

NEUTROSOPHIC LOGIC APPLIED TO THE MULTI-CRITERIA EVALUATION OF SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR EARTH-RETAINING WALLS.

Antonio J. Sánchez-Garrido ¹; David Martínez-Muñoz ²; Ignacio J. Navarro ¹; Víctor Yepes ²

ABSTRACT

The sustainable design of infrastructures is one of the key aspects for the achievement of the Sustainable Development Goals, given the recognized magnitude of both the economic and environmental impacts of the construction sector. Multi-criteria decision methodologies allow addressing the sustainable design of infrastructures, simultaneously considering the impact of a design on the different dimensions of sustainability. This article proposes the use of neutrosophic logic to solve one of the main problems associated with decision making: the subjectivity of the experts involved. Through the neutrosophic approach of the AHP multi-criteria methodology and the use of the VIKOR technique, the economic and environmental impacts associated with four earth retaining wall designs are analyzed. In the present assessment, the most sustainable response over its life cycle has been found to be the gabion wall.

Keywords: Sustainability, Retaining walls, Neutrosophic logic, AHP, Multi-criteria decision making

1. INTRODUCCIÓN

Las serias amenazas que se ciernen sobre el planeta obligan a tomar decisiones importantes de cara al futuro. La emergencia climática mundial es una realidad y desde el sector de la construcción debemos ser capaces de concebir los edificios desde una óptica responsable con la sociedad y el medio ambiente. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible adoptados en 2015 por las Naciones Unidas marcan unas metas específicas que se deben alcanzar en 2030. Concretamente el ODS-9 consiste en “construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación” lo cual requiere un cambio de tendencia en las prácticas de diseño convencionales. La construcción se encuentra a nivel mundial entre las principales actividades de estrés ambiental y económico que comprometen nuestra sociedad, siendo la industria del cemento la que genera uno los mayores impactos [1]. Si bien la optimización de materiales en el diseño de las infraestructuras ha sido objeto de estudio en los últimos años [2-4], el ODS-9 supone la necesidad de incorporar en los diseños futuros conceptos complejos como la sostenibilidad o la economía circular [5] para poder alcanzar las metas propuestas para 2030.

¹ Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de València (SPAIN). ajsangar@doctor.upv.es (A.J. Sánchez-Garrido); ignamar1@cam.upv.es (I.J. Navarro).

² Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Universitat Politècnica de València (ESPAÑA). damarmu1@cam.upv.es (D. Martínez-Muñoz, corresponding author); vyepesp@cst.upv.es (V. Yepes).

Con la necesidad de adoptar un enfoque holístico en los problemas de diseño sostenible [6] se recurren a técnicas de toma de decisiones multicriterio (MCDM), las cuales proporcionan un procedimiento racional a las decisiones basadas en cierta información, experiencia y juicio. Sin embargo, en los problemas de la vida real es difícil de aplicar existiendo siempre una incertidumbre en las valoraciones o en las comparaciones entre criterios que suelen ser contradictorios. Esto se complica mucho más cuando el decisor no es a título individual sino que lo forma un grupo cuyos integrantes manifiestan intereses diferentes. Zadeh [7] ya señaló que la capacidad de un individuo para emitir juicios rigurosos y precisos disminuye conforme aumenta la complejidad del problema a tratar. Es por ello que muchos de estos métodos combinan herramientas como la teoría fuzzy, el método de Montecarlo, los números Grey y, más recientemente, la teoría de conjuntos neutrosóficos (NS). Introducida por Smarandache [8] constituye la generalización más avanzada de la lógica difusa y la intuicionista, siendo bastante difícil de aplicar en el ámbito de la ingeniería real, ya que los conjuntos neutrosóficos se definen en subconjuntos reales estándar y no estándar. Solo en los últimos años, la teoría de los conjuntos neutrosóficos ha alcanzado el nivel de desarrollo suficiente como para poder utilizarse de manera práctica en problemas de ingeniería civil, llegándose a aplicar con éxito en el diseño sostenible de puentes [9] y en estructuras de edificación [10].

El presente documento propone un enfoque diferente con el que evaluar la sostenibilidad entre distintas alternativas de diseño para muros de contención, a los que se les aplicó un análisis del ciclo de vida ambiental (ACV-A) en estudios anteriores [11]. Para ello, se utilizan conjuntos neutrosóficos integrados en un proceso de jerarquía analítica grupal (NAHP-G), lo que permite captar la vaguedad e incertidumbre contenida en los juicios emitidos por los responsables de la toma de decisiones. La caracterización de las opiniones mediante números neutrosóficos triangulares (t, i, f) es especialmente importante cuando intervienen un número significativo de criterios, ya que a mayor número de comparaciones se diluye la atención del decisor provocando juicios que, a costa de la credibilidad, resultan menos rigurosos. La respuesta asociada a cada alternativa se obtiene según la metodología ReCiPe, que calcula la puntuación de los impactos en función de tres indicadores ambientales finales, a saber, el daño a los ecosistemas, el agotamiento de los recursos naturales y el daño a la salud humana. El proceso concluye transformando los pesos neutrosóficos a difusos, y éstos a pesos escalares obteniendo así las ponderaciones con la importancia de cada criterio. Por último, se aplica una técnica MCDM con la que agregar los diferentes criterios para evaluar la sostenibilidad de las diferentes alternativas.

Con este trabajo se pretende aumentar el conocimiento en el diseño sostenible aplicado a las estructuras de contención, proponiendo herramientas de apoyo a las técnicas de ponderación para toma de decisiones multicriterio. De la metodología se deriva que trabajar en un entorno neutrosófico permite profundizar en el campo de la subjetividad considerando las incertidumbres no probabilísticas inherentes a la vaguedad del pensamiento humano. De los resultados, se obtiene la captura de mayor información implícita en los juicios, lo que dota a la toma de decisión de robustez, rigor y más fiabilidad en comparación, por ejemplo, con el AHP convencional.

2. METODOLOGÍA

Esta sección describe una extensión neutrosófica del Proceso de Jerarquía Analítica tradicional. Siguiendo la metodología propuesta, las ponderaciones de los criterios se obtienen mediante un AHP neutrosófico de grupo. Los pasos a seguir se explican de forma secuencial a continuación.

