

# **Redefiniendo el Diseño de Puentes: Optimización Sostenible y Eficiente mediante Metamodelos**

Una síntesis de la investigación doctoral  
de Lorena Yepes Bellver

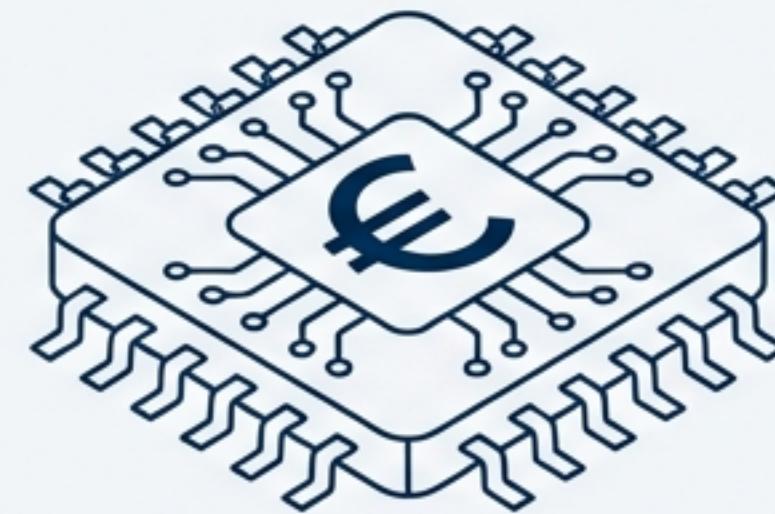
Universitat Politècnica de València

# El diseño tradicional de puentes: un desafío de alta complejidad, coste e impacto



## Complejidad Inherente

El diseño estructural presenta una alta dimensionalidad y complejidad combinatoria. La dependencia de la experiencia del ingeniero no garantiza soluciones óptimas a nivel global.



## Coste Computacional y Económico

Los métodos tradicionales, como el Análisis por Elementos Finitos (FEA), son computacionalmente intensivos. Los puentes losa representan entre el 5% y el 15% del coste total de los proyectos de transporte terrestre.

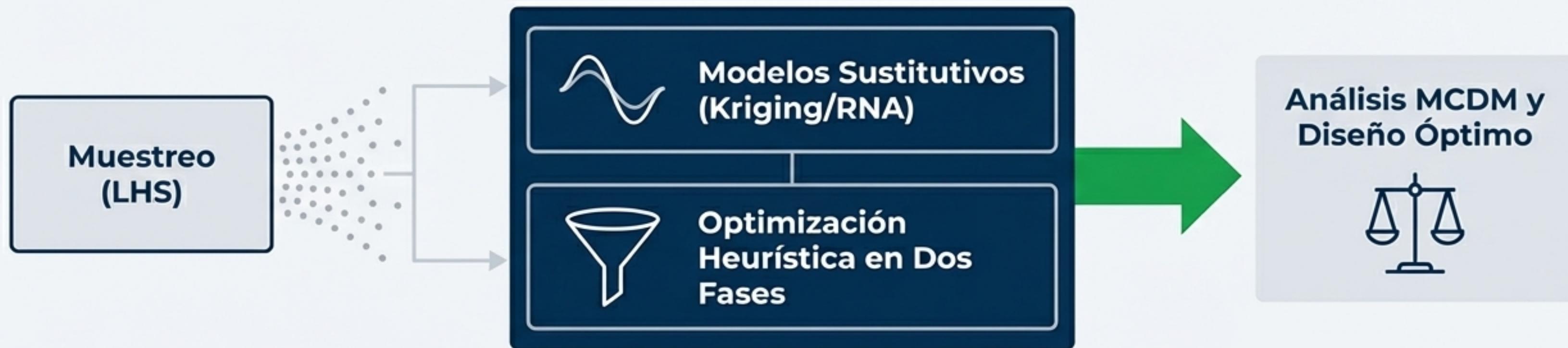


## Impacto Ambiental

El sector de la construcción es responsable del 37% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía y del 50% de los materiales extraídos globalmente.

# Nuestra propuesta: Una metodología sistemática para un diseño óptimo y sostenible

Esta tesis desarrolla una metodología para reducir costes, emisiones de CO<sub>2</sub> y energía incorporada, sin comprometer la viabilidad estructural o económica del puente.



