

METODOLOGÍA PARA VALORAR LA SOSTENIBILIDAD CON BAJA INFLUENCIA DE LOS DECISORES

V. Penadés-Plà¹, V. Yepes², T. García-Segura³

ABSTRACT

The goal of achieving sustainable structures involves a set of criteria that are usually opposed. This leads to the need to create a decision-making process. In every decision-making process there are subjective assessments that depend on the decision-maker. This is why decision-makers become an important part of the process because of their subjective assessment. This paper proposes a methodology in which the subjective assessment of the decision-maker in the assessment of sustainability in structures is reduced. Different processes are applied to reduce uncertainty in decision-making processes. In the first place the analysis of main components is applied, in the second place the optimization based on kriging, and finally the AHP method. All this is applied to a continuous concrete deck of beams for pedestrian walkways to achieve sustainable designs, reducing the complexity in making decisions on the most sustainable solution.

Keywords: Post-tensioned concrete. Box-girder bridge; Sustainability assessment; Kriging; Principal Component Analysis; Decision-making; Robust design

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de los proyectos de ingeniería ha sido tradicionalmente obtener estructuras con el menor coste posible. No obstante, en los últimos años, la preocupación por los aspectos medio ambientales y sociales en la sociedad ha generado que exista una tendencia hacia la construcción de estructuras sostenibles. Esta tendencia ha sido apoyada en diferentes trabajos [1–5] que proporcionan criterios para el desarrollo de los tres pilares principales de la sostenibilidad: pilar económico, pilar medio ambiental y pilar social [4,6]. Así pues, el diseño de estructuras sostenibles implica evaluar una serie de criterios que cubran todas las perspectivas de sostenibilidad, principalmente agrupadas en estos tres pilares principales. Por lo tanto, es necesario normalizar y asignar una importancia relativa a cada criterio, lo cual implica proceso de toma de decisiones [7,8]. Los métodos de toma de decisiones multi-atributos (*Multi-Attribute Decision-Making, MADM*) se han utilizado en la evaluación de la sostenibilidad en diferentes tipologías constructivas. Algunos trabajos han realizado un estado del arte de diferentes MADM utilizados y criterios considerados en los problemas de evaluación de la sostenibilidad de las estructuras [9,10]. Algunos de estos métodos de toma de decisiones se han aplicado para evaluar un índice de sostenibilidad de diferentes estructuras o elegir la estructura más sostenible entre diferentes alternativas [5,11–14].

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Universitat Politècnica de València (España) vipepl2@cam.upv.es (Corresponding autor).

² Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Universitat Politècnica de València (España) vyepesp@cst.upv.es.

³ Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València (España) tagarse@upv.es.

Los principales pasos en el proceso de toma de decisiones para la valoración de la sostenibilidad son: (1) la elección de los criterios que representen adecuadamente la sostenibilidad, (2) la proposición de las diferentes alternativas, (3) la evaluación de las alternativas según los criterios (los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos), normalización y asignación de pesos relativos, y finalmente (d) la selección de la mejor alternativa. Una vez propuestos los criterios y las alternativas, la evaluación de los criterios cualitativos y la asignación de la importancia relativa de los diferentes criterios implican evaluaciones subjetivas. Esto causa que la evaluación de la sostenibilidad podría ser diferente en función de las preocupaciones de los decisores. Por esta razón, la creación de una metodología que logre una estructura sostenible que satisfaga los diferentes intereses de los responsables de la toma de decisiones sería de gran valor. Por lo tanto, es necesario estudiar cómo estas diferentes perspectivas de los diferentes decisores afectan al diseño de las estructuras.

Para este fin se ha utilizado el análisis de componentes principales (ACP) [15], la optimización basada en kriging [16] y el método AHP [17] para buscar soluciones sostenibles, eliminando la relación entre criterios dependientes y asegurando la obtención de una solución sostenible frente a las diferentes perspectivas de los responsables de la toma de decisiones. El ACV se utiliza para evitar la evaluación de un grupo de criterios con un alto índice de correlación. De esta forma, los criterios con un alto índice de correlación se agrupan en componentes principales, evitando inflar (positiva o negativamente) la valoración sostenible de las alternativas. La optimización basada en Kriging se utiliza para obtener la alternativa más sostenible según cada perspectiva diferente. Debido al gran número de optimizaciones que se deben realizar para llevar a cabo este estudio, la optimización basada en kriging es la más adecuada debido a su alta velocidad de cálculo [18]. Finalmente, el método de toma de decisiones AHP se utiliza para generar muchos pesos relativos aleatorios consistentes para estudiar la variabilidad de cada una de las alternativas frente todas las diferentes perspectivas posibles. Además, el problema de la dependencia de criterios, destacado en varios trabajos [19,20], se resuelve gracias a la independencia lineal de los componentes principales.