2.1. Preliminares sobre el método AHP clásico

El proceso analítico jerárquico (AHP) es un método muy utilizado en el proceso de toma de decisiones para ayudar a seleccionar alternativas en función de ciertos criterios, normalmente jerarquizados, y muchos de los cuales son contradictorios llegando a entrar en conflicto. La técnica requiere que el decisor complete una matriz de comparación, en la que cada elemento a_{ij} representa cuánto más importante o preferible es la alternativa i con respecto a la alternativa j .

La matriz se completa con valores numéricos según la Escala Fundamental de Saaty [12], que permite transformar la percepción de las variables semánticas en una escala progresiva de números reales desde 1/9 a 9. Esta matriz cumple con las propiedades de reciprocidad (si $a_{ij}=x$, entonces $a_{ji}=1/x$); homogeneidad (si i y j son igualmente importantes, $a_{ij}=a_{ji}=1$, y además, $a_{ii}=1$ para todo i).

Para que el método AHP arroje resultados que no contengan contradicciones en las valoraciones realizadas, la matriz de comparación debe ser consistente. La consistencia matemáticamente se obtiene mediante el índice de consistencia:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

donde λ_{max} es el valor propio máximo y n la dimensión de la matriz de decisión. Un valor nulo de este índice corresponde a una consistencia perfecta. Una vez obtenido CI , se calcula la proporción de consistencia (CR) siendo aceptable si no supera los valores de la *Tabla 1*.

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

Tabla 1. Índice aleatorio RI

Número de criterios n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.2. Proceso de jerarquía analítica neutrosófica

2.2.1. Algunos conceptos de los conjuntos neutrosóficos

Los conjuntos neutrosóficos describen la variable x mediante un triple valor $x = (t, i, f)$ donde " t " es el grado de veracidad, " f " es el grado de falsedad, e " i " es el nivel de indeterminación. La lógica neutrosófica es capaz de tratar con contradicciones que son verdaderas y falsas al mismo tiempo ya que la suma de los componentes es cualquier número entre -0 y 3+.

$$A = \{ \langle x, t_A(x), i_A(x), f_A(x) \rangle | x \in X \} \quad (3)$$

$$0 \leq t_A(x) + i_A(x) + f_A(x) \leq 3 \quad (4)$$

Un número neutrosófico triangular de un solo valor $a = \langle (a_1, a_2, a_3); t_a, i_a, f_a \rangle$ en el conjunto de números reales se describe con las siguientes funciones de pertenencia [13]:

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{(x - a_1)}{(a_2 - a_1)} \cdot t_a, & \text{para } a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{(a_3 - x)}{(a_3 - a_2)} \cdot t_a, & \text{para } a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5)$$

$$\nu_a(x) = \begin{cases} \frac{(a_2 - x + i_a \cdot (x - a_1))}{(a_2 - a_1)}, & \text{para } a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{(x - a_2 + i_a \cdot (a_3 - x))}{(a_3 - a_2)}, & \text{para } a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_a(x) = \begin{cases} \frac{(a_2 - x + f_a \cdot (x - a_1))}{(a_2 - a_1)}, & \text{para } a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{(x - a_2 + f_a \cdot (a_3 - x))}{(a_3 - a_2)}, & \text{para } a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (7)$$

Las operaciones aritméticas básicas entre dos números neutrosóficos triangulares de un valor $a = \langle (a_1, a_2, a_3); t_a, i_a, f_a \rangle$ y $b = \langle (b_1, b_2, b_3); t_b, i_b, f_b \rangle$ se definen como [14,15]:

Suma de dos números neutrosóficos triangulares:

$$a + b = \langle (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3); t_a + t_b - t_a t_b, i_a i_b, f_a f_b \rangle \quad (8)$$

Multiplicación de un valor constante por un número neutrosófico triangular:

$$k \cdot a = \langle (ka_1, ka_2, ka_3); 1 - (1 - t_a)^k, (i_a)^k, (f_a)^k \rangle \quad (9)$$

Potencia de un número neutrosófico triangular:

$$a^k = \langle (a_1^k, a_2^k, a_3^k); t_a^k, 1 - (1 - i_a)^k, 1 - (1 - f_a)^k \rangle \quad (10)$$

Multiplicación de dos números neutrosóficos triangulares:

$$a \times b = \langle (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3); t_a t_b, i_a + i_b - i_a i_b, f_a + f_b - f_a f_b \rangle \quad (11)$$

División de dos números neutrosóficos triangulares:

$$a \div b = \langle \left(\frac{a_1}{b_3}, \frac{a_2}{b_2}, \frac{a_3}{b_1} \right); \frac{t_a}{t_b}, \frac{i_a - i_b}{1 - i_b}, \frac{f_a - f_b}{1 - f_b} \rangle \quad (12)$$

Siendo la operación de división es válida solo si $t_a \leq t_b$, $i_a \geq i_b$, $f_a \geq f_b$, $t_b \neq 0$ e $i_b, f_b \neq 1$.

2.2.2. Obtención de la triada neutrosófica

El primer paso consiste en recopilar las matrices de comparación [A] por cada experto. Su intervención se ciñe a realizar comparaciones por pares, asignando valores en relación con la escala de Saaty, entre las categorías de impacto que constituyen los criterios de decisión inicialmente definidos. El proceso se repetirá tantas veces como sea necesario hasta que la matriz de comparación resultante sea consistente, es decir, $CR < 0.10$. Cada decisor debe completar también una matriz [SC] que contiene la certeza expresada en unidades entre 0 y 1 para cada uno de sus juicios.

Obtenidas ambas matrices, ya se puede caracterizar a cada miembro del grupo de expertos, necesario para determinar posteriormente su relevancia dentro del grupo AHP. Basándonos en el procedimiento sugerido por Sodenkamp et al. [16], se proponen las siguientes expresiones para determinar la tríada $\tilde{E}_k = \langle \delta, \theta, \varepsilon \rangle$ asociada al cada experto.