## 1. Modelos Sustitutivos

**(Metamodelos):** Uso de técnicas como Kriging y Redes Neuronales Artificiales (RNA) para aproximar respuestas complejas, reduciendo drásticamente el tiempo de cálculo.

## 2. Optimización Heurística en Dos Fases:

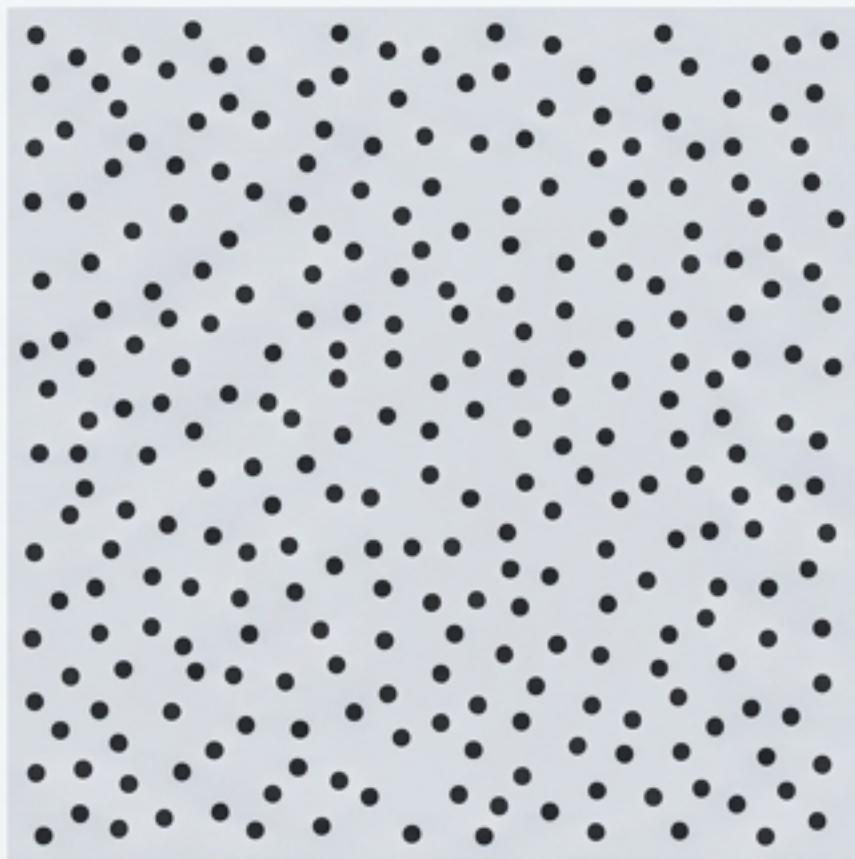
Un marco robusto que primero explora ampliamente el espacio de diseño (Diversificación) y luego refina la búsqueda de soluciones óptimas (Intensificación).