En este trabajo, el primer objetivo es estudiar la influencia de la incertidumbre en los problemas de toma de decisiones y obtener las alternativas sostenibles que mejor representen los diferentes intereses de los decisores. El segundo objetivo es determinar la alternativa sostenible que mejor satisfaga las diferentes perspectivas, independientemente de los intereses de los responsables de la toma de decisiones. Para ello, se ha considerado la evaluación de la sostenibilidad de una pasarela peatonal continua de tres vanos de hormigón con sección en cajón. Esta estructura fue elegida por su gran comportamiento estructural, baja carga muerta y condiciones de construcción. Para ello, se consideró un conjunto de criterios para cubrir todas las perspectivas de sostenibilidad del puente, teniendo en cuenta todo su ciclo de vida. De esta manera, se puede realizar una evaluación completa de la sostenibilidad.

2. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

La estructura considerada es un tablero continuo de hormigón para puentes peatonales con tres vanos continuos de 40-50-40 metros de longitud. El ancho del tablero del puente peatonal (B) es de 3 metros. Las otras dimensiones geométricas que definen la sección transversal del tablero del puente peatonal son variables (Figura 1): canto (h), anchura inferior (b), anchura de la inclinación del alma (d), espesor de la losa superior (e_s), espesor de la sección exterior en voladizo (e_v), espesor de la losa

inferior (e_i) y espesor de la losa del alma (e_a). La longitud del enlace interno (t) se obtiene siguiendo la recomendación de Schlaich y Scheff [21] (Eq. 1).

$$t = \max \left\{ \frac{e_i}{2}, e_a \right\} \quad (1)$$

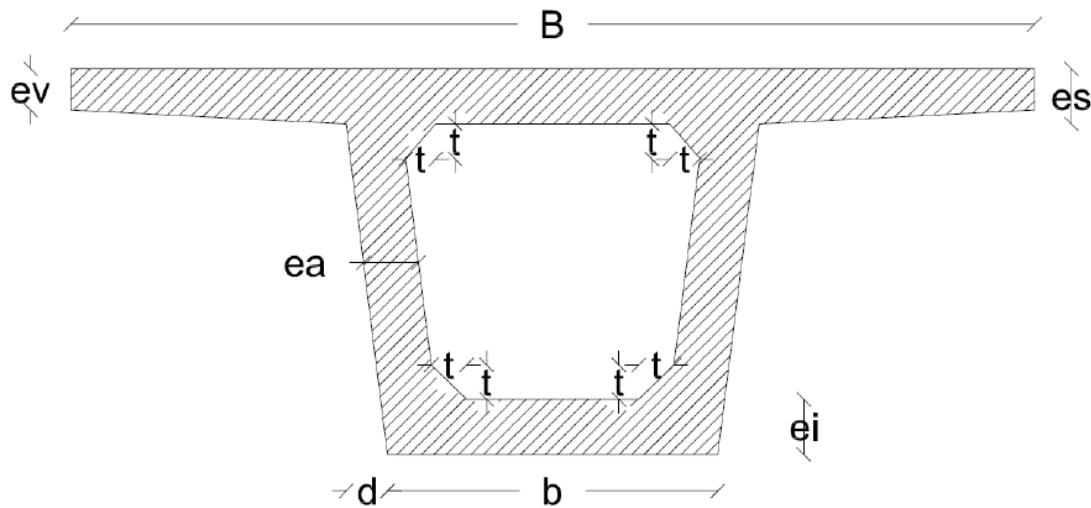


Figura 1. Sección transversal del puente

Además, la resistencia del hormigón (f_{ck}) se considera una variable. El acero pretensado está formado por tendones de 0,6 pulgadas y pretensado a 195,52 kN, y las vainas están distribuidas simétricamente a través de las bandas con una disposición parabólica. La excentricidad máxima se localiza dónde el momento de flexión es el mínimo o máximo (Figura 2), donde la distancia de las vainas a la superficie es de 0,2 metros. Además, la distancia entre los pilares y el punto de inflexión de acero pretensado es del 5% de la longitud de cada vano.

La posición de la armadura pasiva se determina según la figura 3. El refuerzo longitudinal se define por el número de barras por metro y su diámetro, situadas en la losa superior (LRn1, LRØ1), las alas (LRn2, LRØ2, LRn3, LRØ3), las almas (LRn4, LRØ4), la losa inferior (LRn5, LRØ5) y el núcleo interior (LRn6, LRØ6). Además, se considera armadura de refuerzo a flexión. La primera armadura de refuerzo cubre la losa superior de la zona de apoyo (LRØ7) con el mismo número de barras por metro que LRn1, y la segunda armadura de refuerzo cubre la losa inferior en el resto del vano exterior (LRØ8) y el vano central (LRØ9) con el mismo número de barras por metro que LRn5. El refuerzo transversal se define por el diámetro del refuerzo estándar (TRØ1, TRØ2, TRØ3, TRØ4, TRØ5, TRØ6, TRØ7) y la distancia (TRS).

