

02-032

ANP-BASED SUSTAINABILITY-ORIENTED INDICATOR FOR BRIDGES IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Navarro, Ignacio J. (1); Martí, José V. (1); Yepes, Víctor (1)

(1) Universitat Politècnica de València

This paper presents a sustainability indicator for evaluating bridge infrastructure based on the use of the Analytical Network Process (ANP). A sensitivity analysis of the results is presented, discussing the application of the conventional AHP and more general ANP procedures. Formulating the decision problem quantitatively, the ANP method has yielded results with more than twice the consistency of the AHP technique for the same decision problem, proving to be more reliable by simplifying the expert's paired comparisons.

Keywords: ANP; Sustainability; AHP; Life cycle assessment; Bridge

INDICADOR DE SOSTENIBILIDAD BASADO EN ANP PARA PUENTES EN ENTORNOS AGRESIVOS

La presente comunicación presenta un indicador de sostenibilidad para la evaluación de las infraestructuras de puentes basado en el uso del Proceso Analítico en Red (ANP). Se presenta un análisis de sensibilidad sobre los resultados, discutiendo la aplicación del AHP convencional y de los procedimientos ANP más generales. Formulando el problema de decisión de forma cuantitativa, el método ANP ha arrojado resultados con una consistencia de más del doble que la obtenida mediante la técnica AHP frente al mismo problema de decisión, resultando ser más fiable al simplificar las comparaciones pareadas del experto.

Palabras clave: ANP; Sostenibilidad; AHP; Análisis de ciclo de vida; Puente

Correspondencia: Víctor Yepes. Correo: vyepesp@cst.upv.es

Agradecimientos: Grant PID2020-117056RB-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by “ERDF A way of making Europe”.



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El sector de la construcción es uno de los sectores que mayores impactos negativos generan en el medioambiente, siendo responsable además de una importante cantidad de los gastos presupuestarios anuales de casi cualquier nación. Sin embargo, el sector de la construcción ofrece, al mismo tiempo, una manera muy eficiente para incrementar el bienestar social y económico de los países a través del desarrollo de infraestructuras. Es por ello que la evaluación de la contribución de las infraestructuras a la sostenibilidad ha suscitado un gran interés desde el establecimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en 2015. El diseño de infraestructuras que contribuyan eficazmente al desarrollo del futuro sostenible que reclama la sociedad se está convirtiendo en una prioridad y un gran reto para los ingenieros y arquitectos, que se encuentran ahora ante la responsabilidad de encontrar un equilibrio entre los impactos positivos y negativos generados en los ámbitos económico, ambiental y social de las infraestructuras que diseñan. Un ejemplo de ello son las investigaciones sobre el diseño estructural que se han llevado a cabo recientemente teniendo en cuenta un enfoque sostenible para diversos tipos de infraestructuras, como puentes (Peng et al., 2022; García-Segura et al., 2018), edificios (Tighnavard Balasbaneh et al., 2022; Sánchez-Garrido et al., 2022) o muros de contención de tierras (Molina-Moreno et al., 2017), entre otros.

Sin embargo, encontrar este balance entre impactos positivos y negativos no es en absoluto sencillo, ya que su cuantificación implica la consideración de criterios de muy distinta naturaleza y que muchas veces entran en conflicto entre sí. Una forma cada vez más aceptada para afrontar el problema del diseño sostenible consiste en entenderlo como un problema de toma de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés). Estos métodos constan de varios pasos, el primero y más relevante de los cuales suele ser la determinación del peso que cada criterio va a tener en la toma de decisión final. La obtención de estos pesos se basa habitualmente en la experiencia del decisor y en su visión general del problema a evaluar. Para poder convertir dicha visión del decisor en un conjunto cuantitativo de pesos se emplea el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) desarrollado por Thomas L. Saaty (1980). De acuerdo con esta metodología, el decisor debe hacer comparaciones pareadas juzgando la relevancia relativa de cada criterio con respecto a cada uno de los demás empleando una escala de valores cerrada conocida con el nombre de escala fundamental de Saaty.

Uno de los principales inconvenientes de esta metodología es que, siendo absolutamente decisivas y condicionantes en la decisión final, los pesos que resultan de su aplicación son completamente subjetivos. Esto implica que la objetividad de la decisión resultante puede verse limitada por las denominadas incertidumbres no probabilísticas asociadas a la capacidad del decisor para reflejar de forma coherente su visión del problema al llevar a cabo las comparaciones por pares. El efecto de dichas incertidumbres en la decisión final resulta especialmente crítico al tratar problemas complejos, como el de la sostenibilidad, en los que intervienen gran cantidad de criterios muy distintos y difíciles de comparar. Esto se debe a que cuanto más complejo sea el problema de decisión a evaluar, y cuanto mayor sea el número de criterios involucrados en él, menor es la capacidad del decisor para hacer juicios precisos y coherentes (Radwan et al., 2016). Es por ello que durante las últimas décadas se ha investigado para captar eficazmente la visión del problema por parte del decisor y reflejarla en una ponderación de criterios lo más precisa posible. Una manera de minimizar la incertidumbre no probabilista consiste en la reducción de la complejidad del problema para aumentar la consistencia del decisor. Una tendencia popular para simplificar el problema de toma de decisiones consiste en reducir el número de comparaciones pareadas a realizar, facilitando así que el decisor emita juicios que resulten consistentes (Navarro et al., 2021).