La credibilidad del experto se basa en su experiencia en los campos que se evalúan. Más detalles sobre la parametrización de estas competencias se pueden encontrar en [10].

$$\delta_k = \left(\frac{PA_k}{\max_{k=1 \dots p} \{PA_k\}} + \frac{SE_k}{\max_{k=1 \dots p} \{SE_k\}} + \sum_{i=1}^6 \frac{Kc_i}{5} \right) / 8 \quad (13)$$

La indeterminación puede obtenerse a partir del complementario de los valores de certeza c_{ij} expresados por el decisor, siendo n es el número de criterios a comparar.

$$\theta_k = 1 - \sum_{i,j=1}^n (SC_{ij} / n^2) \quad (14)$$

La incoherencia del experto se determina como la consistencia de sus juicios, medida mediante el ratio de consistencia (CR) de su matriz de comparación, dividida por la consistencia mínima permitida.

$$\varepsilon_k = CR_k / CR_{lim} \quad (15)$$

2.2.3. Construcción de la matriz de comparación AHP neutrosófica

Para reflejar la vaguedad de los juicios emitidos por los decisores, se transforman los valores de las matrices de comparación de los decisores en números neutrosóficos triangulares (NNT) del tipo $\tilde{a}_{ij} = \langle (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}); t_{ij}, i_{ij}, f_{ij} \rangle$. Los valores (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) de cada juicio se definen según la escala de Saaty entre 1/9 y 9. Los valores centrales m_{ij} corresponden a los juicios emitidos por el decisor. En este caso, los valores centrales m_{ij} también se requieren para satisfacer la comprobación de consistencia tal y como lo define Saaty. Los límites inferior y superior l_{ij} y u_{ij} dependen de la certeza del decisor asociada al juicio a_{ij} , y se obtienen como sigue:

$$l_{ij} = m_{ij} - \Delta V_{ij}; \quad u_{ij} = m_{ij} + \Delta V_{ij} \quad (16)$$

donde ΔV_{ij} es el número de saltos en la escala de Saaty a realizar entre el valor central m_{ij} y los correspondientes extremos. El número de saltos se hace depender de la certeza emitida por el experto como se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Pasos en la escala ampliada de Saaty

Certeza a_{ij} (SC_{ij})	Saltos (ΔV_{ij}) en la escala extendida de Saaty
$SC_{ij}=1$	0
$0.8 \leq SC_{ij} < 1$	1
$0.6 \leq SC_{ij} < 0.8$	2
$0.4 \leq SC_{ij} < 0.6$	3
$0.2 \leq SC_{ij} < 0.4$	4
$0 \leq SC_{ij} < 0.2$	5
$SC_{ij}=0$	6

2.2.4. Pesos neutrosóficos

Según la técnica convencional del AHP, los pesos de cada elemento se calculan mediante el método de la media geométrica ponderada:

$$\bar{w}_i = \frac{(\prod_{j=1}^n \bar{a}_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n \bar{a}_{ij})^{1/n}} \quad (17)$$

donde $\bar{w}_i$ es el peso neutrosófico triangular del elemento i , n es el número de elementos a comparar, y $\bar{a}_{ij}$ es el valor de comparación neutrosófica entre los elementos i y j . Las operaciones algebraicas para llevar a cabo el cálculo de los pesos neutrosóficos seguirán la formulación antes presentada (Eq. 8 a 12).

2.2.5. Agregación de pesos (grupo N-AHP)

Para la agregación de los pesos obtenidos por cada experto, se propone caracterizar la relevancia de cada decisor a partir de su tríada neutrosófica $\bar{E}_k = \{\delta_k, \theta_k, \varepsilon_k\}$. La relevancia de cada experto se puede obtener como la distancia entre su punto $\bar{E}_k$ y el punto de máxima fiabilidad neutrosófica $\langle 1,0,0 \rangle$ como sigue:

$$\varphi_k = \frac{1 - \sqrt{\{(1 - \delta_k)^2 + \theta_k^2 + \varepsilon_k^2\}/3}}{\sum_{k=1}^p \left(1 - \sqrt{\{(1 - \delta_k)^2 + \theta_k^2 + \varepsilon_k^2\}/3}\right)} \quad (18)$$

donde p es el número de expertos involucrados en la toma de decisión. Una vez obtenida la relevancia de cada experto, los pesos neutrosóficos resultantes de la agregación descrita se obtienen como:

$$W_{m,i} = \sum_{k=1}^p \varphi_k \cdot w_{m,i}^k \quad (19)$$

$$W_{l,i} = W_{m,i} - \max_{k=1 \dots p} \{w_{m,i}^k - w_{l,i}^k\} \quad (20)$$

$$W_{u,i} = W_{m,i} + \max_{k=1 \dots p} \{w_{u,i}^k - w_{m,i}^k\} \quad (21)$$

donde $W_{m,i}$, $W_{l,i}$ y $W_{u,i}$ son, respectivamente, el valor central, el límite inferior y el límite superior de los pesos neutrosóficos agregados. La Fig. 1 muestra de forma gráfica un peso neutrosófico típico tras un proceso de agregación como el descrito. Es importante destacar que la agregación de pesos triangulares no resulta en un peso triangular.

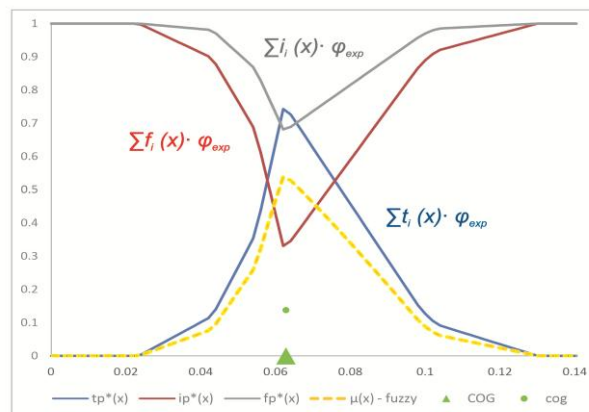


Figura 1. Funciones de pertenencia neutrosóficas asociadas a la agregación de pesos del grupo N-AHP para cada criterio, y envoltive fuzzy.