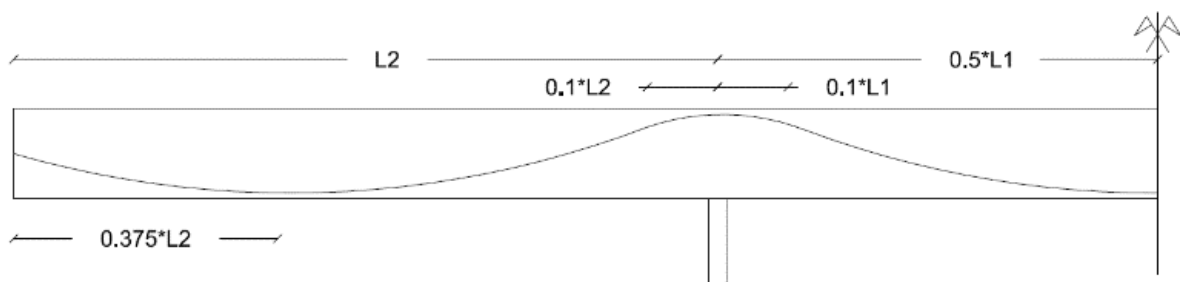


Figura 2. Trazado de cables de acero pretensado

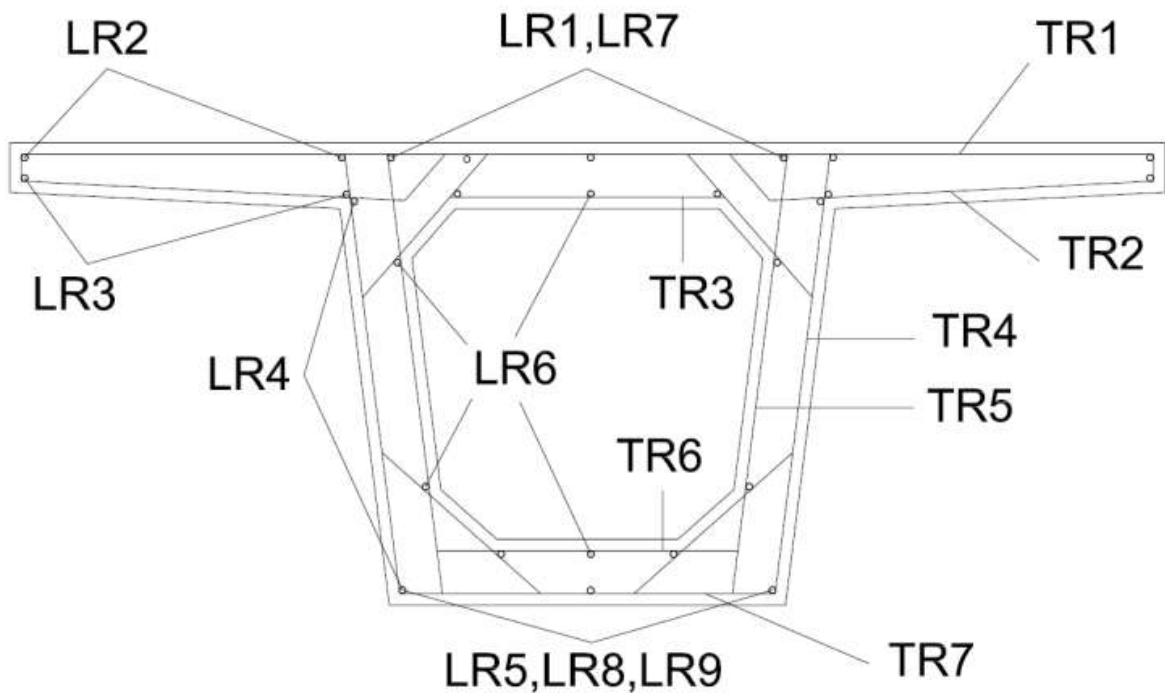


Figura 3. Armadura pasiva

3. METODOLOGÍA

En esta sección se explica la metodología utilizada para llevar a cabo este trabajo.

3.1. Criterios y evaluación del ciclo de vida

El objetivo de este trabajo es alcanzar el diseño más sostenible para un puente peatonal de hormigón con sección en cajón según ocho variables: Siete variables geométricas (h , b , e_v , e_s , e_a , e_i , d) que definen la sección transversal del puente y la resistencia del hormigón (f_{ck}). Para ello, el primer paso es definir aquellos criterios que abarcan todas las perspectivas de la evaluación de la sostenibilidad a lo largo de todo su ciclo de vida. La Figura 4 muestra todos los criterios considerados.