El llamado Proceso Analítico de Redes (ANP, por sus siglas en inglés) puede suponer una herramienta especialmente útil en este sentido (Saaty, 1996). Esta metodología es una extensión del método AHP que permite tomar en consideración las relaciones que puedan

existir entre los distintos criterios, generando y teniendo en cuenta una verdadera red de influencias entre ellos a la hora de tomar la decisión final. Por ello, el ANP ha surgido como un procedimiento de toma de decisiones adecuado para abordar los problemas relacionados con la sostenibilidad (Pourmehdi et al., 2021; Ocampo et al., 2015; Andrade Arteaga et al., 2020), ya que permite captar adecuadamente la complejidad de las relaciones que pueden existir entre los criterios que definen los problemas de diseño sostenible. La utilidad de esta metodología radica precisamente en que, si el problema de decisión está adecuadamente formulado, el ANP puede servir como una herramienta muy eficaz para simplificar el problema de decisión, ya que puede dar lugar a menos comparaciones, y más comprensibles, que podrían ser más fáciles de abordar por el decisor, resultando en juicios más consistentes y, por lo tanto, más fiables.

En la presente comunicación se muestra cómo el ANP puede conducir a tales resultados cuando se utiliza para determinar los pesos de un conjunto de criterios cuantitativos. En este caso, se utiliza un conjunto de nueve criterios relacionados con la sostenibilidad para determinar la alternativa de diseño de una determinada infraestructura que más contribuya a la sostenibilidad. La infraestructura elegida para este estudio es un puente de hormigón situado cerca de la costa, por lo que está expuesta a un entorno agresivo que conllevará un mantenimiento importante. Se analiza la sostenibilidad y el desempeño a lo largo del ciclo de vida de cinco diseños alternativos diferentes mediante la técnica ANP. A continuación, se compara los resultados obtenidos con los derivados de la determinación de los pesos mediante la técnica AHP convencional.

2. Metodología

2.1 Fundamentos del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

La metodología AHP es una herramienta para la toma de decisión multicriterio desarrollada por Thomas L. Saaty en la década de los años '80 (Saaty, 1980). Este método se utiliza para determinar la importancia relativa que tiene cada uno de los criterios o alternativas que intervienen en un determinado problema de toma de decisión a partir de comparaciones pareadas. Dichas comparaciones se expresan en la llamada Escala Fundamental de Saaty, que permite convertir un conjunto cerrado de 9 valores semánticos en 9 enteros numéricos que van del 1 al 9. Estos valores semánticos expresan diferentes niveles de cuán relevante se considera un criterio respecto a otro, siendo 1 equivalente al juicio "A y B son igualmente importantes", y siendo 9 equivalente al juicio "A es extremadamente más importante que B". Los restantes valores intermedios entre 1 y 9 sirven para expresar niveles intermedios de comparación. Así, se pide a los expertos que participan en el proceso de toma de decisiones que comparen la importancia de los criterios o alternativas eligiendo para cada comparación sólo una de las 9 alternativas semánticas de la escala fundamental.

Utilizando la escala fundamental de Saaty, se puede construir una matriz de comparación cuadrada. Cada elemento a_{ij} de la matriz corresponde al valor numérico del juicio emitido por cada experto al comparar la relevancia del criterio i con el criterio j . Cabe señalar que esta matriz es recíproca, lo que significa que, si el criterio A se considera más importante que el criterio B, entonces el criterio B debe ser menos importante que el criterio A en la misma medida. Matemáticamente, esto implica que si $a_{ij} = x$, entonces $a_{ji} = 1/x$. El método AHP permite obtener el peso de cada criterio como los valores del vector propio correspondiente al mayor valor propio de la matriz de comparación.

Para que las ponderaciones resultantes sean matemáticamente válidas, el método de Saaty requiere que la matriz de decisión sea consistente, es decir, que los juicios que el decisor ha realizado al construir la matriz de decisión sean coherentes entre sí. El procedimiento para

medir dicha consistencia es mediante el cálculo del llamado Índice de Consistencia (*IC*) de la matriz de decisión:

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

Donde *n* es el número de criterios que intervienen en el problema de decisión, y λ_{max} es el mayor valor propio de la matriz de comparación. A partir del valor de *IC* obtenido, se puede obtener un Ratio de Consistencia (*CR*) dividiendo *IC/RI*, donde *RI* es un índice aleatorio que expresa la consistencia derivada de una matriz de comparación completamente aleatoria. Los valores de *RI* dependen de la dimensión *n* de la matriz de comparación, y se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Valores de RI para distinto número de criterios

Número de criterios	2	3	5	7	9
Valor del índice RI	0	0.58	1.12	1.32	1.45

Si el resultado del *IC* de una determinada matriz de comparación se aproxima a *RI*, significa que la matriz se ha rellenado de forma totalmente aleatoria, expresando así una absoluta incoherencia y desconocimiento a la hora de evaluar el problema a resolver. Por el contrario, un ratio de consistencia bajo indica que el decisor tiene una visión clara del problema a resolver.

