este paso consiste en analizar los conflictos costo/beneficio de los criterios, de tal manera que a partir de las preferencias recopiladas, x_{ij}^{hk} , se obtienen las preferencias normalizadas \bar{x}_{ij}^{hk} utilizando las ecuaciones definidas a continuación (ver Tabla 2).

- Para valores numéricos $x_{ij}^{hk} \in [0, 1]$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} x_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^1 \\ 1 - x_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (1)$$

- Para valores intervalares $x_{ij}^{hk} \in V([0, 1])$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} [a_{ij}^{hk}, b_{ij}^{hk}] & \text{si } c_h \in C^1 \\ [1 - b_{ij}^{hk}, 1 - a_{ij}^{hk}] & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (2)$$

- Para valores lingüísticos $x_{ij}^{hk} \in S$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} s_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^1 \\ Neg(s_{ij}^{hk}) & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (3)$$

donde Neg es un operador de negación [27] tal que $Neg(s_i) = s_{g-i}$.

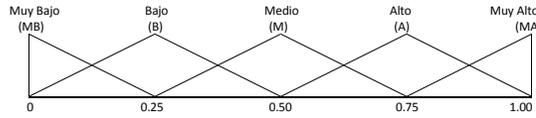


Figura 3: CTL de cinco términos simétricamente distribuidos

Tabla 2: Preferencias heterogéneas normalizadas

Experto	Criterio	I_{11}	...	I_{mn}
e_1	c_1	\bar{x}_{11}^{11}	...	\bar{x}_{mn}^{11}
	⋮	⋮	⋮	⋮
	c_p	\bar{x}_{11}^{p1}	...	\bar{x}_{mn}^{p1}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
e_q	c_1	\bar{x}_{11}^{1q}	...	\bar{x}_{mn}^{1q}
	⋮	⋮	⋮	⋮
	c_p	\bar{x}_{11}^{pq}	...	\bar{x}_{mn}^{pq}

2.4.2. Unificación

Para unificar las preferencias heterogéneas se emplea el método propuesto por Herrera et al. [13]. Los valores lingüísticos en 2-tuplas $(s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk}$ son obtenidos como sigue (ver Tabla 3):

$$\tilde{x}_{ij}^{hk} = (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk} = \begin{cases} \chi \left(T_{NST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in N \\ \chi \left(T_{VST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in V \\ \chi \left(T_{SST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in S \end{cases} \quad (4)$$

Tabla 3: Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas

Experto	Criterio	I_{11}	...	I_{mn}
e_1	c_1	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{11}$	...	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{11}$
	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
	c_p	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{p1}$	...	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{p1}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
e_q	c_1	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{1q}$	...	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{1q}$
	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
	c_p	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{pq}$	...	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{pq}$

2.4.3. Agregación Multietapa

Después de obtener valores homogéneos expresados mediante 2-tuplas lingüísticas, es necesario generar una evaluación colectiva lingüística para cada alternativa (impactos, factores, acciones y proyectos). Para ello, es evidente la necesidad de emplear modelos computacionales lingüísticos que permiten operar con este tipo de información con el fin de obtener resultados precisos y proporcionar una representación que facilite la interpretación de los mismos. Para alcanzar ambos objetivos, se lleva a cabo un proceso de agregación de múltiples etapas incluyendo los pasos ilustrados en la Figura 4.

1. Calcular el valor colectivo de cada criterio para cada impacto.

Debido la EIIA se ha modelado como un problema de TDMC que involucra múltiples expertos, las preferencias de todos los expertos para cada criterio se agregan para obtener un valor colectivo de cada criterio para cada impacto evaluado.

El valor colectivo de un criterio para cada impacto, es un valor lingüístico en 2-tuplas (ver Tabla 4) que se denota $(s_b, \alpha_b)_{ij}^h$ y que se obtiene mediante un operador para 2-tuplas lingüísticas como los descritos en el Apéndice A.

$$(s_b, \alpha_b)_{ij}^h = \Phi \left((s_a, \alpha_a)_{ij}^{h1}, \dots, (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hp} \right) \quad (5)$$

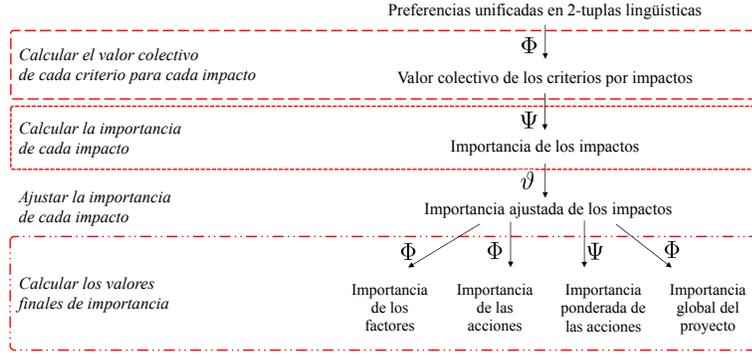


Figura 4: Proceso de Agregación Multietapa: pasos, operadores y valores obtenidos en cada paso

Tabla 4: Valores colectivos de los criterios

Criterio	I_{11}	...	I_{mn}
c_1	$(s_b, \alpha_b)_{11}^1$	...	$(s_b, \alpha_b)_{mn}^1$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
c_p	$(s_b, \alpha_b)_{11}^p$	...	$(s_b, \alpha_b)_{mn}^p$

2. Calcular la importancia de cada impacto.

Después de tener el valor colectivo para cada criterio de evaluación, se calcula la importancia para cada impacto (s_r, α_r) (ver Tabla 5), utilizando un operador para 2-tupla con el vector de pesos W^f , como se indica a continuación:

$$(s_r, \alpha_r)_{ij} = \Psi \left((s_b, \alpha_b)_{ij}^1, \dots, (s_b, \alpha_b)_{ij}^p \right) \quad (6)$$

Tabla 5: Importancia de los impactos

I_{11}	...	I_{mn}
$(s_r, \alpha_r)_{11}$	...	$(s_r, \alpha_r)_{mn}$

3. Ajustar la importancia de cada impacto.

Debido a que un valor lingüístico $(s_r, \alpha_r)_{ij}$ no permite representar si el impacto evaluado será beneficioso o perjudicial, es necesario ajustar estos valores de importancia con el fin de especificar de forma integrada si un impacto I_{ij} tiene una naturaleza negativa o positiva. Este procedimiento se nombra “ajustar la importancia de un impacto”.

En problemas reales de EIIA, pudiéramos enfrentar impactos diferentes con la misma extensión, intensidad y/o persistencia (entre otros criterios), pero con naturaleza o

signo contrario, por lo tanto, esto demanda una actitud diferente para tratar esta peculiaridad.

Al analizar la naturaleza de un impacto lógicamente surge la idea de dos nuevos valores (uno positivo y otro negativo) en lugar del valor único y original de importancia [1, 6]. En el contexto lingüístico, esto implica ampliar el universo del discurso para representar valores lingüísticos de importancia positivos y negativos, de tal forma que, a partir de un conjunto inicial términos lingüísticos S_T se genere un nuevo conjunto de términos lingüísticos S'_T con cardinalidad $g' + 1$, siendo $g' = 2 \cdot g - 1$. Es importante señalar que S_T , no es más que el CBTL seleccionado como el dominio común para la *Unificación*.