Se ha utilizado una revisión previa de los criterios utilizados para la evaluación de la sostenibilidad de los puentes [9] como base para la selección de los criterios considerados en este trabajo. La revisión muestra un alto consenso para evaluar el aspecto económico, en el que el coste total es el criterio más utilizado. En este trabajo se ha valorado la parte económica a partir de la información proporcionada por la base de datos del BEDEC [22]. La revisión del aspecto medioambiental muestra que es común utilizar uno o dos criterios para definir el impacto medio ambiental (normalmente el CO_2 y la energía). Sin embargo, para obtener un perfil ambiental completo, es necesario considerar un conjunto de criterios que representen un impacto medio ambiental completo [23]. Para ello, se ha utilizado el método de evaluación de impacto ambiental ReCiPe [24], utilizando la información proporcionada por la base de datos Ecoinvent [25] y procesada mediante el software OpenLCA. De esta manera, se ha obtenido una valoración medio ambiental completa considerándose todos los impactos ambientales [26–28]. Por último, la revisión muestra que el aspecto social es el más confuso.

Existe poco acuerdo en la definición de los criterios que mejor representan el aspecto social. Se han utilizado criterios como el tiempo de desvío, el polvo y el ruido en diferentes trabajos [4,29,30]. La mayoría de estos criterios están asociados a las diferentes actividades de construcción y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del puente. Por esta razón, se considera el tiempo de inactividad como criterio único que engloba todos los criterios que surgen durante las actividades de construcción y mantenimiento.



Figura 4. Criterios de sostenibilidad

Al final de la evaluación del puente, cada criterio tiene unidades diferentes. Por lo tanto, para la evaluación de la sostenibilidad global del puente, es necesario normalizar estos criterios para su posterior agregación. Para ello, se ha aplicado una normalización lineal a los diferentes criterios. Para facilitar la agregación de los criterios para llevar a cabo la evaluación de sostenibilidad global, el mejor valor normalizado de cada criterio será 0 y el peor será 1. Por lo tanto, en el caso de que el mejor valor de los criterios sea el más bajo, se utilizará la ecuación 2. De lo contrario, si el mejor valor es el más alto, se utilizará la ecuación 3.

$$v_i = \frac{(x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (2)$$

$$v_i = \frac{(x_{max} - x_i)}{(x_{max} - x_{min})} \quad (3)$$

Además, se define una muestra inicial de puentes peatonales. Para ello se utilizó el muestreo de hipercubo latino según Penadés-Plà et al. [18]. El hipercubo latino fue propuesto por McKay et al. en 1979 [31]. Este método determina un número N de intervalos no solapados para cada variable, dividido según una distribución uniforme, a partir de una serie de variables de diseño (v) y un tamaño de muestra (N). Por lo tanto, el espacio de diseño se divide en regiones N^v. Este método garantiza que cada punto de la muestra se encuentre en una de estas regiones, por lo que cada intervalo de cada rango de variables de diseño sólo es ocupado para un punto de la muestra. En consecuencia, el hipercubo latino garantiza que todas las variables de diseño están representadas por sus respectivos rangos. En este trabajo, se ha considerado un tamaño de muestra inicial de 500 puentes peatonales. Estos puentes tienen ocho variables (la resistencia del hormigón y siete variables geométricas). La resistencia del hormigón (f_{ck}) oscila entre 35-100 MPa. El canto (h) oscila entre 1,25 y 2,5 metros, la anchura de la losa inferior (b) entre 1,2 y 1,8 metros, la anchura de la inclinación del alma (d) entre 0 y

0,4 metros, el espesor de la losa del alma (e_a) entre 0,3 y 0,6 metros y el resto de los espesores de losa (e_v , e_s , e_i) entre 0,15 y 0,4 metros.

3.2. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es un procedimiento estadístico que permite convertir un conjunto de posibles criterios correlacionados en un conjunto de variables linealmente independientes llamadas componentes principales [15]. Este trabajo utiliza el ACP para disminuir los cinco criterios originales en un conjunto de componentes principales. Esto evita valorar excesivamente (positiva o negativamente) algunos puentes debido a su alta correlación de los criterios sostenibles.

El primer paso en el ACP es obtener el total de la varianza explicada por las componentes principales para cada criterio original (Tabla 1). Esto es representado por las comunalidades después de la extracción. Algunos autores [32,33] indican que para un tamaño de muestra superior a 300 las comunalidades después de la extracción deben ser superiores al 50%. La segunda columna de la tabla 1 muestra que todos los criterios tienen comunalidades muy superiores al 50%, explicándose prácticamente todo el problema con las componentes principales.