## 3. Enfoque Multicriterio:

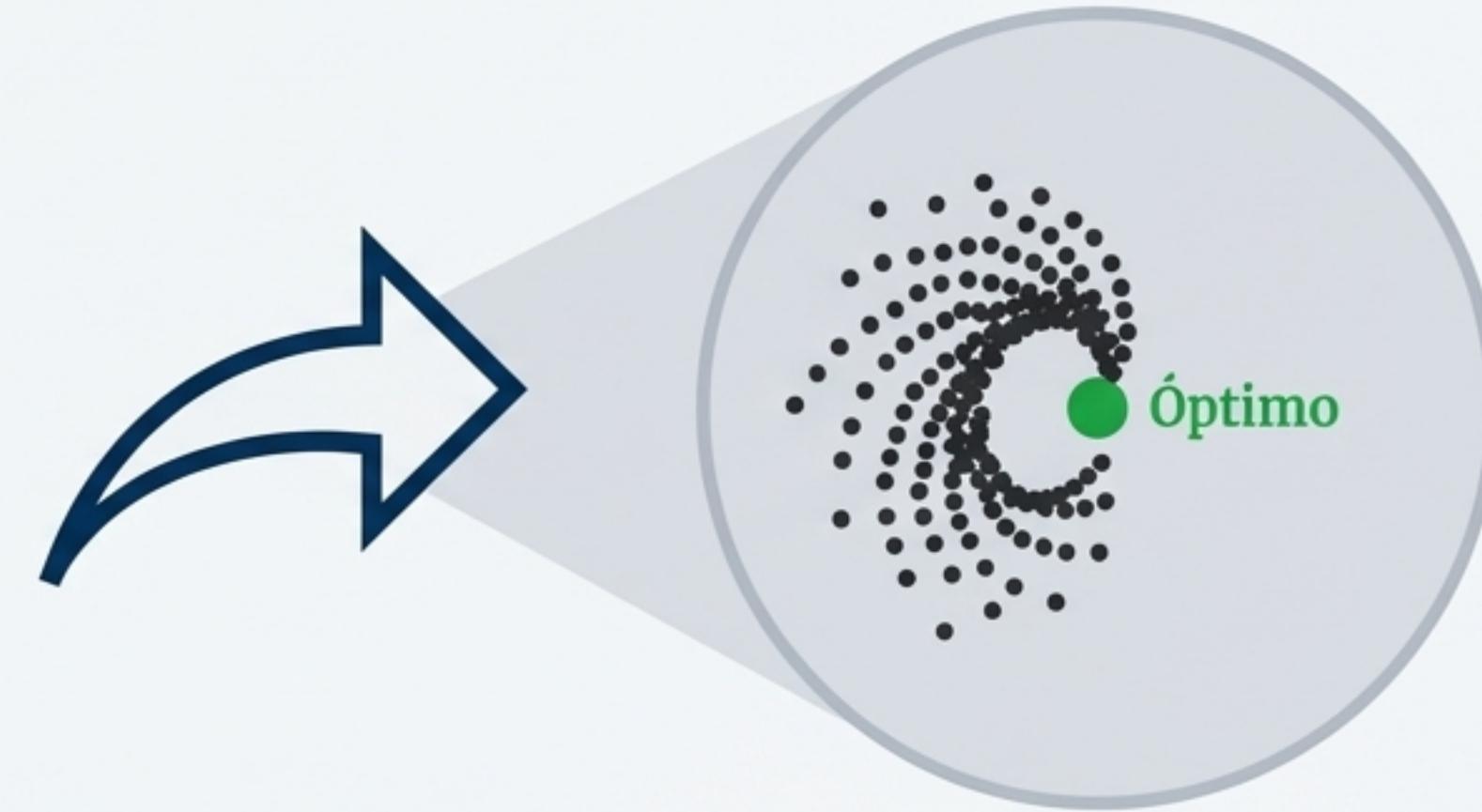
Integración de objetivos económicos, ambientales y estructurales para encontrar soluciones de compromiso equilibradas.

# Cómo funciona: De la exploración amplia a la optimización precisa

Fase 1: Diversificación  
(Exploración Global)



Fase 2: Intensificación  
(Explotación Local)



**Objetivo:** Realizar una exploración amplia del espacio de diseño para identificar regiones de interés y capturar tendencias globales.

**Método:** Muestreo por Hipercubo Latino (LHS) para generar un conjunto diverso de diseños iniciales.

**Objetivo:** Refinar la búsqueda en las regiones prometedoras para converger en una solución óptima.

**Método:** Algoritmos heurísticos (Simulated Annealing, TAMO) operando sobre la superficie de respuesta del metamodelo.

Dato de Eficiencia: Esta metodología reduce el tiempo de cómputo hasta en un **99.06%** en comparación con la optimización heurística tradicional, obteniendo resultados con una desviación de solo el **2.54%**.

## **Impacto en Coste: La optimización reduce el gasto un 6.54% minimizando el uso de materiales**

El método de optimización basado en Kriging conduce a una reducción de costes del 6.54%, principalmente mediante la minimización del uso de materiales clave.