2.2.6. Deneutrososofización

La deneutrososofización consiste en transformar los pesos neutrosóficos agregados en números clásicos que permitan su interpretación y operabilidad matemática de forma más sencilla. Este proceso consta de dos pasos. El primero de ellos consiste en transformar los pesos neutrosóficos en pesos difusos $\hat{W}_i = \langle (W_{l,i}, W_{m,i}, W_{u,i}); \eta_i \rangle$, donde la función difusa $\eta_i(x)$ se obtiene como sigue:

$$\eta_i(x) = 1 - \sqrt{\{(1 - \mu_i(x)^2) + v_i(x)^2 + \lambda_i(x)^2\}/3}; \quad \forall x \in [W_{l,i}; W_{u,i}] \quad (22)$$

El segundo paso consiste en transformar estos pesos difusos en pesos clásicos. Uno de los métodos más habituales para llevar a cabo dicha conversión consiste en obtener las coordenadas (CoG_x , CoG_y) del centro de gravedad (CoG) de la función difusa $\eta_i(x)$. Conocido el CoG, los pesos expresados en términos de la lógica clásica se pueden obtener como:

$$S_{\hat{W}_i} = CoG_x(\hat{W}_i) \cdot CoG_y(\hat{W}_i) \quad (23)$$

$$W_i^* = S_{\hat{W}_i} / \sum S_{\hat{W}_i} \quad (24)$$

2.3. Selección de la mejor alternativa

2.3.1. VIKOR

Esta técnica MCDM clasifica y determina una solución de compromiso a partir de una serie de alternativas viables en presencia de criterios conflictivos. Una vez compuesta la matriz de decisión que compone el problema, se identifica la solución ideal positiva SIP (A^*) y la solución ideal negativa SIN (A^-) entre los n criterios para cada alternativa, y se normaliza cada puntuación:

$$r_{ij}' = (r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-) \quad (25)$$

A continuación se asignan las ponderaciones (w_i) de cada criterio. El método VIKOR utiliza una medida basada en la unión de métricas L_1 (distancia Manhattan) y L_∞ (métrica máxima o distancia de Chebyshev), para determinar los índices S y R , respectivamente. S utiliza la métrica L_1 que tiene en cuenta la utilidad de grupo de los criterios. R utiliza la métrica L_∞ , que considera el mínimo individual de cada criterio. para encontrar la máxima distancia de la alternativa a la solución ideal, es decir, el peor caso posible:

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_i (r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-) \quad (26)$$

$$R_j = \max [w_i (r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-)] \quad (27)$$

La solución de compromiso será una solución factible cerca de la solución ideal, y por tanto, con la menor distancia posible. La clasificación final se obtiene determinando la distancia relativa de cada alternativa Q_j según la ecuación:

$$Q_j = v \cdot \frac{(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{(R_j - R^*)}{R^- - R^*} \quad (28)$$

donde $S^* = \min S_j$, $S^- = \max S_j$, $R^* = \min R_j$, $R^- = \max R_j$, ponderado a través de un factor estratégico $v \in [0,1]$ que determina la importancia según el balance de cada métrica. En este estudio se ha considerado $v=0.5$.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El método que integra la lógica neutrosófica en la ponderación de los criterios que se presenta aquí se aplica a un problema de toma de decisión basado en la sostenibilidad. El objetivo es discretizar entre las siguientes alternativas constructivas de muros de contención de tierras (Fig. 2):

- Muros en ménsula de hormigón armado (CW) con puntera y talón. Realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 58 kg/m^3 .
- Muros de gravedad (GW). Realizado con hormigón HM-20/P/40/I fabricado en central y vertido desde camión (60% de volumen) y bolos de piedra de 15 a 30 cm de diámetro (40% de volumen).
- Muros de mampostería ordinaria (MW). Realizado con piedra caliza, a una cara vista, recibida con mortero de cemento industrial M-5.
- Muros de gaviones (GM). Realizado a una cara vista, de $2000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}$ de malla electrosoldada, de alambre de acero galvanizado de 4,5 mm de diámetro, con una apertura de malla de $50 \times 100 \text{ mm}$ en las caras vistas y de $100 \times 100 \text{ mm}$ en las caras ocultas; con diafragma intermedio de $1000 \times 1000 \text{ m}$ de malla electrosoldada, de alambre de acero galvanizado de 4,5 mm de diámetro, con una apertura de malla de $100 \times 100 \text{ mm}$; y relleno con medios mecánicos con piedra caliza, de granulometría comprendida entre 70 y 250 mm, con desgaste en el ensayo de Los Ángeles < 50 .

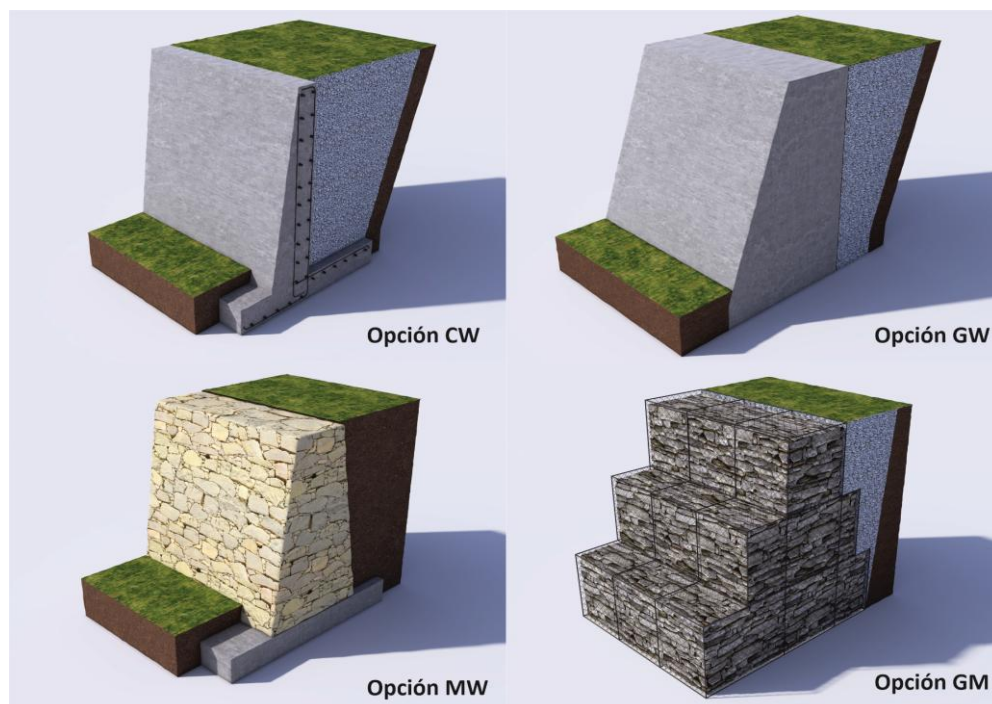


Figura 2. Alternativas de diseño para los muros de contención de tierras.