Este procedimiento puede hacerse siguiendo un proceso similar a la construcción de una jerarquía lingüística [12, 20], es decir, por un lado, se preservan todos los antiguos puntos modales de las funciones de pertenencia de cada término lingüístico de S_T a S'_T y por otro lado, se realizan transiciones suaves entre S_T y S'_T agregando un nuevo término lingüístico entre cada par de términos pertenecientes a S_T (para más detalles, consultar el Apéndice A).

$S'_T = \{s'_0, \dots, s'_{g'}\}$ puede ser visto además como una escala bipolar [10] donde el término $s'_{g'/2}$ representa un valor de importancia indiferente y los términos de la izquierda y de la derecha de la misma, representan valores de importancia de impactos negativos y positivos, respectivamente. De esta manera intuitiva se obtienen valores lingüísticos que representan no sólo el significado sino que también refleja su naturaleza y además son fácilmente contrastables usando el operador de comparación para 2-tupla [11], sin la necesidad de definir nuevas leyes de comparación para diferentes y opuestos dominios lingüísticos de expresión.

El procedimiento anterior permite obtener la sintaxis del nuevo CTL S'_T . Para generar la semántica de S'_T , se define la función de transformación ϑ :

Definición 1. Sean S_T y S'_T dos CTL con cardinalidades $g+1$ y $g'+1$ respectivamente, tal que $g' = 2 \cdot g$; y considerando el modelo de representación 2-tupla lingüística. La función de transformación $\vartheta : S_T \rightarrow S'_T$, de una 2-tupla (s, α) en S_T a S'_T , de acuerdo a la naturaleza u_{ij} del impacto I_{ij} se define como:

$$\vartheta \left((s, \alpha)_{ij} \right) = \begin{cases} \Delta^{-1} \left(\Delta(s, \alpha)_{ij} + \frac{g'}{2} \right) & \text{si } u_{ij} = 1 \\ \Delta^{-1} \left(\frac{g'}{2} - \Delta(s, \alpha)_{ij} \right) & \text{si } u_{ij} = -1 \end{cases} \quad (7)$$

La Figura 5 ilustra el desempeño de la función de ajuste ϑ .

En resumen, en este paso cada valor $(s_r, \alpha_r)_{ij}$ será ajustado como sigue:

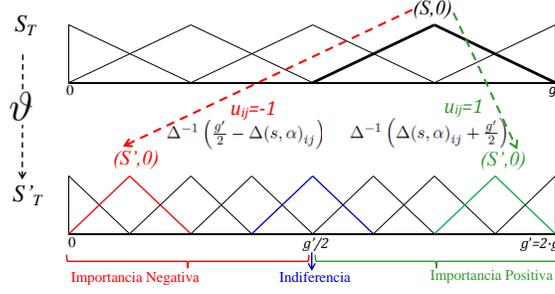


Figura 5: Desempeño de la función de transformación ϑ

$$(s_v, \alpha_v)_{ij} = \vartheta \left((s_r, \alpha_r)_{ij} \right) \quad (8)$$

4. Calcular los valores finales de importancia.

El objetivo fundamental de la Agregación Multietapa es generar una valoración colectiva para cada factor ambiental, acción y en general del proyecto.

- **Importancia de cada factor:**

Representa la importancia de un factor ambiental debido a los impactos causados por todas las acciones que interactúan con él, por lo que se obtiene a través de la agregación de los valores de importancia ajustados de los impactos relacionados con el factor.

$$(s_z, \alpha_z)_i = \Phi \{ (s_v, \alpha_v)_{i1}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{in} \} \quad (9)$$

- **Importancia de cada acción:**

Representa la importancia de los impactos causados por una acción sobre los factores ambientales, por lo que se obtiene mediante la agregación de los valores de importancia ajustados de los impactos causados por esta acción.

$$(s_y, \alpha_y)_j = \Phi \{ (s_v, \alpha_v)_{1j}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mj} \} \quad (10)$$

- **Importancia ponderada de cada acción:**

Representa la importancia de los impactos causados por una acción sobre los factores ambientales pero también teniendo en cuenta la importancia de cada factor afectado, por lo que se obtiene mediante una agregación ponderada de los valores ajustados de importancia de los impactos causados por esta acción, utilizando el vector de ponderación W^f que permite obtener valores de importancia inferiores para las acciones más agresivas que afectan los factores más importantes.

$$(s_f, \alpha_f)_j = \Psi \{ (s_v, \alpha_v)_{1j}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mj} \} \quad (11)$$

▪ **Importancia global del proyecto:**

Representa la importancia general de los impactos causados por todas las acciones sobre todos los factores, es decir, el total de los efectos posibles causados por el proyecto que el ambiente experimentará.

$$(s_g, \alpha_g) = \Phi\{(s_v, \alpha_v)_{11}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mn}\} \quad (12)$$

El valor global de importancia permite evaluar un proyecto individual sin necesidad de compararlo o considerar otras alternativas, debido a que los resultados finales están expresados en la escala ajustada S'_T que representa valores de importancia positivos y negativos.

Los valores obtenidos en las etapas de 3 y 4, pueden resumirse como muestra la Tabla 6.

Tabla 6: Valores finales de importancia

Factor/Acción	a_1	...	a_n	Imp. del factor
f_1	$(s_v, \alpha_v)_{11}$	...	$(s_v, \alpha_v)_{1n}$	$(s_z, \alpha_z)_1$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
f_m	$(s_v, \alpha_v)_{m1}$	...	$(s_v, \alpha_v)_{mn}$	$(s_z, \alpha_z)_m$
Imp. de la acción	$(s_y, \alpha_y)_1$	...	$(s_y, \alpha_y)_n$	
Imp. Ponderada de la acción	$(s_f, \alpha_f)_1$	...	$(s_f, \alpha_f)_n$	
Imp. Global del proyecto				(s_g, α_g)

2.4.4. Resultados

Dado que los valores de importancia se expresan en 2-tuplas lingüísticas, las reglas de comparación de 2-tuplas [11], son aplicadas para obtener conjuntos ordenados como parte de la solución del problema:

1. Ranking de impactos según el orden descendente de los valores $(s_v, \alpha_v)_{ij}$.
2. Ranking de factores según el orden descendente de los valores $(s_z, \alpha_z)_i$.
3. Ranking de acciones según el orden descendente de los valores $(s_y, \alpha_y)_j$.
4. Ranking ponderado de acciones según el orden descendente de los valores $(s_f, \alpha_f)_j$.
5. Ranking de alternativas para un mismo proyecto según el orden descendente de los valores (s_g, α_g) .

