

## MULTIVARIATE CORRESPONDENCE ANALYSIS IN OPTIMIZATION STUDIES OF CONCRETE BRIDGES

Víctor Yepes<sup>1</sup>, Alfredo Marmaneu<sup>2</sup>, Fernando González-Vidosa<sup>2</sup> y José Vicente Martí<sup>2</sup>

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)

Universitat Politècnica de València (UPV)

46022 Valencia, Spain

web: <http://www.upv.es/entidades/ICITECH/indexc.html>

1: e-mail: [vyepesp@upv.es](mailto:vyepesp@upv.es),

2: e-mail: [almarmel@cam.upv.es](mailto:almarmel@cam.upv.es), [fgonzale@upv.es](mailto:fgonzale@upv.es), [jvmartia@upv.es](mailto:jvmartia@upv.es)

**Keywords:** optimization studies / concrete bridges / qualitative variables / correspondence analysis / dependency relationships

**Abstract** *The socio-cultural situation in which we find ourselves today, with limited budgets, greater awareness of the environment and high levels of gas emissions into the atmosphere, makes the future in general and the construction of structures in particular aimed at finding designs that are more efficient. Since the 60s of last century to the present, several research groups spread across the five continents have tried to carry out optimization studies of concrete bridges, either the bridge in general and some of its elements in particular, publishing articles in scientific journals world-class. The featured paper extracts some qualitative variables defined and parameterized by reading articles published over the years and it makes a simple multivariate correspondence analysis (SMCA). A sample of 93 articles has been analyzed and seven variables have been extracted from it. The two overall objectives are to determine whether the dependency relationships between different categories that the variables can take are statistically significant and to define possible new lines of research. Therefore, SMCA is divided into 10 pairs of variables namely ten independent studies. The software used has been IBM SPSS Statistics 21. The results show the type of optimization problem resolution are related to the development of technology and computers, genetic algorithms are related to maintenance phase, or the optimization design of I-beam bridges is related to prestressed concrete, among other. Finally, the thesis concludes that the optimization concrete bridge in construction phases or with special type of concrete could open new lines of research.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El futuro de la construcción de estructuras en general y de los puentes en particular, por sus costes, su elevado consumo de recursos naturales y la contaminación asociada a dicha actividad, se encamina hacia la búsqueda de una mayor eficiencia en todas sus fases: diseño, construcción y mantenimiento. Una buena solución será la que genere un diseño estructural con el menor coste, y mayor calidad y sostenibilidad durante la vida útil de la estructura. Por lo tanto, estos motivos aumentan el interés en el estudio de técnicas que ayuden a conseguir dicho objetivo. En este sentido, a lo largo de los últimos 50 años se han desarrollado numerosos trabajos, recogidos en parte en artículos, congresos y tesis doctorales orientados hacia la optimización en el diseño de puentes de hormigón.

El presente artículo recoge y analiza algunos de los resultados más significativos relacionados con la revisión del estado actual de la investigación realizado por Marmaneu [1]. Se trata de organizar y analizar las relaciones de dependencia entre las variables cualitativas recogidas en los trabajos de investigación relacionados con el tema y, a su vez, recopilar las conclusiones de dichos estudios. Todo ello permite establecer las nuevas líneas de investigación abiertas en este momento para seguir avanzando en el conocimiento de la optimización de los puentes de hormigón. El trabajo se ha estructurado en cuatro fases: búsqueda de artículos, extracción de las variables cualitativas, análisis de la evolución temporal, cualitativa y geográfica de los artículos, y análisis multivariante simple de correspondencias (SMCA). Las variables que se han considerado son las siguientes: ciclo de vida, elemento optimizado, método de optimización, función objetivo, tipología de puente, tipo de hormigón y tipología de tablero. Se ha utilizado el SMCA para el análisis estadístico debido a su facilidad en la representación de las categorías de dos variables cualitativas en un espacio de pequeñas dimensiones, de manera que queda reflejada en un mapa bidimensional, la posición relativa de las variables cualitativas y permite ver el grado de asociación entre ellas. Se trata de un método numérico capaz de identificar si las relaciones entre dos variables cualitativas son suficientemente significativas. Para el análisis SMCA se han examinado un total de 93 artículos [2-94] publicados entre enero de 1966 y junio de 2016. Entre otros aspectos, se identifica en el análisis cómo afecta el desarrollo de la inteligencia artificial unida a la mejora de la potencia computacional, la obtención de mejores resultados y bases de datos más completas, la exploración de nuevas funciones objetivo, la introducción en la función de optimización del ciclo de vida o de indicadores ambientales.

## 2. EVOLUCIÓN TEMPORAL, CUALITATIVA Y GEOGRÁFICA DE LA INVESTIGACIÓN

Se ha elaborado la información que permite analizar la evolución temporal, espacial y cuantitativa de la publicación de los artículos analizados. Las Figuras 1 y 2 sintetizan cómo ha evolucionado el número de publicaciones, desde 1966 hasta 2016, y en qué países se ha realizado. Se observa en la Figura 1 como a partir de 2008-2010 el número de publicaciones en revistas de impacto da un salto considerable, dando muestra de la importancia e interés que ha tomado el problema de la optimización del diseño de los puentes de hormigón en los últimos 6-7 años. Por otra parte, la Figura 2 presenta un mapamundi que establece con un círculo, de

mayor o menor tamaño en función del número de publicaciones localizadas, la distribución de los equipos de investigación. En este mapa se comprueba la dimensión del grupo de investigación al que pertenecen parte de los autores de este artículo, el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València. El grupo lleva más de una década trabajando en el campo de la optimización y sostenibilidad de estructuras de hormigón [96-102]. Algunas de estas publicaciones no se han incluido en este estudio por ser posteriores a la fecha de su finalización debido a su muy reciente publicación. Uno de los aspectos de mayor interés ha sido constatar cómo en la fase de mantenimiento de los puentes, el método optimización más empleado son los algoritmos genéticos [95], que si bien es un algoritmo de eficacia contrastada, no forma parte de los algoritmos heurísticos de última generación usados en el ámbito de la optimización de problemas condicionados.