Tabla 1. Comunalidades

	Initial	Afer extraction
Coste	1	0.999
Human Health	1	0.999
Ecosystem	1	0.978
Resources	1	0.973
Tiempo de inactividad	1	0.999

En la tabla 2 se muestra la varianza total que puede explicarse por cada componente principal. La primera componente principal es el que explica la mayor variabilidad del análisis. La segunda tiene la segunda mayor variabilidad explicada, y así sucesivamente. En este caso, la primera componente principal explica el 59.070% del análisis, la segunda el 39.88%, y a partir de la tercera menos de un 1%. La suma de las dos primeras componentes principales hacen un total de 98.95%, es decir, casi la totalidad. Existen dos enfoques diferentes para determinar el número de componentes principales a considerar. Por un lado, Kaiser [34] declaró que todas las componentes principales que tienen un valor propio superior a uno deben ser consideradas. Por otro lado, el número de componentes principales que deben considerarse son aquellas que explican más que una porción específica de la variabilidad del análisis. En este caso, las dos primeras componentes principales tienen valores propios superiores a uno y explican más del 95% de la variabilidad del análisis.

Tabla 2. Varianza total explicada

Componente principal	Autovalores iniciales			Suma de cargas al cuadrado de la rotación		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	2.953	59.070	59.070	2.953	59.070	59.070
2	1.994	39.880	98.950	1.994	39.880	98.950
3	.050	.998	99.948			
4	.002	.035	99.982			
5	.001	.018	100.000			

Finalmente, se obtuvo la correlación entre los criterios originales y los componentes principales. De esta manera, el valor de las tres primeras componentes principales puede calcularse como una combinación lineal de los criterios originales. La tabla 3 muestra la matriz de componentes principales, en la que se muestran las correlaciones entre todas las variables originales de cada componente principal. Algunos autores [32] afirman que las cargas significativas son aquellas con una correlación superior a 0,4, y que las cargas inferiores a 0,4 pueden ser excluidas.

Tabla 3. Matriz de componente

	Componente	
	1	2
Cost		0.935
Human Health	0.988	
Ecosystem	0.965	
Resources	0.986	
Downtime		0.976

3.3. Optimización basada en kriging

El propósito de los metamodelos es construir un modelo matemático aproximado de un modelo simulado detallado, que predice la respuesta a partir de las variables de diseño. Una vez establecido el modelo matemático aproximado, todos los cálculos realizados con metamodelos son mucho más eficientes que los del modelo simulado detallado. Penadés-Plà et al. [18] compararon una optimización heurística convencional con una optimización heurística basada en kriging utilizando un algoritmo de recocido simulado mostrando una reducción del tiempo utilizando en la optimización heurística basada en kriging superior al 90% en comparación con la optimización heurística convencional. Además, la mayor parte del tiempo consumido por la optimización heurística basada en kriging se debió al cálculo del tamaño inicial de la muestra. Todo ello alcanzando soluciones similares a la optimización heurística convencional.

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la incertidumbre en la toma de decisiones y obtener las alternativas sostenibles que mejor representen las diferentes perspectivas de sostenibilidad. Para ello, se ha propuesto un problema de optimización que representa el puente más sostenible según las diferentes perspectivas de sostenibilidad. El puente más sostenible se ha definido como un índice de agregación (índice de sostenibilidad) en el que se han asignado diferentes pesos relativos a cada componente principal (que está correlacionado con las variables originales), como se

muestra en la ecuación 4. De esta manera, se puede obtener el puente más sostenible de acuerdo a cada perspectiva. En este trabajo se han generado 1000 perspectivas diferentes al azar. Por lo tanto, se han definido y se han llevado a cabo 1000 problemas de optimización diferentes. Debido al alto costo computacional requerido para cubrir todas estas optimizaciones, el modelo kriging es la mejor opción debido a su alta eficiencia computacional.

$$I = w_1.PC_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + w_2.PC_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

$$g_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0 \quad (5)$$

donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables de diseño.

De esta forma, se generan un total de 1000 conjuntos de peso relativo aleatorio (w_1, w_2). Cada uno de estos conjuntos de pesos relativos proporciona un índice de sostenibilidad diferente para cada puente de acuerdo con la ecuación 4, variando la superficie kriging generada. Por lo tanto, la optimización de cada uno de estos conjuntos de pesos relativos da el puente más sostenible de acuerdo con cada conjunto de peso relativo. Esta optimización tiene como objetivo obtener el puente más sostenible (Eq. 4) satisfaciendo las restricciones (Eq. 5) que garantizan los estados límite de servicio y los estados límite últimos (ELU y ELS). Además, se verifican los requisitos geométricos y de constructibilidad, siguiendo la normativa española para este tipo de estructuras [35,36], así como los Eurocódigos [37,38]. De esta manera, se obtuvieron un total de 1000 diseños de pasarelas peatonales sostenibles de acuerdo a 1000 diferentes perspectivas de sostenibilidad.