3. Extensión del MH-EIIA para el Modelado de Información en Contextos Dudosos

La complejidad de los problemas de EIIA se debe a la incertidumbre relacionada con el conocimiento de los expertos sobre el comportamiento de los impactos ambientales. Así, por ejemplo, para un impacto como la emisión de gases, un experto puede dudar sobre su intensidad, es decir, puede vacilar entre varios términos lingüísticos como *Alto* y *Muy Alto* o pudiera desear emitir una respuesta más elaborada y cercana al lenguaje común, como *Mayor que Medio*. O para este mismo impacto, respecto a su persistencia en el entorno, un experto podría dudar entre valores como “0.2”, “0.3” y “0.4”. Sin embargo, a pesar de las novedades y ventajas de nuestro MH-EIIA, este presenta los siguientes inconvenientes:

- No permite modelar situaciones bajo incertidumbre, donde los expertos dudan ante varios valores en la valoración de los impactos ambientales, tanto para criterios cualitativos como cuantitativos.
- En el caso de la información lingüística, se utilizan términos lingüísticos simples y predefinidos que restringen la elicitación de preferencias de los expertos, por lo que algunas veces no pueden reflejar realmente sus opiniones y dudas.

Con respecto a la primera limitación, se han encontrado dos soluciones importantes. Para manejar situaciones de incertidumbre provocada por la duda, donde los expertos involucrados en un problema de toma de decisión dudan entre varios valores para emitir una opinión o evaluar un criterio, deseando no seleccionar un valor único debido a que este no refleja su preferencia de forma precisa; Torra introdujo el concepto de Conjuntos Difusos Dudosos (CDD) [24] como una extensión de los conjuntos difusos. De manera similar al tratamiento de situaciones dudosas mediante CDD, pero en entornos cualitativos, puede ocurrir que los expertos duden entre varios términos lingüísticos al momento de emitir una valoración. Para modelar estas situaciones Rodríguez et al. en [23] propusieron el concepto de Conjuntos de Términos Lingüísticos Difusos Dudosos (CTLDD) que está basado en el Enfoque Lingüístico Difuso [29, 30, 31] y extiende el concepto de CDD al contexto lingüístico. Ambos temas (CDD y CTLDD) son revisados en el Apéndice A de esta memoria de investigación.

Con respecto a la segunda limitación, Rodríguez et al. en [23] también definieron una gramática libre de contexto básica G_H , que permite generar expresiones lingüísticas comparativas similares a las utilizadas por los seres humanos en problemas de toma de decisiones lingüísticas, con el objetivo de mejorar la flexibilidad en la elicitación de la información lingüística de los expertos.

Por tanto, ha sido necesario extender el MH-EIIA para, por una parte, permitir el modelado de situaciones de duda de los expertos sobre criterios cualitativos y cuantitativos, mediante la utilización de información dudosa heterogénea (CDD y CTLDD); y por otra parte, mejorar el modelado de la información lingüística mediante la utilización de herramientas que permitan generar expresiones cercanas al modelo cognitivo de los seres humanos

y propias de la EIIA para que los expertos puedan expresar mejor su conocimiento; manteniendo la premisa de la obtención de resultados comprensibles, por lo que se conserva el esquema de unificación en 2-tuplas lingüísticas. Para cumplir este propósito, será necesario:

1. Integrar la información difusa dudosa en los dominios de información de nuestro Marco Heterogéneo de EIIA.
2. Proponer métodos de tratamiento y normalización de la información dudosa.
3. Proponer métodos de unificación de la información difusa dudosa en 2-tuplas lingüísticas.

3.1. Tratamiento de la Información Difusa Dudosa

Para poder realizar los procesos de Computación con Palabras necesarios en la resolución del problema de EIIA, primero se transforman los CDD en intervalos en $[0, 1]$ y las expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD. Esto facilitará la normalización y unificación de la información difusa dudosa, como se muestra en la Figura 6).

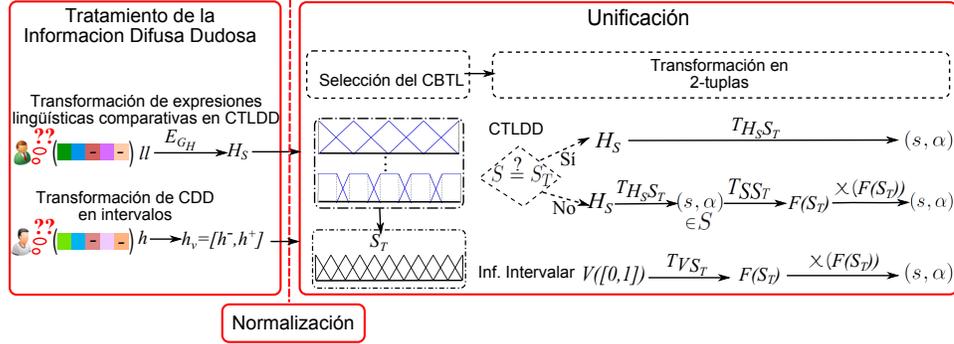


Figura 6: Transformaciones de expresiones lingüísticas y CDD

- Transformación de CDD en intervalos.

Las valoraciones proporcionadas por los expertos mediante CDD, son transformadas en intervalos numéricos. Un intervalo en $[0, 1]$ es generado a partir de los límites inferior y superior del CDD, lo que permitirá posteriormente operar con estos intervalos.

Definición 2. Sea h_1 un CDD, el intervalo de h_1 es:

$$h_{V_1} = [h_1^-, h_1^+]$$

donde $h_1^- = \min\{\gamma | \gamma \in h\}$ y $h_1^+ = \max\{\gamma | \gamma \in h\}$.

- Transformación de expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD.

Las valoraciones proporcionadas por los expertos a través de expresiones lingüísticas comparativas son unificadas en CTLDD mediante la función de transformación E_{GH} .

3.1.1. Normalización

De acuerdo con el MH-EIIA original, en este paso la información difusa dudosa heterogénea se normaliza con el fin de eliminar conflictos de costo/beneficio. Para ello, a partir de las preferencias recopiladas, x_{ij}^{hk} , se obtienen las preferencias normalizadas \bar{x}_{ij}^{hk} utilizando las ecuaciones definidas a continuación:

- Para intervalos de CDD: $x_{ij}^{hk} \in V([0, 1])$ se emplea el mismo método que para los valores intervalares en la Ecuación (2):

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} [h_{ij}^{-hk}, h_{ij}^{+hk}] & \text{si } c_h \in C^1 \\ [1 - h_{ij}^{+hk}, 1 - h_{ij}^{-hk}] & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (13)$$

- Para CTLDD: $x_{ij}^{hk} \in H_S$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} l_{ij}^{hp} & \text{si } c_h \in C^1 \\ \text{Neg}_{H_S}(l_{ij}^{hp}) & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (14)$$

donde Neg_{H_S} es un operador de negación sobre CTLDD tal que:

$$\text{Neg}_{H_S}(\{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}) = \{s_k / \forall k \in H_S\}, k = \{g - j, g - (j - 1), \dots, g - i\} \quad (15)$$

3.1.2. Unificación

Para obtener los valores de importancia expresados mediante 2-tuplas lingüísticas, es necesario convertir los CDD y CTLDD en 2-tuplas. Para ello, se utilizarán las siguientes transformaciones que, como puede apreciarse en la Figura 6, mantienen la idea básica de unificación:

- *Unificación de CDD en 2-tupla*

Una vez obtenido el intervalo del CDD, la unificación se realiza según lo planteado para los valores intervalares:

1. *Transformación en Conjuntos Difusos*: Una vez que el intervalo ha sido determinado, se aplica la función de transformación $T_{V S_T} : V \rightarrow F(S_T)$ que transforma un intervalo h_V en un conjunto difuso en S_T .
2. *Transformación en 2-tupla*: El conjunto difuso F_{S_T} , es convertido en un valor 2-tupla mediante la función de transformación $\chi : F(S_T) \rightarrow \tilde{S}$.