2.2 Fundamentos del Proceso Analítico en Red (ANP)

Como se ha expuesto anteriormente, en un modelo de decisión basado en AHP, los criterios, los subcriterios y las alternativas se estructuran de forma jerárquica, es decir, existe una relación lineal y unidireccional entre estos niveles. El ANP, por el contrario, permite una definición mucho más amplia de las relaciones entre los componentes, que ahora se estructuran en forma de red. Los diferentes elementos del modelo, ya sean criterios, subcriterios o alternativas, se agrupan en los llamados clusters. El ANP permite una relación bidireccional entre clusters, lo que significa que algunos o todos los elementos de un cluster pueden depender de algunos o todos los elementos de otro cluster, y viceversa. Además, el ANP permite considerar los elementos de un cluster que dependen de elementos contenidos en ese cluster. Ambos tipos de dependencias se denominan externas e internas, respectivamente, y ambas pueden ser unidireccionales o bidireccionales. La construcción de la red del modelo de decisión es un paso esencial del proceso ANP. El decisor necesita, en primer lugar, determinar los criterios, subcriterios y alternativas que intervienen en el problema, así como definir adecuadamente qué elementos de los anteriores van a formar parte de cada cluster y establecer las relaciones que existen entre ellos, de acuerdo siempre con su visión del problema. Esas relaciones de la red se presentan en forma de la llamada supermatriz de dominación interfactorial, que es una matriz que incluye todos los elementos de la red (criterios, subcriterios y alternativas).

Cada elemento m_{ij} de esta matriz se rellena con valores 0 ó 1, donde 1 significa que el elemento *i* está influenciado por el elemento *j*. Hay que destacar que esta matriz no es recíproca, es decir, el elemento *i* puede estar influenciado por el elemento *j*, pero no necesariamente el elemento *j* debe estar influenciado por el elemento *i*. Una vez construida la supermatriz de dominación interfactorial, el decisor debe determinar la influencia que cada elemento perteneciente a cada cluster tiene sobre cualquier otro elemento. Para cada clúster, sólo se prestará atención a los componentes de la matriz que no sean nulos. Dicha influencia se obtiene mediante la aplicación convencional del proceso AHP. El decisor debe rellenar

dicha matriz de comparación como es habitual, utilizando la escala fundamental de Saaty para rellenar una matriz de comparación consistente que evalúe la relevancia que tienen los elementos considerados sobre el elemento columna. Al hacerlo con cada elemento de la supermatriz de dominación interfactorial, se construirá la denominada supermatriz no ponderada, en la que los elementos de la supermatriz de influencia rellenos con 1 se sustituirán ahora por los pesos correspondientes

Hay que tener en cuenta que la supermatriz no ponderada no es estocástica, es decir, sus columnas no suman 1. Para que la supermatriz no ponderada sea estocástica, los elementos de cada cluster se deben multiplicar por el peso global de cada cluster (considerando tanto los clusters de criterios como los de alternativas). Estas ponderaciones se obtienen de nuevo empleando el procedimiento AHP convencional. La supermatriz estocástica resultante se denomina supermatriz ponderada

El último paso para determinar los pesos de los criterios y el ranking de las alternativas consiste en elevar la supermatriz ponderada tantas veces como sea necesario para que los elementos de cada columna converjan y se mantengan estables. Dicha matriz se denomina supermatriz límite y contiene en cada columna los pesos de los criterios, así como el ranking final de las alternativas.

3. Caso de estudio

Mediante el proceso ANP se va a determinar cuál de entre cinco posibles alternativas de diseño de un puente de hormigón en zona costera resulta más adecuada en términos de la sostenibilidad. Además de un diseño convencional que servirá de base para el estudio (denominado REF en adelante), se evalúan cuatro alternativas de diseño orientadas para evitar que se produzca la corrosión de las armaduras a causa de su exposición a los cloruros ambientales. Estas alternativas consisten en el aumento del recubrimiento nominal de las armaduras respecto a la solución de referencia (alternativa COV50 en adelante), la inclusión de humo de sílice a la dosificación de hormigón de referencia, sustituyendo parcialmente el contenido original de cemento (alternativa SF10), así como la inclusión de polímeros a la dosificación original (alternativa PMC20), y el empleo de inhibidores orgánicos de la corrosión (alternativa IOC).

La unidad funcional considerada para la evaluación de los impactos económicos, ambientales y sociales del ciclo de vida de cada una de las alternativas de diseño mencionadas es un tablero de puente de 1 m de largo y 12 m de ancho, incluyendo las operaciones de mantenimiento necesarias para garantizar una vida útil de 100 años. El mantenimiento requerido por cada alternativa a lo largo de su ciclo de vida es diferente en función de su durabilidad frente a los cloruros. Se analiza para cada alternativa un mantenimiento periódico de tal manera que la probabilidad de fallo en el año en que se realiza el mantenimiento preventivo sea inferior al 10% (Nogueira et al., 2012). En el presente estudio se considera que el fallo se produce cuando el contenido de cloruros a la profundidad de las armaduras supera el umbral crítico de cloruros. Las dosificaciones de hormigón asociadas a cada alternativa, así como los parámetros que permiten evaluar la durabilidad de cada opción de diseño, se muestran en la tabla 2. En la tabla 2 se muestran los valores medios del coeficiente de difusión (D_0) y del contenido crítico de cloruros (C_{cr}), así como el valor de la desviación estándar entre paréntesis.