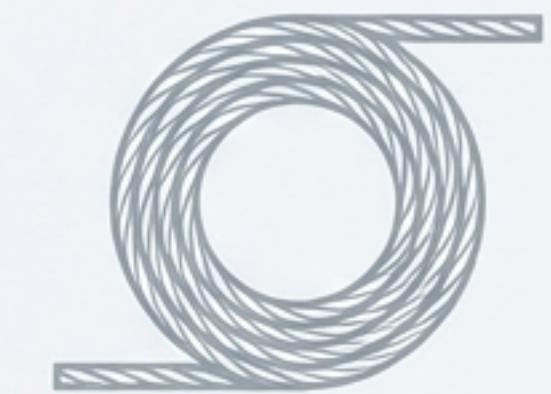


**-14.8%**

Hormigón

**6.54%**

**Reducción de Coste**



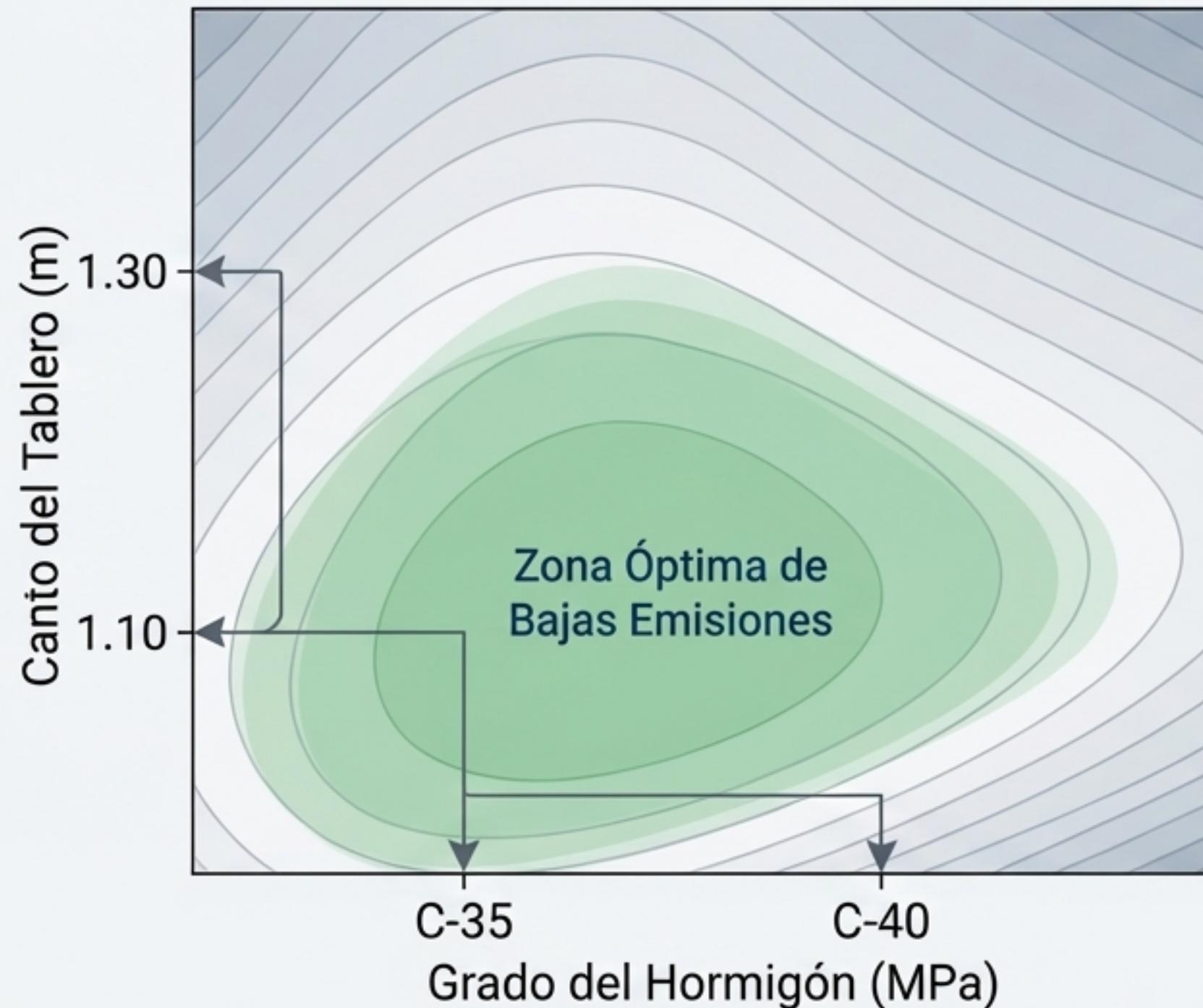
**-11.25%**

Acero Activo  
(postesado)

Estas reducciones en el consumo de material se consiguen manteniendo la integridad estructural y la capacidad de servicio del puente.