- *Unificación de CTLDD en 2-tupla*

Debido a que un CTLDD está compuesto por varios términos lingüísticos, para llevar a cabo la fusión lingüística, estos términos lingüísticos son agregados y el resultado

es representado por un valor en 2-tupla. Cuando los expertos dudan acerca de diferentes términos lingüísticos, esto implica distintos grados de importancia de cada término, por consiguiente el operador de agregación seleccionado debe reflejar este comportamiento.

Además, para unificar un CTLDD en 2-tupla, se tienen en cuenta los resultados del primer paso del procedimiento descrito en el apartado, es decir, se considera el CBTL seleccionado. En este sentido, se tienen dos variantes posibles: (1) el CTL empleado por la gramática libre de contexto G_H ha sido seleccionado como el CBTL o (2) el CTL empleado por la gramática libre de contexto G_H no ha sido seleccionado como el CBTL, sino que este es un CTL de mayor granularidad. Por consiguiente, la unificación de CTLDD en 2-tupla, debe soportar ambas opciones:

1. Si $S = S_T$:

Definición 3. Sea $H_{S_1} = \{s_i, \dots, s_j\}$ un CTLDD, la función de transformación $T_{H_S S_T} : H_S \rightarrow \tilde{S}$ se define como sigue:

$$T_{H_S S_T}(H_{S_1}) = \Delta \left(\sum_{k=i}^j w_k \cdot k \right)$$

donde $s_k \in S$, $w_k \in [0, 1]$, $k = \{i, \dots, j\}$ y $\sum_{k=i}^j w_k = 1$.

2. Si $S \neq S_T$: después de obtener un valor 2-tupla en S mediante el paso anterior, este valor será transformado en un conjunto difuso en S_T y luego este será transformado en otro valor 2-tupla pero en S_T .

En resumen, los valores lingüísticos en 2-tuplas $(s_p, \alpha_p)_{ij}^{hk}$ son generados como sigue:

$$\tilde{x}_{ij}^{hk} = (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk} = \begin{cases} T_{H_S S_T}(\bar{x}_{ij}^{hk}) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in H_S \text{ y } S = S_T \\ \chi(T_{S S_T}(T_{H_S S_T}(\bar{x}_{ij}^{hk}))) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in H_S \text{ y } S \neq S_T \\ \chi(T_{V S_T}(\bar{x}_{ij}^{hk})) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in V \end{cases} \quad (16)$$

El cálculo de los pesos para el operador de agregación, dependerá de la intención y el problema. En [17] Liu y Rodríguez presentaron un modelo para calcular estos pesos en caso de utilizar el operador de agregación OWA [26] (véase el Apéndice B).

A partir de la unificación en 2-tuplas, puede aplicarse el resto de las etapas del MH-EIIA para la solución del problema de EIIA.

4. Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea en Contextos Dinámicos

La naturaleza dinámica de los impactos ambientales, ha provocado la necesidad de modelar procesos de Análisis de Decisión en los que se obtengan resultados que tengan en

cuenta los cambios en el tiempo de dichos impactos ambientales. Existen situaciones en las que, para proyectos de larga duración, es necesario realizar varios controles o revisiones de sus impactos ambientales, con el propósito de conocer la evolución del impacto o la efectividad de las medidas correctoras empleadas. Igualmente, en ocasiones se requiere comparar la evolución de varios proyectos considerando el comportamiento en el tiempo de sus impactos ambientales. Ambos casos son ejemplos de contextos dinámicos de EIIA. En cada revisión o momento de decisión se determina el impacto ambiental del proyecto mediante métodos de EIIA; pero si se desea emitir una evaluación que tenga en consideración los resultados de evaluaciones anteriores, en lugar de evaluaciones estáticas aisladas, no se cuenta con un mecanismo formal de análisis de decisión para dar solución a esta problemática en el área de la EIIA.

Para cumplir integralmente el objetivo de esta investigación se ha proporcionado una solución a la necesidad de desarrollar EIIA en contextos dinámicos pero sin renunciar al tratamiento de la información heterogénea; es decir, manteniendo un Marco de Heterogéneo de Evaluación que permita a los expertos proveer sus preferencias en diferentes dominios de expresión en cada uno de los múltiples períodos de decisión que se consideren en un problema de EIIA dinámico. Con esta perspectiva, se ha definido el Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea en Contextos Dinámicos (MHD-EIIA).

4.1. Mejora del Modelo de Toma de Decisión Dinámica: Cálculo del Índice Discriminativo Dinámico

La propiedad de asociatividad del operador de agregación empleado en la parte dinámica del modelo de Campanella y Ribeiro [4] evita el almacenamiento de la información de todas las alternativas en todos los períodos, debido a que la evaluación dinámica sólo depende de la evaluación no dinámica en el período actual y la evaluación dinámica en el período anterior. Esto puede ser visto como un tipo de propiedad Markoviana en la que el resultado de la agregación sólo depende del valor agregado en el período anterior y el nuevo argumento [28]. Sin embargo, esta ventaja trae como consecuencia que la función de evaluación dinámica pueda obtener evaluaciones dinámicas iguales para las diferentes alternativas que presentan diferentes perfiles o comportamiento a través del tiempo. Esto provoca que el modelo no pueda discriminar las alternativas de acuerdo con el perfil temporal porque la propiedad de asociatividad no permite distinguir el orden de dichos valores agregados (anteriores y nuevos).

Para respetar la esencia dinámica en la resolución del problema de TDD cuando se obtienen iguales evaluaciones dinámicas para diferentes alternativas, parece lógico y adecuado encontrar una solución siguiendo la segunda variante, que mantiene la premisa fundamental de un problema de este tipo, es decir, que el perfil temporal de una alternativa se tenga en cuenta para la comparación con otras alternativas.

En general, puede definirse un operador \bigwedge en el espacio de secuencias [3]. Dada una serie de números reales $\mathbf{B} = \{\mathbf{b}_n\}$, puede considerarse la serie

$\bigwedge \mathbf{B} = \{\mathbf{b}_{n+1} - \mathbf{b}_n\}$ a partir de las diferencias entre los términos sucesivos de \mathbf{B} .