3.4.AHP

Una vez obtenido el conjunto de puentes sostenibles, los responsables de la toma de decisiones deben elegir uno de acuerdo con sus preferencias. El método AHP fue desarrollado por Saaty en la década de 1970 [39], convirtiéndose en uno de los métodos de toma de decisiones más populares debido a su facilidad de uso. Muchos trabajos han utilizado el método AHP para diferentes problemas de toma de decisiones [5,6,40]. En este trabajo se han considerado tres componentes principales que representan todos los criterios de sostenibilidad, por lo que el método AHP es válido para este estudio. El peso relativo de cada componente principal se obtiene mediante la comparación por pares. Saaty [17] propuso una escala fundamental para llevar a cabo la comparación entre los diferentes criterios (Tabla 4).

Tabla 4. Escala fundamental de Saaty

Intensidad	Definición	Explicación
1	Importancia igual	Ambos elementos contribuyen por igual
3	Importancia moderada	Un elemento es moderadamente favorecido sobre el otro
5	Importancia fuerte	Un elemento es fuertemente favorecido sobre el otro
7	Importancia muy fuerte	Un elemento es muy fuertemente favorecido sobre el otro
9	Importancia extrema	Un elemento es extremadamente favorecido sobre el otro

Una vez que el responsable de la toma de decisiones ha realizado las comparaciones por pares, se evalúa la consistencia de la matriz de toma de decisiones. Esto se hace para detectar contradicciones en la evaluación de los responsables de la toma de decisiones. La consistencia se obtiene por medio

del índice de consistencia, IC (Eq. 6), donde λ_{max} es el vector propio máximo y N es la dimensión de la matriz de toma de decisiones. Un índice de consistencia de 0 significa una consistencia total. Después de esto, se calcula el ratio de consistencia, CR (Eq. 7), con valores aceptables por debajo del 10%.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Una vez verificada la consistencia, se obtienen las ponderaciones para cada criterio de esta matriz de toma de decisiones (Eq. 8).

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (8)$$

La comparación por pares que se ha explicado anteriormente se refiere únicamente a la evaluación de un único responsable de la toma de decisiones. Si diferentes tomadores de decisiones participan en el mismo problema de toma de decisiones, cada tomador de decisiones creará una matriz de toma de decisiones diferente que genera diferentes pesos relativos para los criterios y, en consecuencia, un índice final de sostenibilidad diferente, lo que provoca la selección de una alternativa diferente. En este trabajo se estudia cómo esta incertidumbre afecta a diferentes muestras en el mismo problema de toma de decisiones. Con este fin, se han generado 1.000 responsables de la toma de decisiones aleatorias para tener en cuenta todas las diferentes preferencias de los responsables de la toma de decisiones.

4. RESULTADOS

En este trabajo, el procedimiento descrito en el apartado 3 ha conducido a una única solución, que se elige independientemente de las preferencias de los responsables de la toma de decisiones. Esta solución es el puente más sostenible según los criterios iniciales considerados. De esta manera, es posible reducir un gran conjunto de soluciones a las más sostenibles, facilitando la selección final por parte del decisor, o incluso evitándola. Además, independientemente de la decisión final del responsable de la toma de decisiones, el puente elegido será un puente sostenible. En este trabajo, el hipercubo latino generó un conjunto inicial de 500 puentes peatonales de hormigón de sección en cajón. A continuación, se obtuvo un gran conjunto de puentes sostenibles que cubren todas las perspectivas de la sostenibilidad mediante el ACP y la optimización basada en kriging. Finalmente, se generaron 1000 decisiones aleatorias usando el método AHP, y cada una de estas decisiones conduce a un puente de acuerdo a las preferencias. En este caso, este proceso permite reducir los primeros 500 puentes peatonales de sección en cajón aleatorios a una solución que se consideran el más sostenible independientemente de las preferencias de los responsables de la toma de decisiones. Este puente peatonal sostenible corresponde a aquel cuyas variables de sección son $b=1,2$ m, $h=1,25$ m, $d=0$ m, $ev=0,15$ m, $es=0,15$ m, $ea=0,35$ m, $ei=0,15$ m, y $fck=60$ MPa. Esta solución tiene un coste de 164179.89 euros, un tiempo de inactividad nulo debido a procesos de mantenimiento, y un impacto medio ambiental correspondiente a 5551.51 puntos de HH, 2331.24 puntos de E, y 7627.06 puntos de R.

Además, cada puente peatonal de viga de caja tendrá 1000 índices de sostenibilidad diferentes según los 1000 responsables de la toma de decisiones aleatorias. Por lo tanto, es posible obtener la media de todos estos para ver el valor de sostenibilidad global. Así pues, además de la solución anterior se pueden obtener la clasificación de las soluciones optimizadas por índice de sostenibilidad. En la tabla 5 se muestran las 3 soluciones más sostenibles siguiendo los criterios de este trabajo.