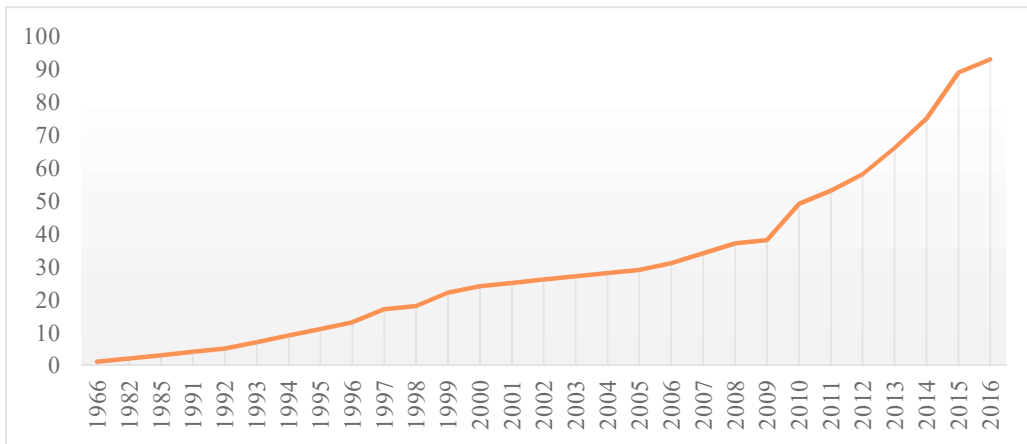


Figura 1. Nº Artículos publicados acumulados por año

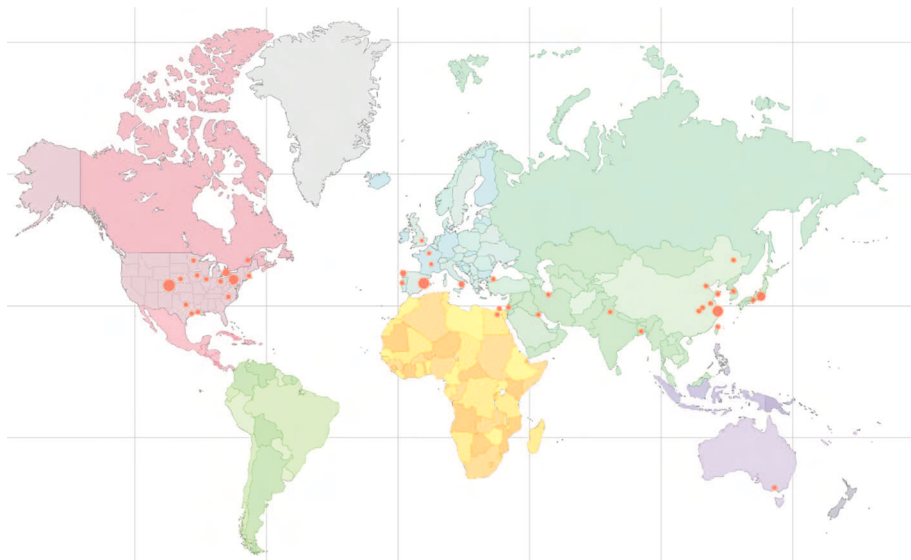


Figura 2. Distribución geográfica de las publicaciones

### 3. ANÁLISIS MULTIVARIANTE SIMPLE DE CORRESPONDENCIAS

El análisis de correspondencias (ACOR) constituye una técnica de análisis multivariante que permite representar las categorías de dos (análisis de correspondencias simple) o más variables (análisis de correspondencias múltiple) cualitativas en un espacio de pequeñas dimensiones. Simplificando, sería un equivalente del análisis de componentes principales (ACP), pero con variables cualitativas. Una de sus ventajas es que refleja en un mapa la posición relativa de las variables cualitativas para ver el grado de asociación entre ellas. Se utilizarán dos dimensiones para la nueva representación, lo que permite observar de una manera sencilla, las relaciones entre las diferentes categorías que rigen las variables, según su grado de cercanía. Esta metodología ya se ha utilizado en trabajos previos de revisión del estado del arte [97, 104-105]. Es posible esquematizar la metodología del análisis de correspondencias (Figura 3) del siguiente modo [103]:

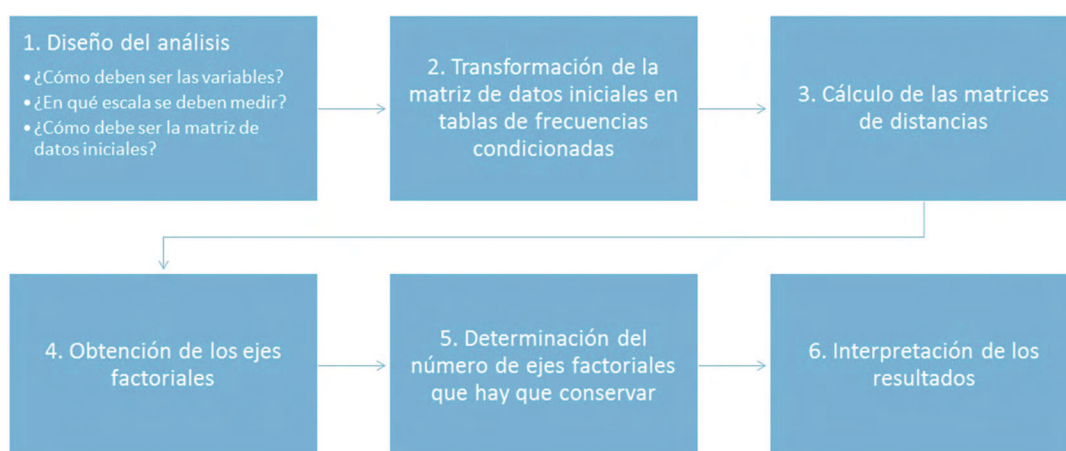


Figura 3. Esquema metodológico del ACOR [103]

La estructura del análisis SMCA se divide en cinco fases, de manera que se ejecuta el método de una manera organizada y fácil de seguir por el lector, dejando claro así todos los pasos seguidos. Las fases son: (1) elección de las parejas de variables a estudiar; (2) establecer tablas de comparación; (3) introducción de datos en el programa de análisis estadístico, en este caso el SPSS; (4) ejecución del análisis de correspondencias; (5) lectura y análisis de los resultados. En los siguientes puntos se desarrollan las fases especificadas.