Definición 4. *El cambio en la evaluación, $D_t(a_j)$, es la diferencia entre las evaluaciones de una alternativa a , en el período anterior, $t - 1$, y el actual, t , y se define como:*

$$D_t(a_j) = \begin{cases} 0, & a_j \in A_t \setminus H_{t-1} \\ R_t(a_j) - R_{t-1}(a_j), & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (17)$$

Debido a que $R_t(a_j), R_{t-1}(a_j) \in [0, 1]$, los incrementos o decrementos en la evaluación de una alternativa, $D_t(a_j)$, en cada período de decisión se obtienen en una escala bipolar $D_t(a_j) \in [-1, 1]$ [8], en la que 0 es llamado el elemento neutro que representa la inexistencia de un cambio en la evaluación desde un período $t - 1$ a uno siguiente t .

El cambio en la evaluación de una alternativa $D_t(a_j)$, sólo encierra el comportamiento de la evaluación entre dos períodos de tiempo consecutivos (de $t - 1$ a t), por lo que es necesario formalizar un mecanismo dinámico que considere todos los cambios en las evaluaciones durante todos los períodos incluidos en el problema de TDD.

Los beneficios del cálculo de los resultados finales sin almacenar todos los valores anteriores (a través de la asociatividad) y la modulación, además, del peso de estos valores en los resultados finales (a través de los refuerzos) se utilizan también en la propuesta de Índice Discriminativo Dinámico, $\xi_t(\cdot)$, debido a sus características:

- *Dinámico*: debe representar el cambio de calificación a través del tiempo sin almacenar todos ellos.
- *Personalizable*: debe ser capaz de modelar comportamientos diferentes respecto a decrementos o incrementos de evaluación alternativa en diferentes períodos.

Definición 5. *Sea $D_t(a_j)$ el cambio en la evaluación de una alternativa a_j en un período t y $\Upsilon : [-1, 1]^2 \rightarrow [-1, 1]$ un operador de agregación bipolar. El Índice Discriminativo Dinámico, que representa el comportamiento de las evaluaciones de dicha alternativa a través del tiempo hasta t , es una función $\xi_t : A_t \cup H_{t-1} \rightarrow [-1, 1]$ dada por:*

$$\xi_t(a_j) = \begin{cases} D_t(a_j), & a_j \in A_t \setminus H_{t-1} \\ \Upsilon(\xi_{t-1}(a_j), D_t(a_j)), & a_j \in A_t \cap H_{t-1} \\ \xi_{t-1}(a_j), & a_j \in H_{t-1} \setminus A_t \end{cases} \quad (18)$$

El estudio del cálculo ha demostrado que las derivadas son las cantidades matemáticas que representan el cambio continuo. Si reemplazamos derivadas (cambio continuo) por diferencias de cambio (discreta), entonces las técnicas desarrolladas para el análisis de sistemas discretos son muy similares a muchos de los métodos que se utilizan para el estudio de sistemas continuos y \bigwedge (derivada de tiempo discreto) juega el papel de la derivada convencional (continua). El operador iterativo, o el grado de operador \bigwedge se denota \bigwedge^k , es decir,

$\bigwedge^k \mathbf{B} = \bigwedge \bigwedge^{k-1} \mathbf{B}$. De esta manera se amplía el índice mediante la introducción de índices de orden superior asociados a derivadas de tiempo discreto de órdenes superiores \bigwedge^k .

El comportamiento del índice $\xi_t(a_j)$ de una alternativa a se describe como sigue:

- Si $a_j \in A_t \setminus H_{t-1}$ entonces su Índice Discriminativo Dinámico $\xi_t(a_j)$ es igual a su cambio en la evaluación $D_t(a_j)$.
- Si $a_j \in A_t \cap H_{t-1}$, entonces su Índice Discriminativo Dinámico se calcula mediante la agregación del valor del Índice Discriminativo Dinámico en el período anterior y el valor actual del cambio en la evaluación $\Upsilon(\xi_{t-1}(a_j), D_t(a_j))$.
- Si $a_j \in H_{t-1} \setminus A_t$, entonces el valor del Índice Discriminativo Dinámico es igual al obtenido en el período anterior, $\xi_t(a_j) = \xi_{t-1}(a_j)$.

Por lo tanto, si diferentes alternativas obtienen igual Evaluación Dinámica $E_t(\cdot)$ en un período t , entonces el ranking para estas alternativas en t , se generará teniendo en cuenta los valores del $\xi_t(\cdot)$, lo cual refleja la perspectiva dinámica del problema de toma de decisión.

La selección del operador de agregación dependerá de la actitud del decisor con respecto a los cambios en la evaluación.

4.2. Esquema General

El nuevo modelo de EIIA en contextos dinámicos, se define para gestionar situaciones que requieren una valoración general de la evolución de los impactos ambientales de uno o varios proyectos. La Figura 7 muestra el esquema general del MHD-EIIA que como puede observarse, al igual que el MH-EIIA, mantiene la estructura fundamental de un problema de Análisis de Decisión, donde las distintas fases del modelo básico se modificarán y se utilizarán herramientas diferentes para llegar a la importancia global del proyecto.

Puede decirse entonces que el MH-EIIA ha sido extendido de forma tal que permita la realización de la EIIA en múltiples períodos, donde cada evaluación tendrá en cuenta las anteriores tomando como base el MD-TDD.

Los cambios fundamentales para la EIIA en contextos dinámicos, se incluyen en la tercera fase. La Agregación Multietapa permitirá obtener la importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto. Posteriormente será necesario calcular la importancia dinámica de los impactos ambientales y si existieran coincidencias en estos valores para varios proyectos, será necesario en tales casos calcular además el Índice Discriminativo Dinámico. Estos últimos valores, se emplearán para obtener el ranking de proyectos en cada período de decisión que a su vez permitirá, de acuerdo con la política de retención predefinida, actualizar la información del conjunto histórico de proyectos.

4.3. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

Para la definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación, se mantiene la utilización de diferentes dominios de expresión, según la naturaleza de los criterios empleados para la

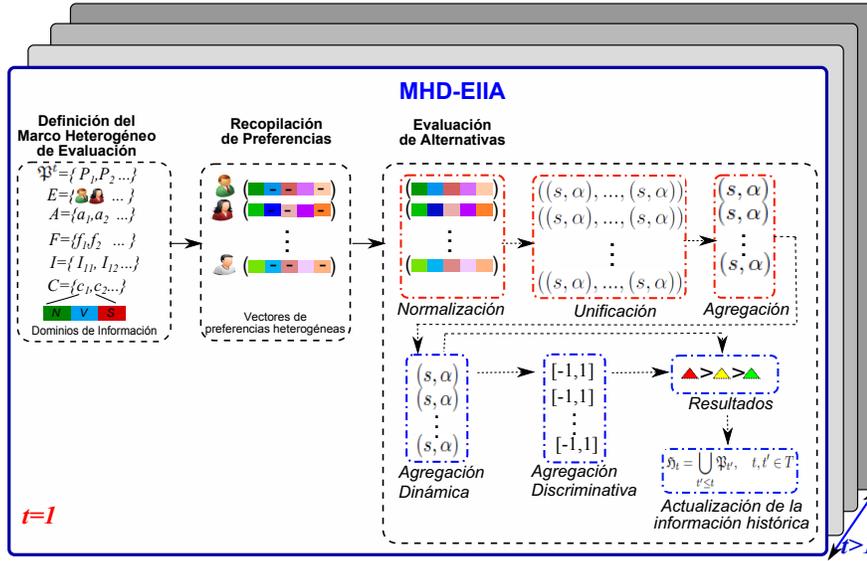


Figura 7: Esquema general del MHD-EIIA

caracterización de los impactos ambientales. Es por ello que resulta importante preservar el carácter heterogéneo del marco de trabajo.