# Impacto en CO<sub>2</sub>: Diseñando puentes con una menor huella de carbono

La metodología identifica parámetros de diseño óptimos que minimizan las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la construcción.



## Parámetros de Diseño Óptimos para Bajas Emisiones:

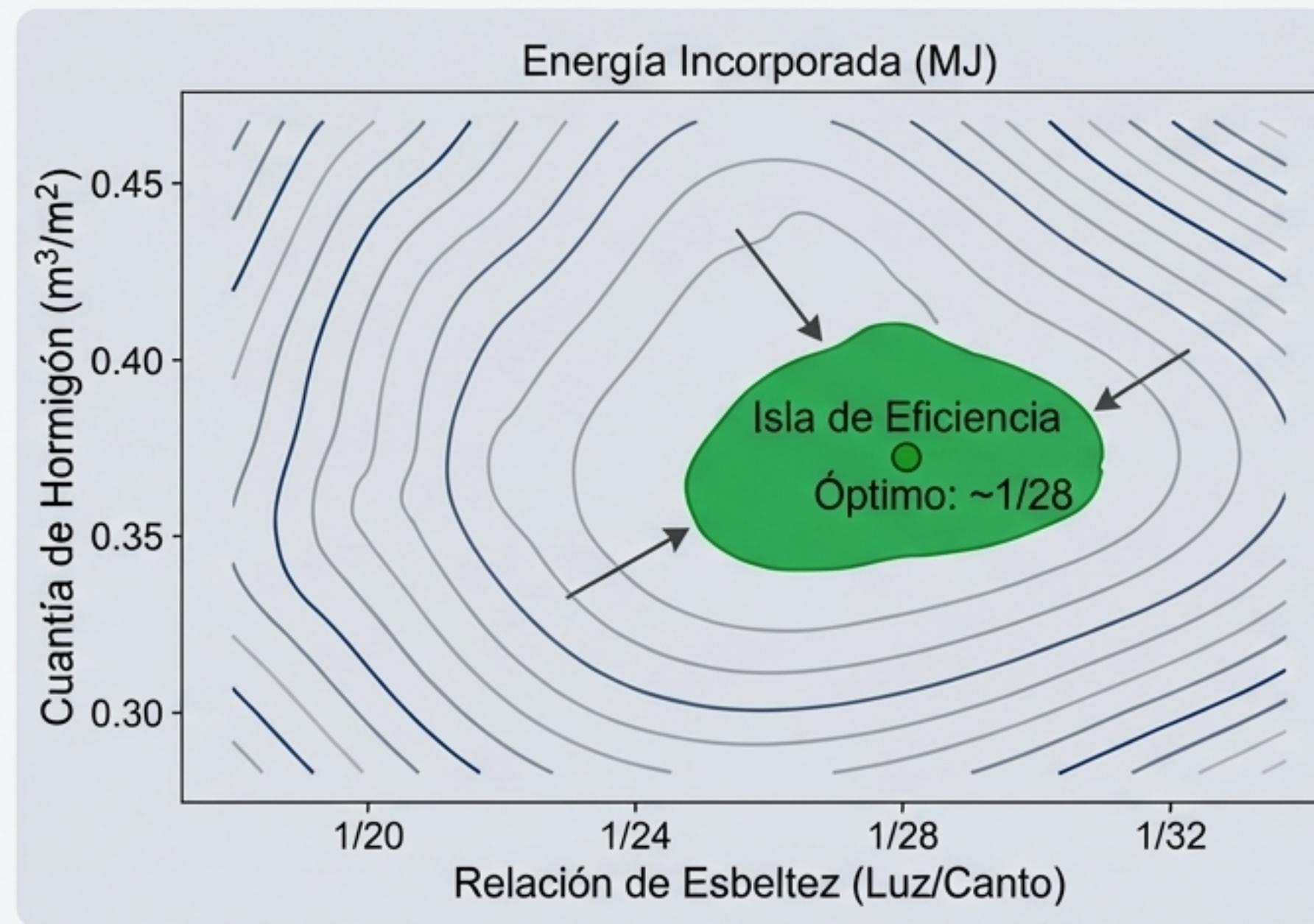
- **Resistencia del Hormigón:** Entre C-35 y C-40 MPa.
- **Canto del Tablero:** Entre 1.10 y 1.30 metros.
- **Ancho de Base:** Entre 3.20 y 3.80 metros.