Tabla 2. Parámetros considerados en el análisis de alternativas

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20
Contenido de cemento (kg/m ³)	350	350	350	280	350
Agua (l/m ³)	140	140	140	140	140
Árido grueso (kg/m ³)	1017	1017	1017	1017	1017
Arena (kg/m ³)	1068	1068	1068	1129	1068
Adición (kg/m ³)	-	-	10.5	35	70
Recubrimiento de las armaduras (mm)	40	50	40	40	40
D ₀ (x10 ⁻¹² m ² /s)	8.90 (0.90)	8.90 (0.90)	3.55 (0.27)	1.23 (0.17)	2.71 (0.22)
C _{cr} (%)	0.60 (0.10)	0.60 (0.10)	0.60 (0.10)	0.60 (0.03)	0.60 (0.10)
Intervalo de mantenimiento (años)	8	12	30	50	40

Dado que la sostenibilidad se manifiesta en tres dimensiones diferentes (economía, medio ambiente y sociedad), se ha escogido un conjunto de indicadores que representen los principales impactos que el ciclo de vida de un puente puede causar sobre cada una de ellas. En este caso, para evaluar la sostenibilidad de cada alternativa a lo largo de su ciclo de vida se considera un conjunto de nueve criterios, cada uno de los cuales corresponde a un tipo de impacto concreto. Para cuantificar los impactos en la dimensión económica de la sostenibilidad se consideran dos criterios/impactos: los costes derivados de la construcción de la unidad funcional para cada alternativa de diseño, por una parte, y los costes derivados del mantenimiento periódico, por otro. Cabe mencionar que, dado el presente caso de estudio está orientado hacia la evaluación de la sostenibilidad, los costes de la fase de mantenimiento se han calculado considerando una tasa de descuento social de $d = 2\%$, inferior a las tasas de descuento financieras habituales en proyectos privados (Allacker, 2012).

Para evaluar el impacto de cada alternativa sobre el medio ambiente, se consideran tres tipos de impactos. Por una parte, el daño que las emisiones derivadas de la producción de los materiales, transporte e instalación de los mismos tiene sobre la salud humana, tanto en fase de construcción como en la fase de mantenimiento. De igual manera, se considera de forma independiente los daños que dichas emisiones generan en los ecosistemas. Por último, se evalúa el impacto que tiene la extracción de las materias primas involucradas en el ciclo de vida de la unidad funcional sobre la disponibilidad de recursos naturales. Estos tres impactos se corresponden con los indicadores de punto final de la metodología de análisis de ciclo de vida ReCiPe. Estos tres indicadores han sido ampliamente utilizados en análisis de ciclo de vida ambiental de productos por la sencillez de su interpretación y facilidad para su integración en procesos de toma de decisión (Martínez-Cámara et al., 2021; Ramagiri y Kar, 2021; Decorte et al., 2021; Navarro et al., 2019).

Por último, el impacto de cada alternativa sobre la sociedad se evalúa siguiendo el sistema de indicadores propuesto por Navarro et al. (2018). Este sistema de indicadores cuantitativos, considera el impacto positivo derivado de la generación de empleo durante las fases de construcción y mantenimiento de cada opción de diseño, incluyendo aspectos como paro, igualdad de género, justicia salarial o accidentalidad en el sector (OECD, 2008; Sierra et al., 2017; European Institute for Gender Equality, 2015). Se considera un segundo indicador que

contempla la generación de riqueza derivada de los flujos de compra-venta de los distintos materiales o alquileres de maquinaria (OECD, 2008). El tercer impacto social considerado tiene en cuenta el efecto positivo que la ausencia de mantenimiento tiene sobre los usuarios, tales como una menor afección a la accesibilidad y menor riesgo de accidentes (Dette & Sigrist, 2011; Ozturk et al., 2013). El último impacto social incluido en el presente estudio es el efecto positivo que la ausencia de mantenimiento tiene sobre la opinión pública: menos externalidades debidas a la ausencia de las vibraciones, ruido, polvo o pérdida de estética por las operaciones de mantenimiento (Dette & Sigrist, 2011).

Los impactos económicos, ambientales y sociales se han calculado para cada alternativa teniendo en cuenta la misma metodología de evaluación propuesta por Navarro et al. (2020), así como el mismo sistema de producto, y dan como resultado los valores proporcionados en la Tabla 3.