Es pertinente destacar que intervienen nuevos elementos en la definición del problema:

- $\mathfrak{P}^t = \{P_i | i \in (1, \dots, v), v > 1\}$ es el conjunto de proyectos a evaluar en cada momento de decisión $t \in T$.
- La información acerca del conjunto de proyectos a través del tiempo es transmitida de un período al siguiente en un conjunto histórico \mathfrak{H}_t definido como:

$$\mathfrak{H}_0 = \emptyset, \quad \mathfrak{H}_t = \bigcup_{t' \leq t} \mathfrak{P}^{t'}, \quad t, t' \in T. \quad (19)$$

4.4. Recopilación de Preferencias

En esta fase, los expertos proporcionan su conocimiento a través de vectores de utilidad que contienen la valoración para cada criterio de los impactos evaluados en uno de los dominios de expresión definidos en el Marco de Heterogéneo de Evaluación.

4.5. Evaluación de Alternativas

La fase de Evaluación de Alternativas puede considerarse la más compleja en los modelos propuestos para el Análisis de Decisión debido a que en ella tienen lugar los procesos de manipulación de la información, en primer lugar para convertirla en datos homogéneos y agregables (Normalización y Unificación) y en segundo lugar para transformar el conjunto

de estos datos en un elemento único representativo de cada alternativa (Agregación) que luego se emplea para presentar los resultados del proceso (Resultados).

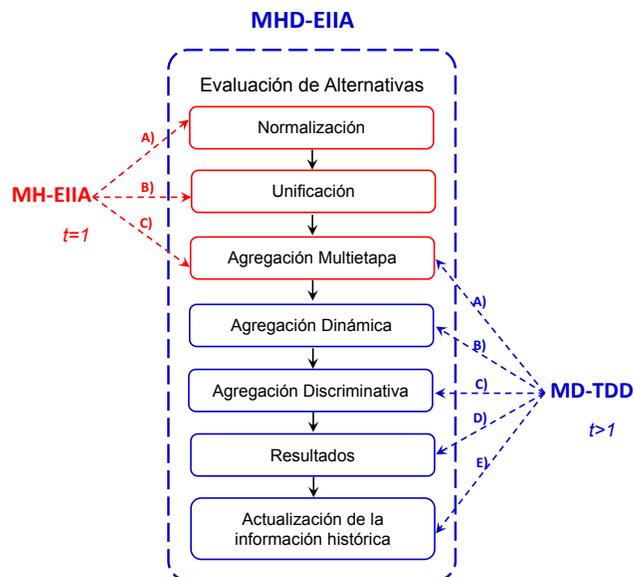


Figura 8: La evaluación de las alternativas en el MHD-EIIA

En el MHD-EIIA se modifica sustancialmente la fase de Evaluación de Alternativas con el propósito fundamental de implementar y formalizar el mecanismo dinámico de retroalimentación entre los períodos. La Figura 8 muestra la relación entre los modelos anteriores propuestos en esta memoria y el MHD-EIIA. Los pasos de Normalización y Unificación se desarrollan según el MH-EIIA.

4.5.1. Agregación Multietapa

Este paso se desarrolla según el paso **A)** del MH-EIIA y de igual manera se busca obtener un valor global de importancia para los proyectos evaluados atendiendo a las valoraciones proporcionadas por el conjunto de expertos. A este valor, $\mathfrak{J}_t(P_i) = (s_g, \alpha_g)$, lo hemos denominado *importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto* debido a que sólo se tienen en cuenta en su obtención, las valoraciones recopiladas en el período de decisión actual. Evidentemente también se corresponde con el paso **A)** del MD-TDD que no es más que el *cálculo de una evaluación no dinámica*.

4.5.2. Agregación Dinámica

Este paso se corresponde con el paso **B)** del MD-TDD y le hemos llamado Agregación Dinámica porque como resultado obtendremos el valor de la *importancia dinámica de los impactos ambientales del proyecto*, $\mathfrak{J}'_t(P_i)$, a través de la siguiente ecuación:

$$\mathcal{J}'_t(P_i) = \begin{cases} \mathcal{J}_t(P_i), & P_i \in \mathfrak{P}^t \setminus \mathfrak{H}_{t-1} \\ \Omega(\mathcal{J}'_{t-1}(P_i), \mathcal{J}_t(P_i)), & P_i \in \mathfrak{P}^t \cap \mathfrak{H}_{t-1} \\ \mathcal{J}'_{t-1}(P_i), & P_i \in \mathfrak{H}_{t-1} \setminus \mathfrak{P}^t. \end{cases} \quad (20)$$

4.5.3. Agregación Discriminativa

Cuando se obtienen valores iguales de $\mathcal{J}'_t(P_i)$, será necesario clacular un Índice Discriminativo Dinámico para diferenciar el desempeño en el tiempo de estos proyectos.

Este paso que hemos denominado Agregación Discriminativa y permitirá obtener los índices según la ecuación:

$$\mathcal{J}^*_t(P_i) = \begin{cases} \mathfrak{D}_t(P_i), & P_i \in \mathfrak{P}^t \setminus \mathfrak{H}_{t-1} \\ \Upsilon(\mathcal{J}^*_{t-1}(P_i), \mathfrak{D}_t(P_i)), & P_i \in \mathfrak{P}^t \cap \mathfrak{H}_{t-1} \\ \mathcal{J}^*_{t-1}(P_i), & P_i \in \mathfrak{H}_{t-1} \setminus \mathfrak{P}^t. \end{cases} \quad (21)$$

donde $\mathfrak{D}_t(P_i)$ es el cambio en el valor de la importancia no dinámica de un proyecto dada por la diferencia entre estos valores en el período anterior y el actual.

4.5.4. Resultados

En la presentación final de los resultados, transformamos la información global sobre los proyectos en una ordenación global de los mismos. Para llevar a cabo esta fase, es necesario definir un criterio que permita establecer un orden entre el conjunto de proyectos evaluados en cada período.

Una vez que se han obtenido los valores de importancia dinámica de cada proyecto, y los índices discriminativos para aquellos cuyas importancias dinámicas coincidan, el conjunto de proyectos evaluados en el período podrá ser ordenado según las siguientes políticas:

1. Si no hay coincidencias en los valores de $\mathcal{J}'_t(\cdot)$, el ranking se obtiene tomando $\mathcal{J}'_t(P_i)$ como criterio de precedencia para todo $P_i \in \mathfrak{P}^t$.
2. Si no, para todo $P_i, P_j \in \mathfrak{P}^t$: $\mathcal{J}'_t(P_i) = \mathcal{J}'_t(P_j)$, el ranking se obtiene tomando $\mathcal{J}^*_t(\cdot)$ como criterio de precedencia para $P_i, P_j \in \mathfrak{P}^t$.