#### 3.1 Elección de las variables

Según los objetivos marcados en el trabajo, se establecen las siete variables a extraer y analizar de los diferentes artículos publicados en revistas de primer nivel internacional que tratan de la optimización de puentes de hormigón. Dichas variables son: ciclo de vida, elemento optimizado, método de optimización, función objetivo, tipología de puente, tipo de hormigón y tipología de tablero. La Tabla 1, muestra las 10 parejas de variables cualitativas que se establecen para el análisis multivariante simple de correspondencias. La elección se realiza en base a los objetivos específicos del trabajo.

VARIABLE A	VARIABLE B
Métodos de optimización	Tipología de puentes
Ciclo de vida	Tipo de hormigón
Tipología de puentes	Ciclo de vida
Elemento optimizado	Método de optimización
Función objetivo	Elemento optimizado
Tipo de hormigón	Método de optimización
Tipo de hormigón	Tipología de puente
Función objetivo	Método de optimización
Elemento optimizado	Tipo de hormigón
Función objetivo	Tipología de tablero

Tabla 1. Variables relacionadas entre sí en el SMCA

### 3.2 Tablas de comparación

Para las parejas de variables definidas y como paso previo a la introducción de datos en el software SPSS, se preparan unas tablas bidimensionales en las que se cruzan los artículos que tienen en común una de las categorías de las variables de estudio. A modo de ejemplo en la Tabla 2 se muestra el cruce entre la función objetivo y tipología de tablero.

FUNCIÓN OBJETIVO	TIPOLOGÍA DE TABLERO *												
	AR	I	T	C	LH	LA	RH	PI	VT	VL	V	DC	S
Anclaje		1											
Calidad			1	2							1		1
Ciclo de vida		1											
Coste	5	20	6	16	1	1	2		4		9		7
Deflexiones		1		1									
Desplazamiento								1			1		
Emisiones CO <sub>2</sub>	1			1									1
Estética				1									
Otros		8		2					1				2
Peso	1	1								1			
Rendimiento										1			
Seguridad		1					1						3
Separación Vigas		1									1		
Sostenibilidad	1								1				
Tensiones												1	1
Tensiones cable		4								2			
Tensiones tesado		2											

Tabla 2. Función objetivo – Tipología de tablero

### 3.3. Introducción de datos y análisis

La introducción de datos en el SPSS se realiza definiendo las variables cualitativas como nominales y el número de artículos como escalar. De esta manera, cada opción que pueden tomar las variables se introducen con indicadores del 1 al número total de opciones de cada variable en la columna de valores. La Tabla 3 recoge un ejemplo de la entrada de datos descrita. Una vez introducidos los datos y antes de ejecutar el análisis de correspondencias se ponderan los casos mediante la variable de frecuencia “Artículos”. A continuación, se pasa a la ejecución del análisis de correspondencias.

Ciclo_vida	Tipo_resolución	Artículos
1	1	1
1	2	0
1	3	3
1	4	0
1	5	0
1	6	0
1	7	0
1	8	0
2	1	12
2	2	1
2	3	34
2	4	0
2	5	1
2	6	2
2	7	1
2	8	14
3	1	0
3	2	0
3	3	0
3	4	0
3	5	0
3	6	0
3	7	0
3	8	0

Tabla 3. Ejemplo de entrada de datos en SPSS

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de correspondencias ofrecen una visión amplia de las variables que dominan los artículos que se han estudiado y los métodos para llevarlos a cabo. Permite también conocer que aspectos han sido menos analizados y relacionados entre sí, dando información de campos interesantes por explorar. Para los 10 análisis multivariantes simples de correspondencias realizados, se extraen y analizan las siguientes tablas y gráficos:

- (a) tabla de correspondencias (Tabla 4);
- (b) tabla de perfiles de fila (Tabla 5);
- (c) tablas de perfiles columna (Tabla 6);
- (d) tabla resumen (Tabla 7);
- (e) tabla de examen de los puntos fila (Tabla 8);
- (f) tabla de examen de los puntos columna (Tabla 9);
- (g) diagrama de dispersión bi-espacial (Figura 4: gráfico de correspondencias).

Las Tablas 5-6 aportan información de la entrada de datos al SPSS, del cálculo de las masas de las categorías que forman las columnas y de las que forman las filas respectivamente.

Tipología de puentes	Método de optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Margen activo
Puente Arco	0	4	0	1	5
Puente Atirantado	0	2	3	3	8
Puente de vigas	2	6	30	28	66
Puente lanzado	0	0	0	2	2
Varios puentes	0	0	8	1	9
Sin especificar	0	0	2	1	3
Margen activo	2	12	43	36	93

Tabla 4. Tabla de correspondencias

A continuación, de la Tabla 7 se extraen tres datos importantes:

- El grado de significación (Sig.) de la prueba Chi-cuadrado, lo cual indica el grado de dependencia entre las variables. Así pues, si la Sig. <0,05 existe dependencia entre las variables y tiene sentido continuar con el análisis de correspondencias.
- La inercia total, indicando una mayor dependencia entre las variables cuanto mayor sea el valor de esta, de tal manera que, más sentido tendrá identificar qué o cuáles categorías son las que participan con mayor protagonismo en esa dependencia
- La proporción de inercia explicada, la cual muestra la porción de inercia que queda explicada por cada una de las dimensiones principales.

**Perfiles de fila**

Tipología de puentes	Método de optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Margen activo
Puente Arco	,000	,800	,000	,200	1,000
Puente Atirantado	,000	,250	,375	,375	1,000
Puente de vigas	,030	,091	,455	,424	1,000
Puente lanzado	,000	,000	,000	1,000	1,000
Varios puentes	,000	,000	,889	,111	1,000
Sin especificar	,000	,000	,667	,333	1,000
Masa	,022	,129	,462	,387	

Tabla 5. Tabla de perfiles fila

**Perfiles de columna**

Tipología de puentes	Método de optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Masa
Puente Arco	,000	,333	,000	,028	,054
Puente Atirantado	,000	,167	,070	,083	,086
Puente de vigas	1,000	,500	,698	,778	,710
Puente lanzado	,000	,000	,000	,056	,022
Varios puentes	,000	,000	,186	,028	,097
Sin especificar	,000	,000	,047	,028	,032
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	

Tabla 6. Tabla de perfiles columna

El siguiente paso consiste en determinar las coordenadas de los puntos fila (Tabla 5) y los puntos columna (Tabla 6), que finalmente permitirán representar el gráfico de correspondencias. Para ello se analizan las tablas de examen de los puntos fila y columna. Intervienen fundamentalmente tres conceptos aspectos.