Tabla 3. Impactos de cada una de las alternativas de diseño consideradas

Impacto	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20
Coste Construcción	1297 €	1297 €	1716 €	1567 €	3378 €
Coste Mantenimiento	5850 €	4299 €	733 €	263 €	562 €
Salud Humana	284	222	86	67	112
Ecosistemas	147	115	43	32	52
Recursos	315	257	133	113	217
Empleo	0.68	0.69	0.58	0.51	0.79
Generación Riqueza	0.66	0.58	0.41	0.40	0.61
Usuarios	0.07	0.10	0.31	0.50	0.47
Externalidades	0.06	0.10	0.31	0.50	0.46

4. Resultados y discusión

4.1 Modelo de toma de decisión en red

El primer paso en la aplicación de la metodología ANP consiste en construir el modelo de relaciones entre criterios y alternativas. En primer lugar, se deben agrupar los elementos del modelo en clusters relevantes para la toma de decisión. En este caso, se considera un cluster con las cinco alternativas de diseño (REF, COV50, SF10, PMC20 y IOC). Los criterios, por otra parte, se agrupan en tres clusters, uno con los dos criterios económicos, otro con los tres criterios ambientales y un último con los cuatro criterios sociales. La división en estos clusters no es rígida, ya que se podría trabajar con un número mayor de clusters (tantos como criterios), abogando por una mayor precisión del problema, pero complicándolo enormemente y perjudicando la consistencia de los juicios del decisor, que es precisamente lo que se pretende evitar.

El siguiente paso consiste en determinar las relaciones existentes en la matriz de dominación interfactorial. Cuando, como es el caso, el problema de toma de decisión considera criterios exclusivamente cuantitativos, el experto únicamente requiere completar las relaciones que, de acuerdo con su visión del problema, se pueden dar entre los criterios, ya que las relaciones entre criterios y alternativas se puede deducir automáticamente a partir de los valores de los impactos de cada alternativa. En la tabla 4 se muestra la matriz de dominación interfactorial

para el presente problema, según la perspectiva del decisor. Para el presente problema de toma de decisión, se ha involucrado a un experto con 21 años de experiencia en el diseño estructural de puentes y más de 20 artículos indexados JCR publicados en los últimos años relacionados con el diseño sostenible de infraestructuras y su optimización.

Tabla 4: Matriz de dominación interfactorial

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CC50	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
OCI	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SF10	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PMC20	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C.Const.	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
C.Mant.	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
S.Humana	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ecosist.	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Recursos	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
Trabajo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
Riqueza	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Usuarios	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Extern.	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Una vez construida la matriz de dominación interfactorial, se obtiene la supermatriz no ponderada del problema de toma de decisión (Tabla 5). Cabe señalar de nuevo que, dado que el presente problema sólo incluye criterios cuantitativos, los valores de las 5 primeras filas y columnas de la supermatriz pueden obtenerse directamente a partir de los valores presentados en la tabla 3.

Tabla 5: Supermatriz no ponderada

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF	0	0	0	0	0	0.252	0.023	0.081	0.076	0.113	0.209	0.247	0.045	0.043
CC50	0	0	0	0	0	0.190	0.186	0.267	0.261	0.269	0.179	0.156	0.216	0.216
OCI	0	0	0	0	0	0.209	0.518	0.342	0.349	0.315	0.157	0.151	0.347	0.349
SF10	0	0	0	0	0	0.097	0.242	0.205	0.217	0.164	0.243	0.228	0.323	0.324
PMC20	0	0	0	0	0	0.819	0.640	0.439	0.144	0.539	0	0.800	0	0
C.Const.	0.181	0.360	0.561	0.856	0.461	0	0	0	0	0.200	0	0.450	0	0
C.Mant.	0.261	0.268	0.263	0.272	0.261	0	0	0	0.300	0	0	0	0	0
S.Humana	0.504	0.520	0.527	0.567	0.530	0	0	1.000	0	0	0	0	0	0
Ecosist.	0.235	0.211	0.210	0.161	0.209	1.000	1.000	0	0.700	0	0	0	0	0
Recursos	0.465	0.437	0.341	0.267	0.399	0	0	0	0	0	0	1.000	0	0
Trabajo	0.448	0.352	0.475	0.210	0.321	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Riqueza	0.045	0.107	0.093	0.263	0.140	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000
Usuarios	0.042	0.104	0.091	0.261	0.140	0	0	0	0	0	0	0	1.000	0
Extern.														

Para obtener una supermatriz estocástica y ponderada, el experto debe determinar el peso de cada uno de los clusters que se hayan definido en el modelo en red mediante un procedimiento AHP convencional. Cabe señalar que, para llevar a cabo dichas comparaciones pareadas, únicamente se consideran los clusters implicados, lo que reduce significativamente el número de comparaciones a completar, aumentando de este modo la consistencia del decisor y, por lo tanto, la fiabilidad de la decisión finalmente adoptada (tabla 6).

Para obtener los pesos de los clusters, ha sido necesario completar cuatro matrices de comparaciones pareadas, siendo la de mayor dimensión la que implica los cuatro clusters, con un tamaño de 4x4. La tabla 6 muestra el ratio CR/CR_{lim} de cada una de las cuatro matrices de comparación pareada, como medida de la consistencia derivada de los juicios emitidos por el experto al completarlas. A partir de los pesos de cada cluster, se puede derivar la supermatriz ponderada por dichos pesos (tabla 7).