4.5.5. Actualización de la Información Histórica

En este paso debe definirse la política de retención a utilizar para la selección de los proyectos que serán *recordados* en este período en \mathfrak{H}_t .

5. Sistema para la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental

El patrón de arquitectura utilizado ha sido el N-Capas, que divide el procesamiento en niveles independientes que se distribuyen entre el cliente y el servidor. La Figura 9 representa la arquitectura N-Capas basada en el *Spring Framework* que se utilizó en el SEVIIA.

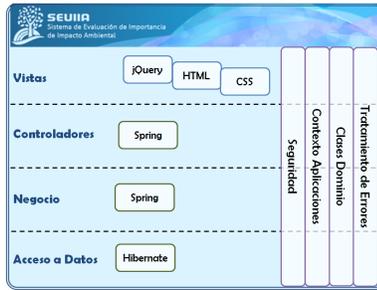


Figura 9: Arquitectura en 4-capas basada en el *Spring Framework*.



Figura 10: Página principal para registrarse en el SEVIIA

5.1. Usuarios y Funcionalidades del SEVIIA

Usuario	Descripción
 <p>Administrador</p>	<p>Este usuario es el encargado de diseñar el proceso de EIIA, es decir, de conformar el Marco Heterogéneo de Evaluación a través de la definición de los conjuntos de acciones y factores de un proyecto, la identificación de los impactos y su naturaleza, los criterios a evaluar, los dominios de información y la correspondencia entre estos últimos elementos.</p>
 <p>Experto</p>	<p>Será el encargado de valorar los impactos de un proyecto que se encuentre a su disposición en el SEVIIA, es decir, tendrá preasignados uno o varios proyectos de los que deberá evaluar los impactos ambientales identificados. Antes de que un experto pueda valorar un impacto deberá estar registrado en el sistema. De esta forma se le presentarán a cada experto, los impactos del proyecto adecuado.</p>

Tabla 7: Usuarios de SEVIIA

SEVIIA ha sido concebido para dos tipos fundamentales de usuarios, Administrador y Experto, que como se verá más adelante, tienen distintas responsabilidades una vez registrados en el sistema. La descripción de ambos usuarios se muestra en la Tabla 7.

Los usuarios pueden acceder al SEVIIA a través de la página principal que se muestra en la Figura 10.

SEVIIA tiene dos módulos que permiten soportar los pasos de cada fase del MH-EIIA. A continuación describiremos brevemente las funcionalidades de cada uno de ellos.

5.1.1. Subsistema Administración

El Subsistema Administración tiene como objetivo la definición y guía de la EIIA y como se muestra en la Figura 11, permite al Administrador de la EIIA definir el Marco Heterogéneo de Evaluación.



Figura 11: Página principal para el Administrador

5.1.2. Subsistema Evaluación

Este subsistema permite a los expertos proveer sus valoraciones respecto a los impactos, soportando así la fase de Recopilación de Preferencias del MH-EIIA. A continuación se describen las funcionalidades:

1. Cambiar contraseña: Los expertos inicialmente entran a la aplicación con el usuario y la contraseña que le entrega el Administrador del sistema. Luego podrán cambiar su contraseña en el menú desplegable de la parte lateral izquierda, donde aparecerán las acciones que este usuario puede realizar.
2. Mostrar proyectos asignados: Como muestra la Figura 12, esta funcionalidad permite al experto desplegar la lista de los proyectos que le han sido asignados para la valoración de los impactos.

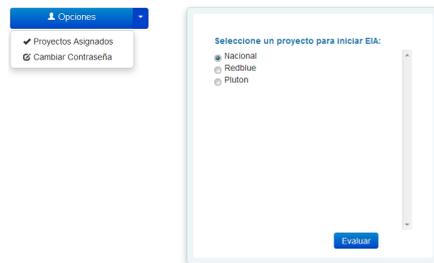


Figura 12: Formulario mostrado al experto para seleccionar un proyecto a evaluar

a) **Evalúe cada impacto**

Acciones / Factores	suelo	biota	aire
Generación de polvos y olores	Evaluar	Evaluar	Evaluar
Generación de desechos	Evaluar	Evaluar	Sin relación
Generación de ruidos	Evaluar	Evaluar	Evaluar

Finalizar

b) **Introduzca su preferencia**

RECUPERABILIDAD	---
EXTENSIÓN	---
INTENSIDAD	---
ENERGÍA	---
PERIODICIDAD	---
EFFECTO	---
ACUMULACIÓN	---
REVERSIBILIDAD	
PERSISTENCIA	
MOMENTO	

Aceptar

Figura 13: Formulario mostrado al experto para la recopilación de sus preferencias

Una vez que el experto ha seleccionado un proyecto, se mostrará su matriz de impactos para que el experto seleccione cada uno de ellos y evalúe cada uno de los criterios para cada impacto, como se muestra en la Figura 13.

6. Valoración de los Resultados Finales

- Con respecto al primer objetivo de la investigación, se realizó un estudio de los fundamentos teóricos de la EIIA, con énfasis especial en el análisis de los métodos convencionales de EIIA, lo que permitió identificar y confirmar por una parte, las limitaciones que estos presentan para modelar la complejidad creciente de los problemas de EIIA, y por otra, también se pudieron mostrar las ventajas de modelar la EIIA como un problema basado en Análisis de Decisión.
- Respecto al manejo y modelado de información heterogénea en EIIA, se ha desarrollado el MH-EIIA, que permite solucionar problemas de EIIA y solventar las limitaciones de modelos convencionales previos, modelando de forma adecuada la incertidumbre relacionada con el proceso; posibilitando el tratamiento de información heterogénea, de acuerdo con el carácter de cada criterio; y obteniendo resultados de mayor interpretabilidad y mejor nivel representatividad del conocimiento, debido a que:
 - El esquema de Análisis de Decisión del MH-EIIA posibilita estructurar el problema de EIIA de manera lógica y clara, fijando el marco en el que se va a realizar la evaluación, recopilando la información necesaria para llevar a cabo la evaluación y, finalmente, obteniendo una valoración global de la importancia del proyecto evaluado y sus elementos.
 - La definición de diferentes dominios de información en el Marco de Heterogéneo de Evaluación, ofrece a los evaluadores una mayor flexibilidad para emitir sus valoraciones, pues estas pueden ser expresadas, de acuerdo a la naturaleza de cada criterio, mediante valores lingüísticos, numéricos o intervalares.