Los diseños CW y GW tienen como actividades comunes la excavación a cielo abierto bajo rasante, sistema de encofrado según cada tipología. Junto a las dos anteriores, la opción GM comparte como actividad el relleno en trasdós, con tierras seleccionadas procedentes de la propia excavación, y compactación en tongadas sucesivas de 30 cm de espesor máximo con bandeja vibrante de guiado manual, hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 95% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. En el caso de la alternativa MW no se precisa ninguna de las actuaciones anteriores.

El ciclo de vida de los muros de contención de tierras se ha dividido en cuatro fases. La primera es la producción de todos los materiales utilizados para su construcción, incluido su transporte hasta el lugar de la obra. La segunda es la construcción, incluyendo todas las actividades realizadas para su construcción. El tercero es el uso del muro de contención de tierras durante su vida útil de 50 años según el código español para muros de contención de tierras de hormigón [17], sin actividades de mantenimiento. La cuarta es el final de la vida útil de la estructura, incluyendo todas las actividades necesarias para demoler el muro, reciclar el acero y el hormigón y crear un de los restos de tierra y roca. La unidad funcional para este estudio sería un metro lineal de muro para una altura de tierras de 4.00 m.

Para abordar la sostenibilidad del ciclo de vida de los distintos diseños de muros, se propone un conjunto de seis criterios de decisión (*Tabla 3*). Tres de ellos están relacionados con la dimensión económica de la sostenibilidad, e implican considerar, por un lado, los costes derivados de la construcción de los muros, por otro, los costes que resultan del mantenimiento decenal y, por último, los costes de desmantelamiento de la estructura. Los resultados con los costes totales de cada etapa correspondientes a los criterios C1, C2 y C3 se recogen en la matriz de decisión de la *Tabla 8*.

Tabla 3. Criterios considerados en la presente evaluación de la sostenibilidad de MCDM.

Pilar de la sostenibilidad	Criterio	Descripción
Económico	C1 – Costes de construcción	Costes asociados a la producción e instalación de materiales, maquinaria y trabajadores
	C2 – Costes de mantenimiento	Valoración del montante económico que supondría mantener la construcción en los primeros diez años atendiendo a las operaciones de mantenimiento contenidas en el calendario de mantenimiento.
	C3 – Costes de final de vida	Costes asociados a la producción e instalación de materiales, maquinaria y trabajadores implicados en las actividades de demolición y/o de-construcción.
Medioambiental	C4 – Daños en los ecosistemas	Ocupación del suelo, emisión de contaminantes
	C5 – Daños en la salud humana	Emisión de contaminantes causantes de enfermedades respiratorias, cancerígenos
	C6 – Agotamiento de los recursos	Agotamiento de los recursos naturales como consecuencia de las actividades de extracción

Los impactos medioambientales se evalúan en función de la metodología, mundialmente reconocida, ReCiPe (2008) [18]. La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) traduce las emisiones y las extracciones de recursos en un número limitado de puntuaciones de impacto ambiental mediante los llamados factores de caracterización. En este análisis se asume la perspectiva jerárquica como modelo de consenso más común adoptando como criterios los 3 indicadores en los que caracteriza los impactos el enfoque de punto final: daño a la diversidad del ecosistema, el daño a la salud humana y el daño a la disponibilidad de recursos. El análisis del inventario implica la recopilación de los datos de entrada relevantes de energía y materiales necesarios para desarrollar un proceso, es decir, la construcción de un metro lineal de un muro de contención de tierras y la producción de las emisiones al medio ambiente derivadas de su ciclo de vida. Los datos de inventario (*Tabla 4*) se han extraído de investigaciones anteriores [11] en los que se realizaba una comparación estrictamente medioambiental entre los distintos tipos de muros. Como los resultados de esta fuente estaban traducidos a los 18 indicadores de punto medio, en este caso en estudio, se ha tenido que transformar de “midpoint” a “endpoint” con los factores de conversión de la *Tabla 1.5* que figura en ReCiPe (2016) [19]. Los resultados correspondientes a los criterios C4, C5 y C6 se muestran en la matriz de decisión de la *Tabla 8*.

Tabla 4. Impactos de punto medio (ReCiPe) causados por cada alternativa de muro de 4 m de altura

Nº	Acrónimo	Descripción	CW	GW	MW	GM
1	ALO	Agricultural land occupation	206.02	235.21	13.37	36.57
2	GWP	Climate change	907.43	1025.58	915.08	629.23
3	FD	Fossil depletion	266.97	273.24	201.14	198.37
4	FEPT	Freshwater ecotoxicity	11.18	6.11	3.47	3.88
5	FEP	Freshwater eutrophication	0.26	0.21	0.1	0.11
6	HTP	Human toxicity	432.69	258.75	124.92	128.76
7	IRP	Ionizing radiation	145.73	100.56	74.93	59.64
8	MEPT	Marine ecotoxicity	11.19	6.18	3.51	3.99
9	MEP	Marine eutrophication	0.23	0.21	0.18	0.19
10	MD	Metal depletion	221.47	49.78	25.34	80.09
11	NLT	Natural land transformation	-0.92	-0.43	-0.74	-1
12	ODP	Ozone depletion	1.27E-04	1.20E-04	9.71E-05	9.54E-05
13	PMFP	Particulate matter formation	2.4	2.08	2.5	2.62
14	POFP	Photochemical oxidant formation	5.41	4.85	4.62	4.59
15	TAP	Terrestrial acidification	4.35	4.23	3.42	3.45
16	TETP	Terrestrial ecotoxicity	0.14	0.11	0.05	0.34
17	ULO	Urban land occupation	54.23	30.91	19.76	29.54
18	WD	Water depletion	3835.75	2473.66	1485.9	1947.02