- Por un lado el concepto de masa, que es el resultado de una ponderación en función de su frecuencia, la cual indica las categorías que tienen más frecuencia, las cuales tendrán más protagonismo en el gráfico.
- Por otra parte, las similitudes entre categorías a partir de las puntuaciones en la dimensión.



**Resumen**

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación 2
1	,519	,270			,752	,752	,116	,274
2	,287	,082			,230	,982	,072	
3	,080	,006			,018	1,000		
Total		,358	33,334	,004 <sup>a</sup>	1,000	1,000		

a. 15 grados de libertad

Tabla 7. Tabla resumen

**Examen de los puntos de fila<sup>a</sup>**

Tipología_puentes	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Puente Arco	,054	-2,773	,497	,218	,796	,046	,983	,017	1,000
Puente Atirantado	,086	-,510	,068	,013	,043	,001	,889	,009	,898
Puente de vigas	,710	,135	-,159	,013	,025	,062	,510	,390	,900
Puente lanzado	,022	,112	-2,255	,034	,001	,381	,004	,922	,926
Varios puentes	,097	,775	1,213	,072	,112	,496	,421	,570	,991
Sin especificar	,032	,609	,346	,008	,023	,013	,776	,139	,915
Total activo	1,000			,358	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Tabla 8. Tabla de examen de puntos de fila

Y finalmente, se analiza la proporción de la inercia de cada uno de los ejes fila/columna atribuible a cada una de las categorías de las respectivas variables. La puntuación de cada categoría en cada dimensión permite representar el gráfico de correspondencias, observando que la contribución de una categoría de una variable a la varianza explicada por un eje factorial se debe al grado en que esa categoría ha influido en la formación del eje factorial en cuestión. En la Figura 4, se distinguen qué categorías de las variables están próximas entre sí, tanto de variables diferentes como de la misma variable. Si están próximas indica que tienen dependencia entre sí. Además, los puntos situados cerca del origen implican que tienen una

distribución de valores muy próxima a la media, en cambio, cuanto mayor sea la distancia respecto al origen, mayor será la tendencia de la categoría en cuestión a concentrar su frecuencia en determinada celda y, en consecuencia, muy poco con el resto.

Examen de los puntos columna<sup>a</sup>

Metodo_optimización	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Sin especificar	,022	,260	-,553	,009	,003	,023	,086	,215	,300
Elementos Finitos	,129	-1,814	,340	,225	,818	,052	,981	,019	1,000
Heurística	,462	,445	,473	,077	,177	,360	,616	,384	1,000
Matemática	,387	,058	-,647	,048	,003	,565	,014	,980	,994
Total activo	1,000			,358	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Tabla 9. Tabla de examen de puntos de columna

La Figura 4 muestra un ejemplo del gráfico de correspondencias extraído del análisis de la pareja de variables: método de optimización-tipología de puentes. Se observan los siguientes puntos:

- Los puentes arco están cerca de los elementos finitos, lo cual puede estar relacionado con la complejidad de la tipología de puentes.
- La optimización mediante heurísticas se encuentra cerca de puentes en los que no se especifica la tipología, lo cual indica que los artículos que optimizan elementos del puente diferentes a los tableros, se resuelven con heurísticas pero sin identificar la tipología de puentes.
- Los puentes de vigas se encuentran cerca de los métodos matemáticos y heurísticos, mostrando que son los más optimizados, en una primera etapa, con métodos más sencillos, y con el desarrollo de la tecnología, con métodos más complejos
- Los puentes lanzados están completamente aislados, dando muestra que se analizan poco y de manera puntual.
- La optimización de varias tipologías de puentes en un mismo artículo, generalmente en el ciclo de vida del mantenimiento, no garantiza que tenga dependencia con ningún tipo de resolución en concreto.
- Los puentes de vigas tienen una distribución de valores muy próxima a la media, ya que se encuentran cerca del origen.

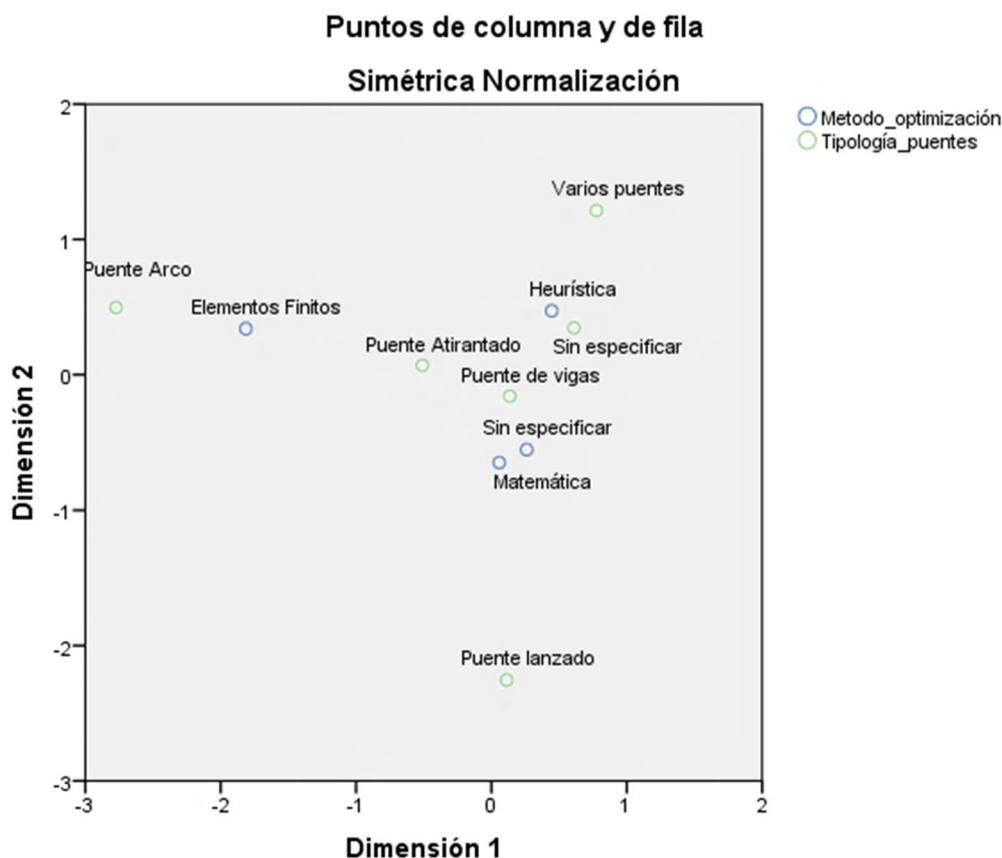


Figura 4. Gráfico de correspondencias Métodos de optimización-Tipología de puentes