Tabla 6: Pesos de los clusters

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF														
CC50														
OCI			0			0.423			0.577				0.669	
SF10														
PMC20														
C.Const.			0.238			0.122			0.081				0.088	
S.Humana														
Ecosist.			0.625			0.227			0.342				0	
Recursos														
Trabajo														
Riqueza			0.136			0.227			0				0.243	
Usuarios														
Extern.														
CR/CR _{lim} =			35%			4%			55%				13%	

Tabla 7: Supermatriz ponderada no estocástica

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF	0	0	0	0	0	0.107	0.010	0.047	0.044	0.065	0.140	0.165	0.030	0.029
CC50	0	0	0	0	0	0.107	0.013	0.060	0.056	0.080	0.142	0.146	0.046	0.045
OCI	0	0	0	0	0	0.081	0.078	0.154	0.151	0.155	0.120	0.104	0.144	0.144
SF10	0	0	0	0	0	0.088	0.219	0.198	0.201	0.182	0.105	0.101	0.232	0.234
PMC20	0	0	0	0	0	0.041	0.102	0.119	0.125	0.095	0.163	0.153	0.216	0.217
C.Const.	0.195	0.153	0.105	0.034	0.129	0	0.122	0	0	0.065	0	0.048	0	0
C.Mant.	0.043	0.086	0.134	0.204	0.110	0	0	0	0	0.016	0	0.040	0	0
S.Humana	0.163	0.168	0.164	0.170	0.163	0	0	0	0.103	0	0	0	0	0
Ecosist.	0.315	0.325	0.329	0.355	0.331	0	0	0.342	0	0	0	0	0	0
Recursos	0.147	0.132	0.131	0.101	0.130	0.227	0.227	0	0.239	0	0	0	0	0
Trabajo	0.063	0.060	0.047	0.036	0.054	0	0	0	0	0	0	0.243	0	0
Riqueza	0.061	0.048	0.065	0.029	0.044	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Usuarios	0.006	0.015	0.013	0.036	0.019	0	0	0	0	0	0	0	0	0.243
Extern.	0.006	0.014	0.012	0.036	0.019	0	0	0	0	0	0	0	0.243	0
Suma =	1	1	1	1	1	0.650	0.773	0.919	0.919	0.658	0.669	1	0.912	0.912

La supermatriz ponderada resultante, como se ha explicado en el apartado de metodología, no es estocástica, es decir, que las columnas no suman la unidad, como se puede ver en la tabla 7. Para poder obtener la supermatriz límite, que es el objetivo de esta metodología, se debe transformar la supermatriz anterior en una supermatriz estocástica (tabla 8).

Tabla 8: Supermatriz ponderada estocástica

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF	0	0	0	0	0	0.164	0.013	0.051	0.048	0.099	0.209	0.165	0.033	0.032
CC50	0	0	0	0	0	0.164	0.017	0.065	0.061	0.122	0.212	0.146	0.051	0.050
OCI	0	0	0	0	0	0.124	0.102	0.168	0.164	0.236	0.179	0.104	0.158	0.158
SF10	0	0	0	0	0	0.136	0.284	0.215	0.219	0.276	0.157	0.101	0.255	0.256
PMC20	0	0	0	0	0	0.063	0.132	0.129	0.136	0.144	0.243	0.153	0.237	0.238
C.Const.	0.195	0.153	0.105	0.034	0.129	0	0.158	0	0	0.099	0	0.048	0	0
C.Mant.	0.043	0.086	0.134	0.204	0.110	0	0	0	0	0.025	0	0.040	0	0
S.Humana	0.163	0.168	0.164	0.170	0.163	0	0	0	0.112	0	0	0	0	0
Ecosist.	0.315	0.325	0.329	0.355	0.331	0	0	0.372	0	0	0	0	0	0
Recursos	0.147	0.132	0.131	0.101	0.130	0.350	0.294	0	0.261	0	0	0	0	0
Trabajo	0.063	0.060	0.047	0.036	0.054	0	0	0	0	0	0	0.243	0	0
Riqueza	0.061	0.048	0.065	0.029	0.044	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Usuarios	0.006	0.015	0.013	0.036	0.019	0	0	0	0	0	0	0	0	0.266
Extern.	0.006	0.014	0.012	0.036	0.019	0	0	0	0	0	0	0	0.266	0
Suma =	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Finalmente, elevando sucesivas veces la supermatriz ponderada estocástica, se llega a la supermatriz límite (tabla 9). La potencia a la que se debe elevar la supermatriz anterior es idealmente infinito, pero la convergencia se suele encontrar, dependiendo del problema, para una potencia entre 10 y 20.

Tabla 9: Supermatriz límite

	REF	CC50	OCI	SF10	PMC20	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
REF	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
CC50	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054
OCI	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099
SF10	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131
PMC20	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081
C.Const.	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
C.Mant.	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
S.Humana	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
Ecosist.	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171
Recursos	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
Trabajo	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Riqueza	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
Usuarios	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Extern.	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

A partir de esta matriz, los pesos de cada criterio de acuerdo con la visión del problema del experto involucrado pueden derivarse de las filas 6 a 14, una vez normalizadas (tabla 10).