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del grupo neutrosófico AHP

La evaluación de la relevancia que debe tener cada uno de los seis criterios establecidos para la toma de decisión sobre la alternativa de diseño más sostenible de muros de contención se realiza mediante el método AHP. La metodología requiere que cada experto rellene una matriz de comparación [A] de 6x6, lo que implica emitir $[6 \cdot (6-1)]/2 = 15$ comparaciones por pares. Por su parte, la matriz de certidumbre [SC] se traducirá en un entorno neutrosófico que tiene en cuenta las incertidumbres no probabilísticas de los juicios emitidos en cada comparación. Este estudio ha contado con un seminario con tres expertos, todos ellos profesionales en activo con una experiencia de entre 2 y 19 años en arquitectura e ingeniería civil. Las *Tablas 5 y 6* contienen respetivamente la matriz [A] y [SC] con los juicios emitidos por el decisor 1 (DM_1). La *Tabla 7* recoge los parámetros que definen los perfiles neutrosóficos de los 3 expertos.

Tabla 5. Matriz de decisión [A] y pesos AHP perteneciente experto DM_1 .

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	$\prod a_{ij}^{(1/n)}$	w
C1	1	1/2	1	2	1/3	1/2	0.742	0.105
C2	2	1	3	1	1/4	1/2	0.953	0.135
C3	1	1/3	1	1/2	1/5	1/3	0.472	0.067
C4	1/2	1	2	1	1/4	1/2	0.707	0.100
C5	3	4	5	4	1	1	2.493	0.353
C6	2	2	3	2	1	1	1.698	0.240

Tabla 6. Matriz de certidumbre [SC] perteneciente experto DM_1 .

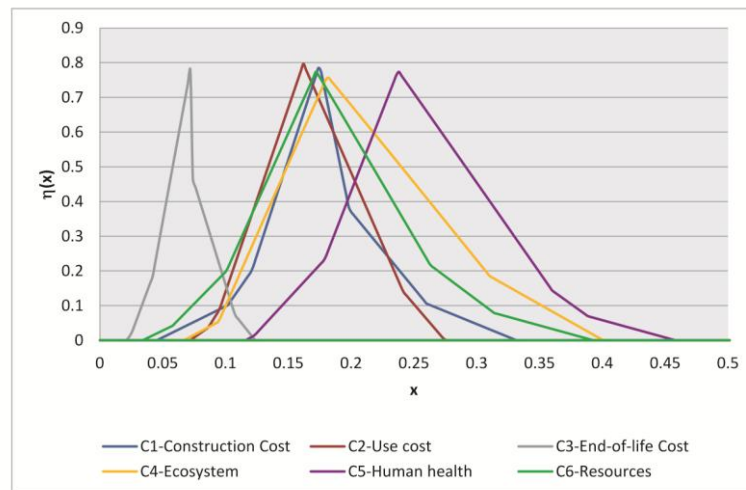
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	0.8	0.9	0.4	0.7	0.6
C2	0.8	1	0.8	0.3	0.6	0.5
C3	0.9	0.8	1	0.5	0.7	0.6
C4	0.4	0.3	0.5	1	0.3	0.4
C5	0.7	0.6	0.7	0.3	1	0.8
C6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.8	1

Tabla 7. Caracterización neutrosófica de los expertos

Parámetros	DM ₁	DM ₂	DM ₃
Credibilidad del experto. Pertenencia a la verdad (δ)	0.700	0.678	0.488
Confianza media expresada	0.661	0.744	0.667
La certeza del experto. Pertenencia a la indeterminación (θ)	0.339	0.256	0.333
Coefficiente de coherencia de la matriz de comparación	0.044	0.016	0.031
Incongruencia del experto. Pertenencia a la falsedad (ε)	0.439	0.163	0.308

Las matrices de cada decisor se transforman en matrices triangulares de números neutrosóficos (NNT) que definen los intervalos de los juicios emitidos, según la *Tabla 2*, a partir de la matriz de certeza [SC] resultante de los juicios de cada experto. Siguiendo los pasos de la metodología descrita en la Subsección 2.2.3 y 2.2.4, se obtienen las ponderaciones NNT de cada decisor para cada uno de los 6 criterios.

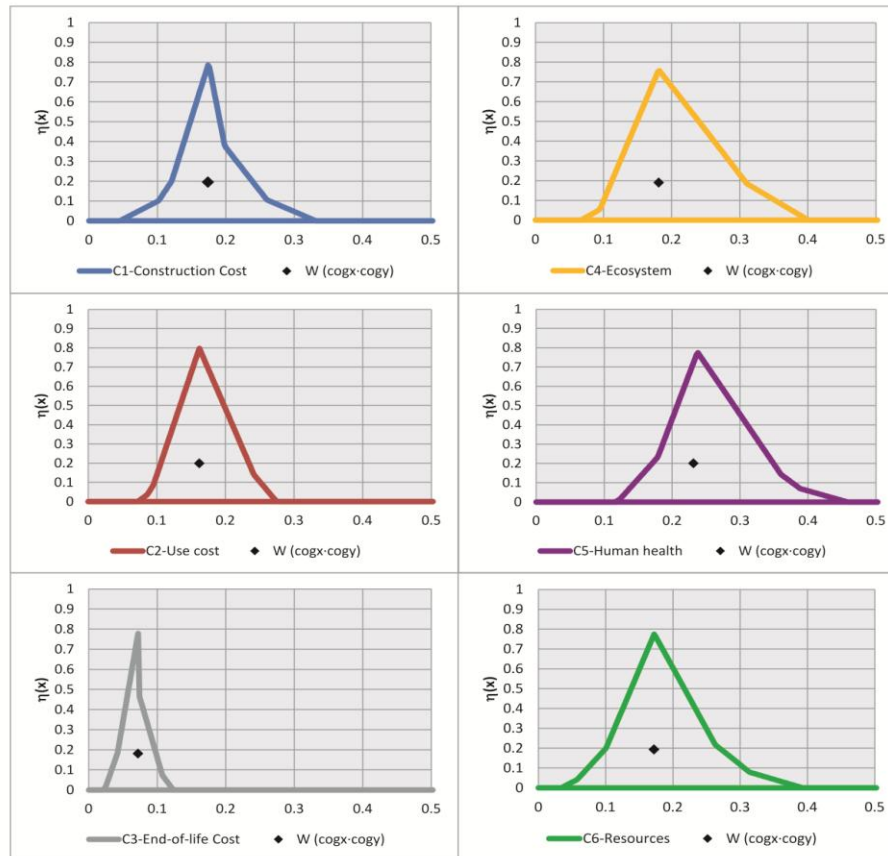
Una vez asignada la relevancia particular de la valoración de cada experto, según el apartado 2.2.5, se agregan las ponderaciones neutrosóficas individuales. Para obtener los pesos escalares, se aplica la técnica de deneutrososificación y defuzzificación conforme a las Eq. 22 a 25. En la Fig. 3 se representa la superposición de las funciones fuzzy $\mu(x)$ comparando todos los criterios tras la deneutrososificación. La Fig. 4 muestra también el peso escalar de cada criterio después de aplicar el método de defuzzificación [20] para los números difusos generalizados.