## 5. CONCLUSIONES

Se ha aplicado un análisis multivariante simple de correspondencias a 10 parejas de variables que sintetizan el estado actual de la investigación publicada en revistas de impacto en relación con la optimización de puentes de hormigón. Este procedimiento muestra las relaciones significativas entre las variables estudiadas, de forma que la representación en solo dos dimensiones de todas las variables es capaz de explicar más del 90% de la inercia total. Además los gráficos de correspondencias muestran las categorías que están más unidas y las que son susceptibles de nuevas líneas de investigación por estar alejadas del origen y de otras categorías, ya sean de la misma variable o de la pareja. De este modo, la optimización heurística y la programación matemática se han aplicado fundamentalmente a los puentes de vigas, mientras que los puentes tipo arco o los lanzados se encuentran alejados de estas metodologías, por lo que podrían formar parte de futuras líneas de investigación. Con todo ello, se muestra en este trabajo la validez del análisis de correspondencias para abordar la realización de estudios de estado del arte.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad y fondos FEDER (proyecto de investigación BIA2014-56574-R).

## REFERENCES

- [1] A. Marmaneu, "Aplicabilidad del análisis multivariante a las técnicas de optimización de los puentes de hormigón", Tesis de Master, Universitat Politècnica de València, (2016).
- [2] G. G. B. Torres, J. F. Brotchie, and C. A. Cornell, "A Program for the Optimum Design of Prestressed Concrete Highway Bridges," *PCI J.*, Vol. **10**, no. June, pp. 63–71, (1966).
- [3] B. G. Rabbat and H. G. Russell, "Optimized Sections for Precast Prestressed Bridge Girders," *PCI J.*, Vol. **26**, no. July-August, pp. 88–104, (1982).
- [4] H. L. Jones, "Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design," *J. Struct. Eng.*, Vol. **111**, no. 11, pp. 2464–2478, (1985).
- [5] B. S. Dhillon, Fellow, ASCE, and C.-H. Kuo, "Optimum Design of Composite Hybrid Plate Girders," *J. Struct. Eng.*, Vol. **117**, no. July, pp. 2088–2098, (1991).
- [6] W. M. Jenkins, "Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithm," *J. Struct. Eng.*, Vol. **118**, no. November, pp. 3103–3112, (1992).
- [7] Z. Lounis and M. Z. Cohn, "Optimization of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Systems," *PCI J.*, Vol. **37**, no. July-August, pp. 61–78, (1993).
- [8] Z. Lounis and M. Z. Cohn, "Multiobjective Optimization of Prestressed Concrete Structures," *J. Struct. Eng.*, Vol. **119**, no. March, pp. 794–808, (1993).
- [9] K. L. Geren and M. K. Tadros, "The NU Precast Prestressed Concrete Bridge I-Girder Series," *PCI J.*, Vol. **38**, no. May-June, pp. 26–39, (1994).
- [10] M. Z. Cohn and Z. Lounis, "Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems," *J. Struct. Eng.*, Vol. **120**, no. September, pp. 2653–2674, (1994).
- [11] a. Kasuga, H. Arai, J. E. Breen, and K. Furukawa, "Optimum Cable-Force Adjustments in Concrete Cable-Stayed Bridges," *J. Struct. Eng.*, Vol. **121**, no. April, p. 685, (1995).
- [12] Z. Lounis and C. M.Z, "Computer-Aided Design of prestressed Concrete Cellular Bridge Decks," *Microcomput. Civ. Eng.*, Vol. **10**, no. 1, pp. 1–11, (1995).
- [13] S. Fereig, "Economic preliminary design of bridges with prestressed I-girders," *J. Bridg. Eng.*, Vol. **1**, no. February, pp. 18–25, (1996).
- [14] K.-Y. Lin and D. M. Frangopol, "Reliability-based optimum design of reinforced concrete girders," *Struct. Saf.*, Vol. **18**, no. 2, pp. 239–258, (1996).
- [15] D. M. Frangopol, K.-Y. Lin, and Estes A.C., "Life-cycle cost design of deteriorating structures," *J. Struct. Eng.*, Vol. **123**, no. 10, pp. 1390–1401, (1997).
- [16] Z. Lounis, M. S. Mirza, and M. Z. Cohn, "Segmental and Conventional Precast Prestressed Concrete I-Bridge Girders," *J. Struct. Eng.*, Vol. **2**, no. August, pp. 73–82, (1997).
- [17] C. Liu and A. Hammad, "Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm," *J. Transp.*, Vol. **123**, no. 2, pp. 91–100, (1997).