Tabla 5. Mejores soluciones sostenibles

	b	h	d	ev	es	ea	ei	fck	t	Coste	Human Health	Ecosystem	Resource	Tiempo Inactividad
Solucion 1	1200	1250	0	150	150	350	150	60	150	164179.89	5551.51	2331.24	7627.06	0
Solucion 2	1200	1250	50	150	150	350	150	60	150	164495.24	5566.22	2346.01	7608.06	0
Solucion 3	1200	1400	0	150	150	350	150	60	150	170393.64	5870.69	2463.36	8173.19	0

5. CONCLUSIONES

En el sector de la construcción, existe una tendencia actual hacia la mejora de la sostenibilidad debido al gran impacto de las estructuras en el contexto económico, medioambiental y social. Sin embargo, la evaluación de la sostenibilidad es un proceso complejo que implica un gran número de alternativas, criterios y responsables de la toma de decisiones que hacen una evaluación subjetiva de la importancia de los diferentes criterios en función de sus perspectivas o intereses. Por esta razón, este trabajo muestra una metodología que puede reducir la participación del tomador de decisiones, e incluso evitarla, para la selección de la alternativa más sostenible. De esta manera, la alternativa final puede considerarse una solución sostenible, independientemente de los intereses del responsable de la toma de decisiones.

Esta metodología se ha aplicado para la selección de una pasarela peatonal de hormigón de sección en cajón teniendo en cuenta la evaluación de su ciclo de vida completo. Para ello, se definió en primer lugar un conjunto de criterios que representaban el objetivo de sostenibilidad y se calculó un conjunto aleatorio de puentes. Para evitar la alta correlación de algunos criterios, se utilizó el ACP. Luego, se aplicó la optimización basada en kriging para alcanzar el puente más sostenible de acuerdo con 1000 pesos relativos aleatorios. De esta manera, se cubren todas las perspectivas de sostenibilidad. Finalmente, se generaron 1000 decisores aleatorias utilizando el método AHP para seleccionar los puentes preferidos de acuerdo con las diferentes perspectivas del decisor. Cada uno de estos decisores aleatorios escoge el puente más sostenible de acuerdo con sus intereses, reduciendo el conjunto de alternativas elegibles. Después de este proceso, las 500 alternativas de la muestra inicial se redujeron a una sola solución sostenible. De esta manera, en este caso la participación del decisores se evita. La solución obtenida se considera la más sostenible independientemente de los criterios del decisor. Además, se puede obtener un ranking de las soluciones más sostenibles de acuerdo con los criterios utilizados.

En el caso de este trabajo, todas las perspectivas tienden a la misma solución. Esto se debe al número bajo de criterios y que existe una relación entre ellos. No obstante, esta metodología es igualmente válida para casos mucho más complejos en los que intervienen un número mayor de criterios y altamente contradictorios. En estos casos esta metodología incluso es más útil debido a la dificultad para un decisor de valorar una gran cantidad de criterios. Por lo tanto, la metodología propuesta

resulta más válida cuanto más complicada es el proceso de toma de decisiones, reduciendo así la gran dificultad que entrañe este tipo de procesos con una gran valoración de componentes subjetivas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad español, así como la financiación del FEDER (Proyecto: BIA2017-85098-R).

REFERENCIAS

- [1] García-Segura T, Yepes V. Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO₂ emissions, and safety. *Engineering Structures* 2016;125:325–36. doi:10.1016/j.engstruct.2016.07.012.
- [2] Zastrow P, Molina-Moreno F, García-Segura T, Martí J V., Yepes V. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: A parametric study. *Journal of Cleaner Production* 2017;140:1037–48. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.085.
- [3] García-Segura T, Yepes V, Alcalá J, Pérez-López E. Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges. *Engineering Structures* 2015;92:112–22. doi:10.1016/j.engstruct.2015.03.015.
- [4] Gervásio H, Simões Da Silva L. A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications* 2012;39:7121–31. doi:10.1016/j.eswa.2012.01.032.
- [5] Pan N-F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction* 2008;17:958–65. doi:10.1016/j.autcon.2008.03.005.
- [6] Aghdaie MH, Zolfani SH, Zavadskas EK. Prioritizing constructing projects of municipalities based on AHP and COPRAS-G: A case study about footbridges in Iran. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2012;7:145–53. doi:10.3846/bjrbe.2012.20.
- [7] Hwang CL, Yoon K. *Multiple attribute decision making: Methods and Applications*. 1981.
- [8] Zavadskas E., Kaklauskas A, Turskis Z, Tamošaitienė J. Multi-attribute decision-making model by applying grey numbers. *Institute of Mathematics and Informatics, Vilnius* 2009;20:305–20.
- [9] Penadés-Plà V, García-Segura T, Martí J, Yepes V. A review of multi-criteria decision-making methods applied to the sustainable bridge design. *Sustainability* 2016;8:1295. doi:10.3390/su8121295.
- [10] Sierra LA, Yepes V, Pellicer E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production* 2018;187:496–513. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.022.
- [11] Yehia S, Abudayyeh O, Fazal I, Randolph D. A decision support system for concrete bridge deck maintenance. *Advances in Engineering Software* 2008;39:202–10. doi:10.1016/j.advengsoft.2007.02.002.
- [12] Kripka M, Yepes V, Milani C, Kripka M, Yepes V, Milani CJ. Selection of sustainable short-span bridge design in Brazil. *Sustainability* 2019;11:1307. doi:10.3390/su11051307.