**Figura 3.** Funciones fuzzy asociadas a los pesos de todos los criterios derivados de cada matriz de comparación AHP.

Para contrastar las ponderaciones obtenidas, se recurre a los puntos medios de la NNT, que equivalen a la ponderación según el AHP tradicional, comparándolas como referencia con las anteriores para cada criterio (*Tabla 8*). Los resultados demuestran que las incertidumbres no probabilísticas influyen en las ponderaciones obtenidas, con desviaciones en los criterios más subjetivos de hasta el 7.10% si se compara con un AHP convencional. Según los juicios de los expertos, la relevancia de los impactos económicos y ambientales corresponde a una proporción de 2:3. Los pesos de los criterios, tras la deneutrososificación, han resultado en general bastante equilibrados en torno al 17%, salvo el coste del final de vida con un 6.7 %. Destaca el indicador ambiental de daños a la salud humana como el más relevante con un 24%.

Tabla 8. Ponderaciones de los 6 criterios tras la defuzzificación y comparación con el AHP convencional.

Método	Referencia	C1	C2	C3	C4	C5	C6
AHP	$m_{\text{criterio } (i)}$	0.175	0.162	0.073	0.181	0.237	0.172
Deneutrosofización	$W^*_{(\text{COGx-COGy})}$	0.176	0.167	0.067	0.178	0.240	0.172
$W^*_{(\text{COGx-COGy})}$	vs $m_{\text{criterio } (i)}$	-0.37%	-2.99%	+7.10%	+1.65%	-1.24%	+0.17%



Pesos escalares defuzzificados

W^*_{C1}	W^*_{C2}	W^*_{C3}	W^*_{C4}	W^*_{C5}	W^*_{C6}
0.175	0.167	0.067	0.178	0.240	0.172

Figura 4. Resultados de los pesos agregados para cada criterio tras la deneutrosofización.

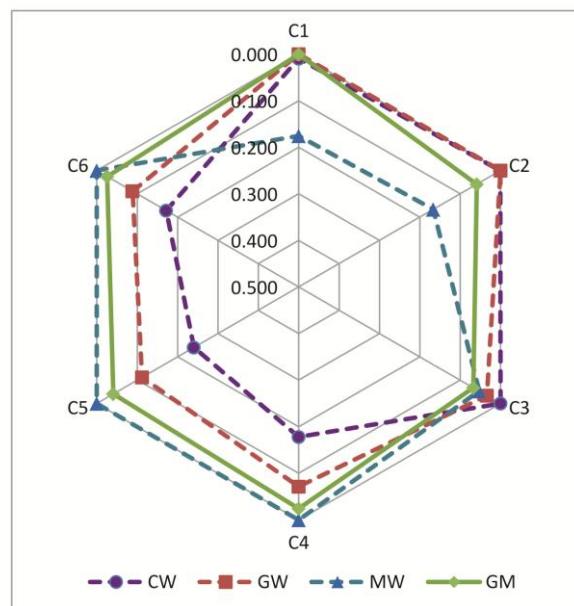
4.2. Resultados de sostenibilidad

Incorporando las ponderaciones escalares de cada criterio obtenidas en la *Tabla 8*, se aplica la técnica multicriterio VIKOR para agregar las 6 categorías de impacto diferentes en una única puntuación de sostenibilidad para cada una de las opciones de diseño de muro de contención que se van a comparar. Con VIKOR, la alternativa más cercana al punto ideal se obtiene clasificando las soluciones (Eq. 26 a 29) para seleccionar la mejor de ellas (*Tabla 9*), siendo mejor el valor más próximo a 0.

De la metodología se observa que aunque el muro de mampostería (MW) genera los menores impactos ambientales globales, la alternativa de muro de gaviones (GM) es la que mejor se comporta en términos de sostenibilidad debido al balance entre todos sus criterios. Esto se puede apreciar gráficamente en la Fig. 5 que muestra cómo la alternativa GM distribuye las puntuaciones de forma más uniforme sin tener la mayor en ninguno de los criterios.

Tabla 9. Resultados MCDM y selección de mejor alternativa mediante la técnica N-VIKOR.

Criterio óptimo	Valor óptimo [+] Valor pésimo [-]				Pesos NSs	Distancia normalizada y ponderada ¹			
	CW	GW	MW	GM		CW	GW	MW	GM
C1 (Min.)	867.55	806.83+	1907.77–	809.40	0.176	0.0097	0	0.1755	0.0004
C2 (Min.)	15.35	13.73+	286.18–	109.97	0.167	0.0010	0	0.1668	0.0589
C3 (Min.)	269.14+	742.46	1015.31	1213.31–	0.067	0	0.0338	0.0533	0.0674
C4 (Min.)	1.22E-02–	8.57E-03	6.11E-03+	6.95E-03	0.178	0.1781	0.0714	0	0.0244
C5 (Min.)	6.03E-05–	4.15E-05	2.50E-05+	3.10E-05	0.240	0.2403	0.1122	0	0.0406
C6 (Min.)	1.74E+02–	1.37E+02	9.84E+01+	1.10E+02	0.172	0.1719	0.0884	0	0.0258
Distancia Manhattan					S_j	0.601	0.306	0.396	0.218
Distancia ∞					R_j	0.240	0.112	0.176	0.067
PUNTUACIÓN FINAL ¹					Q_j	CW	GW	MW	GM
					Q_{j5}	1	0.245	0.545	0

¹ Mejor cuanto menor distancia

Figura 5. Resultados de la evaluación de la sostenibilidad comparando los criterios entre los 4 tipos de muro.