Tabla 10. Pesos normalizados de cada criterio mediante ANP

C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
0.113	0.102	0.149	0.291	0.231	0.042	0.033	0.020	0.020

Por otro lado, los valores de las 5 primeras filas proporcionan el ranking de las alternativas según los juicios emitidos por el decisor a lo largo del proceso descrito. Se observa que la alternativa preferida es SF10, es decir, el diseño consistente en sustituir parcialmente una parte del cemento de la dosificación original de hormigón por humo de sílice.

4.2 Comparación de resultados ANP-AHP

Si se hubiera abordado el mismo problema de toma de decisión mediante el método AHP convencional para la determinación de los pesos de cada uno de los 9 criterios, el experto hubiera tenido que completar una matriz pareada de tamaño 9x9. Dicha matriz se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Matriz de comparación pareada AHP

	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
C.Const.	1	3	1/3	1/3	1/5	7	7	5	9
C.Mant.	1/3	1	1/3	1/3	1/5	7	7	1/3	3
S.Humana	3	3	1	1	1/2	7	5	5	9
Ecosist.	3	3	1	1	1/3	7	5	5	9
Recursos	5	5	2	3	1	7	7	5	7
Trabajo	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1/2	1/2
Riqueza	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7	1	1	1/2	1/2
Usuarios	1/5	3	1/5	1/5	1/5	2	2	1	1
Extern.	1/9	1/3	1/9	1/9	1/7	2	2	1	1

El valor del ratio de consistencia de la matriz mostrada en la tabla 11 es $CR = 0.096$, lo que supone un 96% del CR_{lim} para matrices de comparación de tamaño 9x9. Los pesos de cada criterio derivados de la matriz de comparación anterior se muestran en la tabla 12, así como los pesos obtenidos mediante la metodología ANP.

Tabla 12. Comparación de resultados ANP-AHP

	C.Const.	C.Mant.	S.Humana	Ecosist.	Recursos	Trabajo	Riqueza	Usuarios	Extern.
Pesos AHP	0.129	0.066	0.198	0.189	0.295	0.022	0.023	0.048	0.030
Peso clusters AHP	0.195			0.683			0.122		
Pesos ANP	0.113	0.102	0.149	0.291	0.231	0.042	0.033	0.020	0.020
Peso clusters ANP	0.215			0.671			0.114		

Si se compara el peso de cada una de las dimensiones o clusters de criterios obtenidos mediante el método AHP y ANP se observan resultados muy similares. Es decir, globalmente los dos métodos son capaces de capturar la visión general del experto hacia el problema de decisión a tratar. Sin embargo, cuando se trata de los pesos más específicos de cada criterio, las diferencias son significativas. Dichas diferencias son más acusadas, fundamentalmente, en los criterios sociales, para los que la diferencia promedio de pesos supera el 50%. Esto se debe a que la valoración social es más sensible a la subjetividad del experto, al ser una dimensión de la sostenibilidad cuya cuantificación está todavía en un proceso de desarrollo muy incipiente.

Cabe destacar también la gran diferencia en términos de consistencia que existe, sin embargo, entre ambas valoraciones. Atendiendo al parámetro CR/CR_{lim} , se puede afirmar que los resultados obtenidos mediante la técnica ANP resultan más fiables: como se ha descrito en el apartado 4.5, el coeficiente de consistencia obtenido mediante el procedimiento AHP es un 96% del coeficiente de consistencia límite permitido para no descartar la valoración. Como se observa, el uso del método AHP cuando se involucran más de 4 ó 5 criterios, penaliza mucho la coherencia del experto. Sin embargo, y tal y como se muestra en la tabla 6, dichos ratios no superan el 55% de la consistencia límite para el caso del ANP. Dado que nos encontramos ante exactamente el mismo problema, con los mismos criterios, y ante el mismo experto, un aumento de la consistencia de sus respuestas del orden del doble revela una mayor fiabilidad del método ANP frente al AHP. Por lo tanto, la aplicación de la técnica ANP parece ser más adecuada, al trabajar con criterios cuantitativos, para reflejar de forma más precisa la visión del experto hacia el problema de decisión.

5. Conclusiones

El diseño sostenible de nuestras infraestructuras se ha convertido en los últimos años en el centro de atención de una parte importante de la comunidad científica, ya que mitigar sus importantes impactos negativos sobre el medioambiente, así como impulsar los beneficios económicos y sociales de las mismas es un paso esencial para lograr el futuro sostenible al que aspira la sociedad. Sin embargo, la cuantificación de la sostenibilidad es difícilmente objetivable, ya que depende en gran medida de la percepción del decisor hacia el problema y de la relevancia que éste quiera dar a cada uno de los criterios involucrados en la decisión.