- [18] C. Liu and A. Hammad, "Multiobjective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm," *Microcomput. Civ. Eng.*, Vol. **12**, pp. 431–443, (1997).
- [19] S. Ohkubo, P. B. R. Dissanayake, and K. Taniwaki, "An approach to multicriteria fuzzy optimization of a prestressed concrete bridge system considering cost and aesthetic feeling," *Struct. Optim.*, Vol. **15**, pp. 132–140, (1998).
- [20] M. P. Enright and D. M. Frangopol, "Maintenance Planning for Deteriorating Concrete Bridges," *J. Struct. Eng.*, Vol. **125**, no. December, pp. 1407–1414, (1999).
- [21] D. M. Frangopol, M. P. Enright, and A. C. Estes, "Integration of Maintenance, Repair, and Replacement Decisions in Bridge Management Based on Reliability, Optimization, and Life-Cycle Cost," *Present. from 8th Int. Bridg. Manag. Conf. Denver, Colo. 1999*, Vol. **498**, pp. 1–13, (1999).
- [22] M. A. Hassanain and R. E. Loov, "Design of Prestressed Girder Bridges Using High Performance Concrete - An Optimization Approach," *PCI J.*, Vol. **43**, no. March-April, pp. 40–55, (1999).
- [23] M. J. Zhongguo, M. A. Saleh, and M. K. Tadros, "Optimized Post-Tensioning Anchorage in Prestressed Concrete I-Beam," *PCI J.*, Vol. **33**, no. March-April, pp. 56–73, (1999).
- [24] A. Miyamoto, K. Kawamura, and H. Nakamura, "Bridge Management System and Maintenance Optimization for Existing Bridges," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. **15**, pp. 45–55, (2000).
- [25] P. Mendis, S. Nicholls, and C. Duffield, "Optimum Use of High Performance Concrete in Prestressed Concrete Super-T Bridge Beams," *PCI J.*, Vol. **44**, no. May-June, pp. 56–65, (2000).
- [26] A. C. Estes and D. M. Frangopol, "Minimum expected cost-oriented optimal maintenance planning for deteriorating structures: Application to concrete bridge decks," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, Vol. **73**, no. 3, pp. 281–291, (2001).
- [27] A. Aswad, B. Djazmati, and G. G. Aswad, "Optimal Sizing of Prestressed Bridge Superstructures in Pennsylvania by LRFD," *PCI J.*, Vol. **46**, no. January-February, pp. 26–37, (2002).
- [28] G. Morcou, Z. Lounis, and M. Mirza, "Identification of environmental categories for Markovian deterioration models of bridge decks," *J. Bridg. Eng.*, Vol. **8**, no. 6, pp. 353–361, (2003).
- [29] S.-K. Cho, S.-G. Youn, and Y.-H. Park, "Optimization of Prestressed Concrete Girders for Standard Sections," *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. **24**, no. 4A, pp. 853–859, (2004).
- [30] G. F. Sirca and H. Adeli, "Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges," *J. Struct. Eng.*, Vol. **131**, no. 3, pp. 380–388, (2005).
- [31] M. Liu and D. M. Frangopol, "Optimizing Bridge Network Maintenance Management under Uncertainty with Conflicting Criteria: Life-Cycle Maintenance, Failure, and User Costs," *J. Struct. Eng.*, Vol. **132**, no. November, pp. 1835–1845, (2006).
- [32] L. A. C. Neves, D. M. Frangopol, and P. J. S. Cruz, "Probabilistic Lifetime-Oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Single Maintenance Type," *J. Struct. Eng.*, Vol. **132**, no. June, pp. 991–1005, (2006).

- [33] D. M. Frangopol and M. Liu, "Bridge Network Maintenance Optimization Using Stochastic Dynamic Programming," *J. Struct. Eng.*, Vol. **133**, no. December, pp. 1772–1782, (2007).
- [34] C.-K. Lee and S.-K. Kim, "GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks," *Autom. Constr.*, Vol. **16**, no. 3, pp. 153–164, (2007).
- [35] P. S. Marsh and D. M. Frangopol, "Lifetime Multiobjective Optimization of Cost and Spacing of Corrosion Rate Sensors Embedded in a Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Deck," *J. Struct. Eng.*, Vol. **133**, no. June, pp. 777–787, (2007).
- [36] K.-W. Kim and M.-H. Park, "Optimum Design of LB-DECK Plate Girder Bridge," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, Vol. **12**, no. 1, pp. 135–142, (2008).
- [37] H.-M. Koh, W. Park, and H.-J. Kim, "Maintenance Planning for Deteriorating Bridge using Preference-based Optimization Method," *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. **28**, no. 2A, pp. 223–231, (2008).
- [38] C. Perea, J. Alcala, V. Yepes, F. Gonzalez-Vidoso, and A. Hospitaler, "Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. **39**, pp. 676–688, (2008).
- [39] M. Marzouk, H. Said, and M. El-said, "Framework for Multiobjective Optimization of Launching Girder Bridges," *J. Constr. Eng. Manag.*, Vol. **135**, no. August, pp. 791–800, (2009).
- [40] Z. Aydin and Y. Ayvaz, "Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm," *Struct. Multidiscip. Optim.*, Vol. **41**, pp. 151–162, (2010).
- [41] A. Baldomir, S. Hernandez, F. Nieto, and J. a. Jurado, "Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain)," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. **41**, no. 7–8, pp. 931–938, (2010).
- [42] Lu Deng and C. S. Cai, "Bridge Model Updating Using Response Surface Method and Genetic Algorithm," *J. Bridg. Eng.*, Vol. **15**, no. 5, pp. 553–564, (2010).
- [43] S. Hernandez, a. N. Fontan, J. Diaz, and D. Marcos, "VTOP. An improved software for design optimization of prestressed concrete beams," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. **41**, no. 3, pp. 415–421, (2010).
- [44] J. V. Martí and F. González-Vidoso, "Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. **41**, no. June, pp. 916–922, (2010).
- [45] F. J. Martinez, F. Gonzalez-Vidoso, A. Hospitaler, and V. Yepes, "Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections," *Comput. Struct.*, Vol. **88**, pp. 375–386, (2010).
- [46] O. Nader and D. M. Frangopol, "Novel Approach for Multicriteria Optimization of Life-Cycle Preventive and Essential Maintenance of Deteriorating Structures," *J. Struct. Eng.*, Vol. **136**, no. 8, pp. 1009–1022, (2010).
- [47] A. D. Orcesi, "A bridge network maintenance framework for Pareto optimization of stakeholders/users costs," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, Vol. **95**, no. June, pp. 1230–1243, (2010).