5. CONCLUSIONES

Los muros de contención de tierras son una de las estructuras más frecuentemente empleadas en la construcción tanto de obras civiles como de edificación. Este estudio evalúa el rendimiento de la sostenibilidad entre cuatro tipologías dispares de muros para una altura habitual de contención de tierras de 4 metros. El análisis del ciclo de vida (ACV) con un enfoque “de la cuna a la tumba” considera los impactos económicos y medioambientales asociados a las etapas de producción, construcción, uso y final de vida. Se ha supuesto una vida útil de 50 años sin necesidad de mantenimiento. Para determinar la sostenibilidad asociada a cada alternativa, comparando los resultados de un enfoque bidimensional económico-ambiental, se ha utilizado un método MCDM. Concretamente, se ha escogido la técnica VIKOR, basada en la distancia, con la que se han agregado las 6 categorías diferentes de impacto (criterios) en la evaluación final.

Para la determinación de la relevancia particular de cada criterio, se ha aplicado un AHP de grupo. Sin embargo, dada la naturaleza conflictiva de los criterios de sostenibilidad, las comparaciones por pares del AHP suelen ser complejas e inciertas. Para profundizar en las incertidumbres no probabilísticas que conllevan las técnicas de ponderación subjetiva, se ha partido de un enfoque neutrosófico para la determinación de las ponderaciones del AHP del grupo de expertos. Este procedimiento ha permitido detectar además qué criterios tienen una mayor carga de subjetividad o que generan mayores incertidumbres. En nuestro caso, el coste del final del ciclo de vida (C3) con un +7.10 % de peso respecto de un AHP convencional.

Incorporar la lógica neutrosófica a la investigación ha permitido dotar los resultados de robustez y rigor al capturar las incertidumbres no probabilísticas asociadas a la vaguedad del pensamiento humano, dando así cuenta de la valiosa información derivada de la consideración de la fiabilidad de los juicios asociada a la credibilidad, inconsistencias e indeterminaciones del decisor. Del estado del arte se deduce que, aunque la mayoría de las evaluaciones de sostenibilidad se basan en el enfoque tradicional, los investigadores están empezando a utilizar perspectivas basadas en la intuición para captar las incertidumbres no probabilísticas asociadas a la información cognitiva en los problemas complejos de toma de decisiones. Sin embargo, la teoría de los conjuntos neutrosóficos aún no se ha utilizado en las evaluaciones de sostenibilidad y mucho menos aplicado a ingeniería ni arquitectura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Empresa (Proyecto: BIA2017-85098-R) y del Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto: PID2020-117056RB-I00), junto con los fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Ozawa, L. (2001). Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment* 26, 303-329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- [2] Martínez, F.J., González-Vidoso, F., Hospitaler, A., Yepes, V. (2010). Heuristic Optimization of RC Bridge Piers with Rectangular Hollow Sections. *Computers & Structures*, 88(5-6), 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.11.009>
- [3] Payá-Zaforteza, I., Yepes, V., González-Vidoso, F., Hospitaler, A. (2010). On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45(5), 693-704. <https://doi.org/10.1007/s11012-010-9285-0>
- [4] Molina-Moreno, F., García-Segura; Martí, J.V., Yepes, V. (2017). Optimization of Buttressed Earth-Retaining Walls using Hybrid Harmony Search Algorithms. *Engineering Structures*, 134, 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.042>
- [5] Torres-Machí, C.; Chamorro, A., Pellicer, E., Yepes, V., Videla, C. (2015). Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making. *Transportation Research Record*, 2523, 56-63. <https://doi.org/10.3141/2523-07>
- [6] Sánchez-Garrido, & Yepes, V. (2020). Multi-criteria assessment of alternative sustainable structures for a self-promoted, single-family home. *Journal of Cleaner Production* 258, 120556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120556>

- [7] Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 3, 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- [8] Smarandache, F. (1999). *A unifying field in logics, neutrosophy: Neutrosophic probability, set and logic*, p.157. Publisher: American Research Press, Rehoboth. [ISBN 978-1-59973-080-6](https://doi.org/10.1109/ISBN.1999.73-080-6)
- [9] Navarro, I.J., Yepes, V., & Martí, J.V. (2020). Sustainability assessment of concrete bridge deck designs in coastal environments using neutrosophic criteria weights. *Structure and Infrastructure Engineering* 16 (7), 949–967. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1676791>
- [10] Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., & Yepes, V. (2021). Neutrosophic multi-criteria evaluation of sustainable alternatives for the structure of single-family homes. *Environmental Impact Assessment Review* 89, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106572>
- [11] Pons, J.J., Penadés-Plà, V., Yepes, V., & Martí, J.V. (2018). Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production* 192, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.268>
- [12] Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*; Publisher: McGraw-Hill, New York.
- [13] Deli, I. & Subas, Y. (2017). A ranking method of single valued neutrosophic numbers and its applications to multi-attribute decision making problems. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics* 8, 1309–1322. <https://doi.org/10.1007/s13042-016-0505-3>
- [14] Ye, J. (2017). Subtraction and Division Operations of simplified neutrosophic sets. *Information* 8, 51–58. <https://doi.org/10.3390/info8020051>
- [15] Liang, R., Wang, J. & Zhang, H. (2018). A multi-criteria decision-making method based on single-valued trapezoidal neutrosophic preference relations with complete weight information. *Neural Computing and Applications* 30, 3383–3398. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2925-8>
- [16] Sodenkamp, M. A., Tavana, M., & Di Caprio, D. (2018). An aggregation method for solving group multi-criteria decision-making problems with single-valued neutrosophic sets. *Applied Soft Computing* 71, 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.020>
- [17] Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.
- [18] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. The Hague: Ministerie van Volkshuisvesting, 2009.
- [19] Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & Van Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- [20] Chu, T. & Tao, C. (2002). Ranking fuzzy numbers with an area between the centroid point and original point. *Computers & Mathematics with Applications* 43, 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00277-2](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00277-2)