- La integración de información difusa dudosa permite además modelar situaciones de alta incertidumbre donde los expertos pueden dudar entre diferentes valores en el momento de expresar sus preferencias respecto a un impacto ambiental.
 - El empleo de las gramáticas libres de contexto permite a los expertos además, el uso de expresiones lingüísticas comparativas que mejoran la expresividad de los expertos para aportar sus preferencias sobre los criterios para cada impacto cuando dudan entre varios términos lingüísticos.
 - Para el tratamiento de la información heterogénea, el MH-EIIA utiliza la fusión lingüística basada en el Modelo de Representación 2-tupla, lo que permite realizar procesos de Computación con Palabras de forma precisa y obtener resultados de fácil interpretación, siendo este último elemento una premisa fundamental en el éxito de las EIIA.
 - El proceso de ajuste de la importancia de los impactos, empleando las reglas de construcción de una jerarquía lingüística y una función de transformación, permite obtener nuevos valores lingüísticos para la importancia de los impactos ambientales que posibilitan tratar de forma diferenciada los impactos positivos y negativos en una misma escala lingüística.
- En relación con el desarrollo de EIIA en contextos dinámicos, se debe indicar que, el análisis de los distintos enfoques de TDD, permitió identificar que la dificultad principal del enfoque general para TDD está dada por la ausencia de un mecanismo que posibilite diferenciar los cambios en el comportamiento de las evaluaciones de las alternativas en el tiempo.

Por esta razón, primero se desarrolló el MD-TDD que tiene como novedad primordial la definición de un Índice Discriminativo Dinámico que, mediante la utilización de operadores de agregación bipolares definidos en $[-1, 1]$ y asociativos, permite por una parte, modelar comportamientos diferentes respecto a los decrementos e incrementos de la evaluación de una alternativa en diferentes períodos y por otra, manejar tales valores sin necesidad de almacenarlos durante todos los períodos.

Se ha desarrollado además el MHD-EIIA, que proporciona una solución a la necesidad de modelar problemas de EIIA en contextos dinámicos pero sin renunciar al tratamiento preciso de la información heterogénea, debido a que:

- Mantiene un Marco Heterogéneo de Evaluación a lo largo de los múltiples períodos de decisión que se consideren en un problema de EIIA dinámico.
- Mantiene el modelado lingüístico de la información heterogénea.
- Permite, a través del Índice Discriminativo Dinámico, modelar diferentes actitudes con respecto a los cambios de la importancia global de un proyecto en el tiempo.

- Finalmente se ha desarrollado SEVIIA, un software que implementa el MH-EIIA, siendo una herramienta de gran ayuda para los participantes en el proceso de EIIA. Tanto el modelo MH-EIIA como el software SEVIIA, han sido favorablemente empleados y avalados por el CEQA para estudios de impactos ambientales reales, lo que demuestra que se ha obtenido una solución robusta y útil para problemas de EIIA.

Los objetivos que perseguíamos al inicio de esta investigación han sido alcanzados satisfactoriamente a través de las propuestas presentadas.

Referencias Bibliográficas

- [1] A. Blanco, M. Delgado, J.M. Martín, and M.P. Polo, *AIEIA: Software for fuzzy environmental impact assessment*, *Expert Systems with Applications* **36** (2009), no. 5, 9135 – 9149.
- [2] L.A. Bojórquez, E. Ezcurra, and O. García, *Appraisal of environmental impacts and mitigation measures through mathematical matrices*, *Journal of Environmental Management* **53** (1998), no. 1, 91–99.
- [3] G. Boole, *Calculus of finite differences*, Chelsea Publishing, 1970.
- [4] G. Campanella and R. Ribeiro, *A framework for dynamic multiple-criteria decision making*, *Decision Support Systems* **52** (2011), no. 1, 52–60.
- [5] R.T. Clemen, *Making hard decisions: An introduction to decision analysis*, Business Statistics Series, Duxbury Press, 1996.
- [6] V. Conesa, *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, 4ta ed., MundiPrensa, 2010.
- [7] R.M. Darbra, E. Eljarrat, and D. Barceló, *How to measure uncertainties in environmental risk assessment*, *Trends in Analytical Chemistry* **27** (2008), no. 4, 377–385.
- [8] D. Dubois and H. Prade, *An introduction to bipolar representations of information and preference*, *International Journal of Intelligent Systems* **23** (2008), no. 8, 866–877.
- [9] D. Gómez-Orea, *Un instrumento preventivo para la gestión ambiental*, Editorial Agrícola Española SA, 1999.
- [10] M. Grabisch, B. De Baets, and J. Fodor, *The quest for rings on bipolar scales*, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness, and Knowledge-Based Systems* **12** (2004), no. 4, 499–512.
- [11] F. Herrera and L. Martínez, *A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words*, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **8** (2000), no. 6, 746–752.

- [12] F. Herrera and L. Martínez, *A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making*, Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on **31** (2001), no. 2, 227–234.
- [13] F. Herrera, L. Martínez, and P.J. Sánchez, *Managing non-homogeneous information in group decision making*, European Journal of Operational Research **166** (2005), 115–132.
- [14] B. Kontic, *Why are some experts more credible than others?*, Environmental Impact Assessment Review **20** (2000), no. 4.
- [15] D.P. Lawrence, *Environmental Impact Assessment. Practical solutions to recurrent problems and contemporary challenges*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [16] L.B. Leopold, F.E. Clarke, B.B. Hanshaw, and J.R. Balsley, *A procedure for evaluating environmental impact*, ch. US Geological Survey, Circular 645 Elsevier Science, 1971.
- [17] H. Liu and R.M. Rodríguez, *A fuzzy envelope for hesitant fuzzy linguistic term set and its application to multicriteria decision making*, Information Sciences **258** (2014), 220–238.
- [18] K.F.R. Liu and J.H. Lai, *Decision-support for environmental impact assessment: A hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process*, Expert Systems with Applications **36** (2009), no. 3, Part 1, 5119 – 5136.
- [19] B. Loran, *Quantitative assessment of environmental impact*, Journal of Environmental Systems **5** (1975), no. 1, 247–256.
- [20] L. Martínez and F. Herrera, *An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges*, Information Sciences **207** (2012), no. 1, 1–18.
- [21] C. Pastakia and A. Jensen, *The rapid impact assessment matrix (riam) for eia*, Environmental Impact Assessment Review **18** (1998), no. 5, 461–482.
- [22] R. Peche and E. Rodríguez, *Environmental impact assessment by means of a procedure based on fuzzy logic: A practical application*, Environmental Impact Assessment Review **31** (2011), no. 2, 87–96.
- [23] R.M. Rodríguez, L. Martínez, and F. Herrera, *Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **20** (2012), no. 1, 109–119.
- [24] V. Torra, *Hesitant fuzzy sets*, International Journal of Intelligent Systems **25** (2010), no. 6, 529–539.

- [25] E. Triantaphyllou, *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*, Applied Optimization, vol. 44, Kluwer Academic, 2000.
- [26] R.R. Yager, *On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics **18** (1988), no. 1, 183–190.
- [27] ———, *Non-numeric multi-criteria multi-person decision making*, Group Decision and Negotiation **2** (1993), no. 1, 81–93 (English).
- [28] R.R. Yager and A. Rybalov, *A note on the incompatibility of openness and associativity*, Fuzzy Sets and Systems **89** (1997), no. 1, 125–127.
- [29] L.A. Zadeh, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–I*, Information Sciences **8** (1975), no. 3, 199–249.
- [30] ———, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–II*, Information Sciences **8** (1975), no. 4, 301–357.
- [31] ———, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–III*, Information Sciences **9** (1975), no. 1, 43–80.