- [48] C. Perea, V. Yepes, J. Alcalá, A. Hospitaler, and F. González-Vidoso, “A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance,” *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, Vol. **17**, no. December, pp. 427–437, (2010).
- [49] G.-H. Lee, S.-B. You, and D.-H. Ha, “Optimal Design for Seismically Isolated Bridges with Frictional Bearing,” *J. Korean Soc. Civ. Eng. A*, Vol. **30**, no. 5, pp. 399–406, (2010).
- [50] Y.-C. Sung and C.-K. Su, “Fuzzy genetic optimization on performance-based seismic design of reinforced concrete bridge piers with single-column type,” *Optim. Eng.*, Vol. **11**, no. 3, pp. 471–496, (2009).
- [51] A. N. Fontan, J. M. Diaz, A. Baldomir, and S. Hernandez, “Improved Optimization Formulations for Launching Nose of Incrementally Launched Prestressed Concrete Bridges,” *J. Bridge Eng.*, Vol. **16**, no. 3, pp. 461–470, (2011).
- [52] V. Lute, “Genetic Algorithms-based Optimization of Cable Stayed Bridges,” *J. Softw. Eng. Appl.*, Vol. **4**, no. October, pp. 571–578, (2011).
- [53] F. J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, and J. Alcalá, “Design of tall bridge piers by ant colony optimization,” *Eng. Struct.*, Vol. **33**, no. May, pp. 2320–2329, (2011).
- [54] M. Yuan and D. H. Yan, “Optimization on Closure Scheme of Multi-Span Prestressed Concrete Box-Girder Bridge,” *Adv. Mater. Res.*, Vol. **163–167**, no. January, pp. 2369–2375, (2011).
- [55] R. Ahsan, S. Rana, and S. N. Ghani, “Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm,” *J. Struct. Eng.*, Vol. **138**, no. 2, pp. 273–284, (2012).
- [56] T. Guo, T. Liu, and a Q. Li, “Deflection Reliability Analysis of PSC Box-Girder Bridge Under High-Speed Railway Loads,” *Adv. Struct. Eng.*, Vol. **15**, no. 11, pp. 2001–2011, (2012).
- [57] F. J. Martínez-Martin, F. González-Vidoso, a Hospitaler, and V. Yepes, “Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms,” *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, Vol. **13**, no. 6, pp. 420–432, (2012).
- [58] S. Rana, N. Islam, R. Ahsan, and S. N. Ghani, “Application of evolutionary operation to the minimum cost design of continuous prestressed concrete bridge structure,” *Eng. Struct.*, Vol. **46**, pp. 38–48, (2013).
- [59] L. F. Wang and A. P. Tang, “Component-Oriented Decomposition for Collaborative Optimization in Reinforcement Concrete Bridge Design,” *Adv. Mater. Res.*, Vol. **374–377**, no. 10, pp. 2405–2410, (2012).
- [60] Z. Aydin and Y. Ayvaz, “Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm,” *KSCCE J. Civ. Eng.*, Vol. **17**, no. 4, pp. 769–776, (2013).
- [61] M. M. Hassan, “Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique,” *Eng. Struct.*, Vol. **49**, no. January, pp. 643–654, (2013).
- [62] M. Madhkhan, A. Kianpour, and M. E. Torki Harchegani, “Life-cycle cost optimization of prestressed simple-span concrete bridges with simple and spliced girders,” *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, Vol. **37**, no. C1, pp. 53–66, (2013).

- [63] J. V. Martí, F. Gonzalez-Vidoso, V. Yepes, and J. Alcalá, “Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing,” *Eng. Struct.*, Vol. **48**, pp. 342–352, (2013).
- [64] F. J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, and V. Yepes, “A parametric study of piers for motorway bridge viaducts,” *Struct. Eng. Meh.*, Vol. **45**, no. 6, pp. 723–740, (2013).
- [65] V.-S. Nguyen, M. C. Jeong, T. S. Han, and J. S. Kong, “Reliability-based optimisation design of post-tensioned concrete box girder bridges considering pitting corrosion attack,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol. **9**, no. 1, pp. 78–96, (2013).
- [66] B. Zhu and D. M. Frangopol, “Risk-Based Approach for Optimum Maintenance of Bridges under Traffic and Earthquake Loads,” *J. Struct. Eng.*, Vol. **139**, no. 3, pp. 422–434, (2013).
- [67] J. Zhu and B. Liu, “Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, Vol. **18**, no. 2, pp. 172–178, (2013).
- [68] G. Barone, D. M. Frangopol, and M. Soliman, “Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost,” *J. Struct. Eng.*, Vol. **140**, no. 2, p. 4013043, (2014).
- [69] Y. Dong, D. M. Frangopol, and D. Saydam, “Pre-Earthquake Multi-Objective Probabilistic Retrofit Optimization of Bridge Networks Based on Sustainability,” *J. Bridg. Eng.*, Vol. **19**, no. 6, p. 4014018, (2014).
- [70] A. N. Fontán, S. Hernández, and A. Baldomir, “Simultaneous Cross Section and Launching Nose Optimization of Incrementally Launched Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, Vol. **19**, no. 3, p. 4013002, (2014).
- [71] N. Islam, S. Rana, R. Ahsan, and S. N. Ghani, “An Optimized Design of Network Arch Bridge using Global Optimization Algorithm,” *Adv. Struct. Eng. Dyn. Vol. Two*, Vol. **17**, no. 2, pp. 921–932, (2014).
- [72] a. Kaveh, T. Bakhshpoori, and M. Barkhori, “Optimum design of multi-span composite box girder bridges using Cuckoo Search algorithm,” *Steel Compos. Struct.*, Vol. **17**, no. 5, pp. 705–719, (2014).
- [73] J. V. Martí, V. Yepes, F. González-Vidoso, and A. Luz, “Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos memáticos híbridos,” *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, Vol. **30**, no. 3, pp. 145–154, (2014).
- [74] R. Al-Rousan, R. H. Haddad, and A. A. H. Mutaz, “Optimization of economic practicability of fiber-reinforced polymer (FRP) cable-stayed bridge decks,” *Bridg. Struct.*, Vol. **10**, no. January, pp. 129–143, (2014).
- [75] K. Yail, S. W. Hyun, J. Y. Kang, and J. S. Park, “Anchorage configuration for post-tensioned NSM CFRP upgrading constructed bridge girders,” *Eng. Struct.*, Vol. **79**, no. September, pp. 256–266, (2014).
- [76] T. Zordan, B. Briseghella, and T. Liu, “Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, Vol. **1**, no. 4, pp. 280–292, (2014).