- [13] García-Segura T, Penadés-Plà V, Yepes V. Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production* 2018;202:904–15. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.177.
- [14] Salas J, Yepes V, Salas J, Yepes V. VisualUVAM: A decision support system addressing the curse of dimensionality for the multi-scale assessment of urban vulnerability in Spain. *Sustainability* 2019;11:2191. doi:10.3390/su11082191.
- [15] Hotelling H. Relations between two sets of variates. *Biometrika* 1936;28:321–77. doi:10.2307/2333955.
- [16] Cressie N. The origins of kriging. *Mathematical Geology* 1990;22:239–52. doi:10.1007/BF00889887.
- [17] Saaty RW. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* 1987;9:161–76. doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [18] Penadés-Plà V, García-Segura T, Yepes V. Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. *Engineering Structures* 2019;179:556–65. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.11.015.
- [19] Begicevic N, Divjak B, Hunjak T. Comparison between AHP and ANP: Case Study of strategic planning of E-learning implementation. *Development* 2007;1:1–10.
- [20] Görener A. Comparing AHP and ANP: An application of strategic decisions making in a manufacturing company. *International Journal of Business and Social Science* 2012;3:194–208.
- [21] Schlaich J, Scheef H. Concrete box-girder bridges. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, Switzerland: 1982.
- [22] Catalonia Institute of Construction Technology. BEDEC PR/PCT ITEC material database 2016.
- [23] Laurent A, Olsen SI, Hauschild MZ. Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental Science & Technology* 2012;46:4100–8. doi:10.1021/es204163f.
- [24] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, Schryver A De, Struijs J, Zelm R Van. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment which comprises harmonised category indicators at midpoint and at the endpoint level. Netherlands: 2009. doi:10.029/2003JD004283.
- [25] Ecoinvent Center. Ecoinvent v3.3 2016.
- [26] Penadés-Plà V, Martí J V., García-Segura T, Yepes V, Penadés-Plà V, Martí J V., et al. Life-Cycle Assessment: A Comparison between Two Optimal Post-Tensioned Concrete Box-Girder Road Bridges. *Sustainability* 2017;9:1864. doi:10.3390/su9101864.
- [27] Pons JJ, Penadés-Plà V, Yepes V, Martí J V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production* 2018;192:411–20. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.268.
- [28] Navarro IJ, Yepes V, Martí J V., González-Vidosa F. Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks. *Journal of Cleaner*

- Production 2018;196:698–713. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.110.
- [29] Sabatino S, Frangopol DM, Dong Y. Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude. *Engineering Structures* 2015;102:310–21. doi:10.1016/j.engstruct.2015.07.030.
- [30] Chen Z, Abdullah AB, Anumba CJ, Li H. ANP experiment for demolition plan evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management* 2013;140:51–60. doi:10.1061/(ASCE)CO.
- [31] McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 1979;21:239–45. doi:10.1080/00401706.1979.10489755.
- [32] Field A. *Discovering statistics using SPSS (2nd Edition)*. London, England: Sage; 2005.
- [33] Kaiser HF. An index of factorial simplicity. *Psychometrika* 1974;39:31–6. doi:10.1007/BF02291575.
- [34] Kaiser HF. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement* 1960;20:141–51. doi:10.1177/001316446002000116.
- [35] Ministerio de Fomento. EHE-08: Code on structural concrete. Madrid, Spain: 2008.
- [36] Ministerio de Fomento. IAP-11: Code on the actions for the design of road bridges. Madrid, Spain: 2011.
- [37] European Committee for Standardisation. EN 1991-1-5:2003. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions. Brussels, Belgium: 2003.
- [38] European Committee for Standardisation. EN1992-2:2005. Eurocode 2: Design of concrete structures- Part 2: Concrete Bridge-Design and detailing rules. Brussels, Belgium: 2005.
- [39] Saaty TL. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: 1980.
- [40] Chou J-S, Pham A-D, Wang H. Bidding strategy to support decision-making by integrating Fuzzy AHP and regression-based simulation. *Automation in Construction* 2013;35:517–27. doi:10.1016/j.autcon.2013.06.007.