La presente comunicación tiene por objeto el análisis mediante la técnica ANP de la sostenibilidad de cinco alternativas de diseño diferentes para un puente de hormigón en

ambiente marino. En este caso, el empleo de hormigones con adiciones de humo de sílice ha demostrado ofrecer la mejor respuesta a lo largo de su ciclo de vida cuando la estructura está expuesta a ambientes con cloruros. Esto se debe a su elevada durabilidad, y al hecho de que esta alternativa sustituye parte del cemento de un diseño convencional mediante el humo de sílice, permitiendo reducir parte de los impactos ambientales asociados a la producción de cemento y permitiendo también reutilizar un subproducto residual de la industria metalúrgica.

En comparación con el proceso AHP, la técnica ANP permite dar un paso más allá a la hora de modelizar las complejas relaciones que pueden existir entre los distintos criterios, haciendo posible que el experto pueda reflejar su visión del problema de una forma más flexible y precisa. El empleo de esta técnica para abordar problemas de toma de decisión en los que intervienen criterios cuantitativos ha demostrado ser útil para reducir las inconsistencias asociadas a los métodos convencionales (AHP), aumentando así la fiabilidad de la decisión final. Como se ha mostrado en la discusión de los resultados obtenidos, el empleo de un ANP cuantitativo ha permitido, ante un mismo problema de decisión, emitir juicios con una consistencia media superior al doble que la obtenida mediante el proceso AHP convencional.

6. Referencias

- Allacker, A. (2012). Environmental and economic optimisation of the floor on grade in residential buildings. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 813-827.
- Andrade Arteaga, C., Rodríguez-Rodríguez, R., Alfaro-Saiz, J.J., & Verdecho, M.J. (2022). An ANP-Balanced Scorecard Methodology to Quantify the Impact of TQM Elements on Organisational Strategic Sustainable Development: Application to an Oil Firm. *Sustainability*, 12, 6207.
- Balasbaneh, T., Sher, W., Yeoh, W. & Koushfar, K. (2022). LCA & LCC analysis of hybrid glued laminated Timber–Concrete composite floor slab system. *Journal of Building Engineering*, 49(3), 104005.
- Decorte, Y., Steeman, M., & Van den Bossche, N. (2021). Effect of a one-dimensional approach in LCA on the environmental life cycle impact of buildings: Multi-family case study in Flanders. *Building and Environment*, 206, 108381.
- Detle, G., & Sigrist, V. (2011). Performance indicators for concrete bridges. *fib Symposium proceedings*. Prague.
- European Institute for Gender Equality (2015). Gender Equality Index 2015 – Measuring gender equality in the European Union 2005–2012.
- García-Segura, T., Penadés-Plà, V. & Yepes, V. (2018). Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 202, 904-915.
- Martínez-Cámara, E., Santamaría, J., Sanz-Adán, F., & Arancón, D. (2021). Digital Eco-Design and Life Cycle Assessment – Key elements in a circular economy: A case study of conventional desk. *Applied Sciences*, 11(21), 10439.
- 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.
- Navarro, I.J., Yepes, V. & Martí, J.V. (2018). Social life cycle assessment of concrete bridge decks exposed to aggressive environments. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, 50-63.
- Navarro, I.J., Martí, J.V., & Yepes, V. (2019). Reliability-based maintenance optimization of corrosion preventive designs under a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 74, 23-34.
- 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.
- Navarro, I.J., Martí, J.V., & Yepes, V. (2021). Neutrosophic completion technique for incomplete higher-order AHP comparison matrices. *Mathematics*, 9(5),496.
- Nogueira, C.G., Leonel, E.D., & Coda, H.B. (2012). Reliability algorithms applied to reinforced concrete structures durability assessment. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5, 440–450.
- Ocampo, L. & Ocampo, C.O. (2015). A robust evaluation of sustainability initiatives with analytic network process (ANP). *International Journal of Production Management and Engineering*, 3(2), 123-133.
- OECD (2008). Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD Publications, Paris, France.
- Ozturk, O., Ozbay, K., Yang, H., & Bartin, B. (2013). Crash Frequency Modeling for Highway Construction Zones. Transportation Research Board's 92nd Annual Meeting, Washington, D.C.
- Peng, J., Yang, Y., Bian, H., Zhang, J. & Wang, L. (2022). Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(3), 395-411.
- Pourmehdi, M., Paydar, M.M. & Asadi-Gangraj, E. (2021). Reaching sustainability through collection center selection considering risk: using the integration of Fuzzy ANP-TOPSIS and FMEA. *Soft Computing*, 25, 10885–10899.
- Radwan, N., Senousy, M., & Riad, A. (2016). Neutrosophic AHP multi-criteria decision-making method applied on the selection of learning management system. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 8(5), 95–105.
- Ramagiri, K.K., & Kar, A. (2021). Environmental impact assessment of alkali-activated mortar with waste precursors and activators. *Journal of Building Engineering*, 44, 103391.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Saaty, T.L. (2004). Fundamentals of the analytic network process — Dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 129-157.
- Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., & Yepes, V. (2022). Multi-criteria decision-making applied to the sustainability of building structures based on Modern Methods of Construction. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129724.
- Sierra, L.A., Pellicer, E., & Yepes, V. (2017). Assessing the social sustainability contribution of an infrastructure project under conditions of uncertainty. *Environmental Impact Assessment Review*, 67, 61–72.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