- [77] V. Bisadi and J. E. Padgett, “Explicit Time-Dependent Multi-Hazard Cost Analysis Based on Parameterized Demand Models for the Optimum Design of Bridge Structures,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. **30**, no. December, pp. 541–554, (2015).
- [78] H. Cai and A. J. Aref, “A genetic algorithm-based multi-objective optimization for hybrid fiber reinforced polymeric deck and cable system of cable-stayed bridges,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, Vol. **52**, no. May, pp. 583–594, (2015).
- [79] Z. Chen, H. Cao, K. Ye, H. Zhu, and S. Li, “Improved Particle Swarm Optimization-Based Form-Finding Method for Suspension Bridge Installation Analysis,” *J. Comput. Civ. Eng.*, Vol. **29**, no. 3, p. 4014047, (2015).
- [80] T. García-Segura, V. Yepes, J. Alcalá, and E. Pérez-López, “Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges,” *Eng. Struct.*, Vol. **92**, pp. 112–122, (2015).
- [81] E. Honarvar, S. Sritharan, M. Asce, J. M. Rouse, S. Aaleti, and A. M. Asce, “Bridge Decks with Precast UHPC Waffle Panels: A Field Evaluation and Design Optimization,” *J. Bridg. Eng.*, Vol. **21**, no. 1, p. 4015030, (2015).
- [82] A. Luz, V. Yepes, F. González-Vidosa, and J. V. Martí, “Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica,” *Inf. la construcción*, Vol. **67**, no. 540, p. e114, (2015).
- [83] J. V. Martí, V. Yepes, and F. González-Vidosa, “Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement,” *J. Struct. Eng.*, Vol. **141**, no. 2003, p. 4014114, (2015).
- [84] A. M. B. Martins, L. M. C. Simoes, and J. H. J. O. Negrão, “Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities,” *Comput. Struct.*, Vol. **155**, no. Marh, pp. 18–27, (2015).
- [85] A. M. B. Martins, L. M. C. Simões, and J. H. J. O. Negrão, “Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, Vol. **51**, no. October, pp. 757–772, (2015).
- [86] S. Sabatino, D. Frangopol, and Y. Dong, “Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude,” *Eng. Struct.*, Vol. **102**, no. September, pp. 310–321, (2015).
- [87] D. Saydam, M. Asce, D. M. Frangopol, and D. M. Asce, “Risk-Based Maintenance Optimization of Deteriorating Bridges,” *J. Struct. Eng.*, Vol. **141**, no. 4, p. 4014120, (2015).
- [88] V. Yepes, J. V. Martí, and T. García-Segura, “Cost and CO<sub>2</sub> emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm,” *Autom. Constr.*, (2015).
- [89] X. T. Zhang, X. J. Chen, J. M. Huang, H. M. Zhou, and Q. Wang, “Optimum Design of Bridge Cross Section with Low Clearance Considering Wave Load Effects Based on Numerical Wave-Tank,” *J. Coast. Res.*, Vol. **73**, no. Winter 2015, pp. 232–237, (2015).
- [90] D. Bruno, P. Lonetti, and A. Pascuzzo, “An optimization model for the design of network arch bridges,” *Comput. Struct.*, Vol. **170**, no. July, pp. 13–25, (2016).

- [91] B. Bruno, L. Fenu, Y. Feng, C. Lan, E. Mazzarolo, and T. Zordan, “Optimization Indexes to Identify the Optimal Design Solution of Shell-Supported Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, Vol. **21**, no. 3, pp. 1–12, (2016).
- [92] J. V. Martí, T. García-Segura, and V. Yepes, “Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy,” *J. Clean. Prod.*, Vol. **120**, pp. 231–240, (2016).
- [93] L. Saad, a. Aissani, a. Chateaneuf, and W. Raphael, “Reliability-based optimization of direct and indirect LCC of RC bridge elements under coupled fatigue-corrosion deterioration processes,” *Eng. Fail. Anal.*, Vol. **59**, pp. 570–587, (2016).
- [94] L. M. C. Simões, A. M. B. Martins, and J. H. J. O. Negrão, “Optimum design of concrete cable-stayed bridges,” *Eng. Optim.*, Vol. **48**, no. 5, pp. 772–791, (2016).
- [95] J. H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” *Univ. Michigan Press*, (1975).
- [96] P. Zastrow, F. Molina-Moreno, T. Garcia-Segura, J. V. Marti and V. Yepes, “Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: A parametric study,” *J. Clean. Prod.*, Vol. **140**, pp. 1037–1048, (2016).
- [97] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, J.V. Martí and V. Yepes, “A review of multi-criteria decision making methods applied to the sustainable bridge design,” *Sustainability*, Vol. **8**, p. 1295, (2016).
- [98] V. Yepes, J. V. Martí, T. García-Segura, and F. González-Vidosa, “Heuristics in optimal detailed design of precast road bridges,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, doi:10.1016/j.acme.2017.02.006, (2017).
- [99] T. García-Segura, V. Yepes, and D. M. Frangopol, “Multi-objective design of post-tensioned concrete road bridges using artificial neural networks,” *Struct. Multidisciplinary Optim.*, doi:10.1007/s00158-017-1653-0, (2017).
- [100] A. Carbonell, F. González-Vidosa and V. Yepes, “Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization”, *Advances in Engineering Software*, Vol. **42**, pp. 151-159, (2011).
- [101] V. Yepes, F. González-Vidosa, J. Alcalá and P. Villalba, “CO<sub>2</sub>-Optimization design of reinforced concrete retaining walls based on a VNS-threshold acceptance strategy”, *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. **26**, pp. 378-386, (2012).
- [102] T. García-Segura, V. Yepes, J.V. Martí and J. Alcalá, “Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. **11**, pp. 1190-1205, (2014).
- [103] J. A. Martínez and A. M. Artola, “Investigación descriptiva: análisis de la información.” *Material Docente, Ficha 14: Análisis de correspondencias. Universitat Oberta de Catalunya, Departament de estadística aplicada, Barcelona*, pp. 74–84.
- [104] D. Jato-Espino, E. Castillo-Lopez, J. Rodriguez-Hernandez and J.C. Canteras-Jordana, “A review of application of multi-criteria decision making methods in construction”, *Automation in Construction*, Vol. **45**, pp. 151-162, (2014).
- [105] I. Zamarrón-Mieza, V. Yepes and J.M. Moreno-Jiménez, “A systematic review of application of multi-criteria decision analysis for aging-dam management”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. **147**, pp. 217-230, (2017).