### La Clave del 'Trade-Off'

Un modesto aumento de los costes de construcción (menos del 1%) puede reducir sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub> (más del 2%), demostrando que el diseño sostenible es económicamente viable.

# Impacto en Energía: Una mayor esbeltez y un uso eficiente de materiales reducen la energía incorporada

La optimización identifica configuraciones que mejoran drásticamente la eficiencia energética del diseño.



Parámetros Críticos para la Eficiencia Energética:

- **Alta Relación de Esbeltez:** Óptima en torno a 1/28.
- **Uso Mínimo de Hormigón y Armadura Activa:** Reducir el consumo de los materiales más intensivos en energía.
- **Aumento de la Armadura Pasiva:** Para compensar las reducciones anteriores y mantener la integridad estructural.

# Comparativa de Modelos Predictivos: Kriging y Redes Neuronales (RNA) son herramientas complementarias

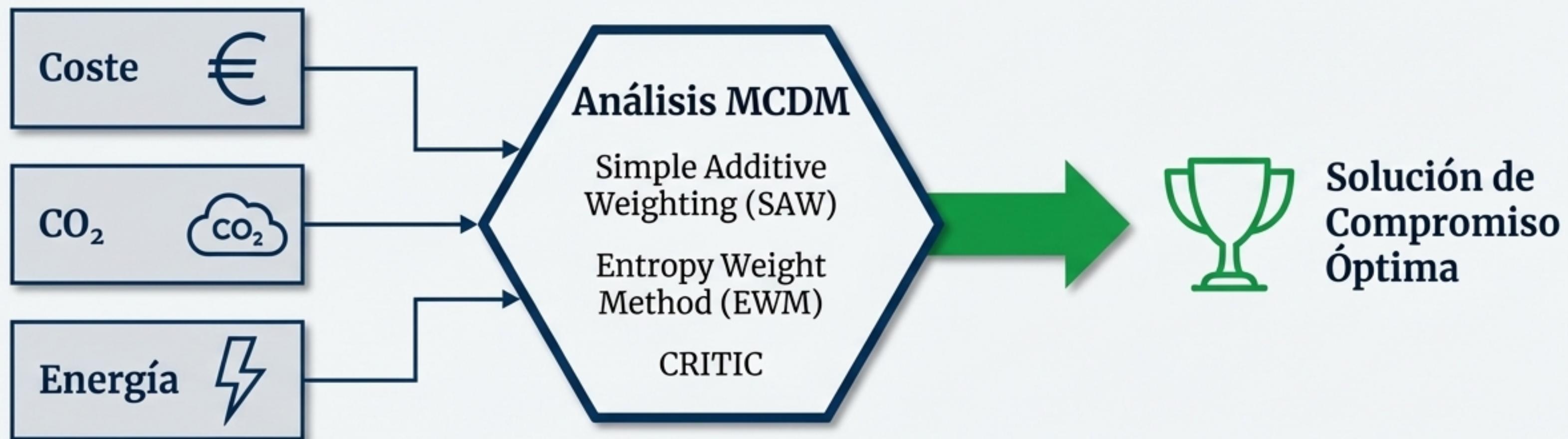
Ambos modelos son eficaces, pero destacan en diferentes aspectos del proceso de optimización.

| Kriging   | Redes Neuronales (RNA)   |
|---|--|
|     | Más eficaz para identificar óptimos locales de forma precisa. Ideal para la fase de intensificación.                       |
|    | Puede presentar un mayor error en predicciones absolutas en comparación con las RNA.                                       |
|   | Mayor precisión en las predicciones absolutas (menor error MAE y RMSE). Ideal para una evaluación general del rendimiento. |
|  | Puede requerir múltiples ejecuciones para estabilizar los resultados debido a su naturaleza estocástica.                   |

La elección del modelo depende del objetivo. Kriging es superior para la optimización intensiva, mientras que las RNA son preferibles para la predicción precisa.

# El Panorama Completo: Encontrando el equilibrio con la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM)

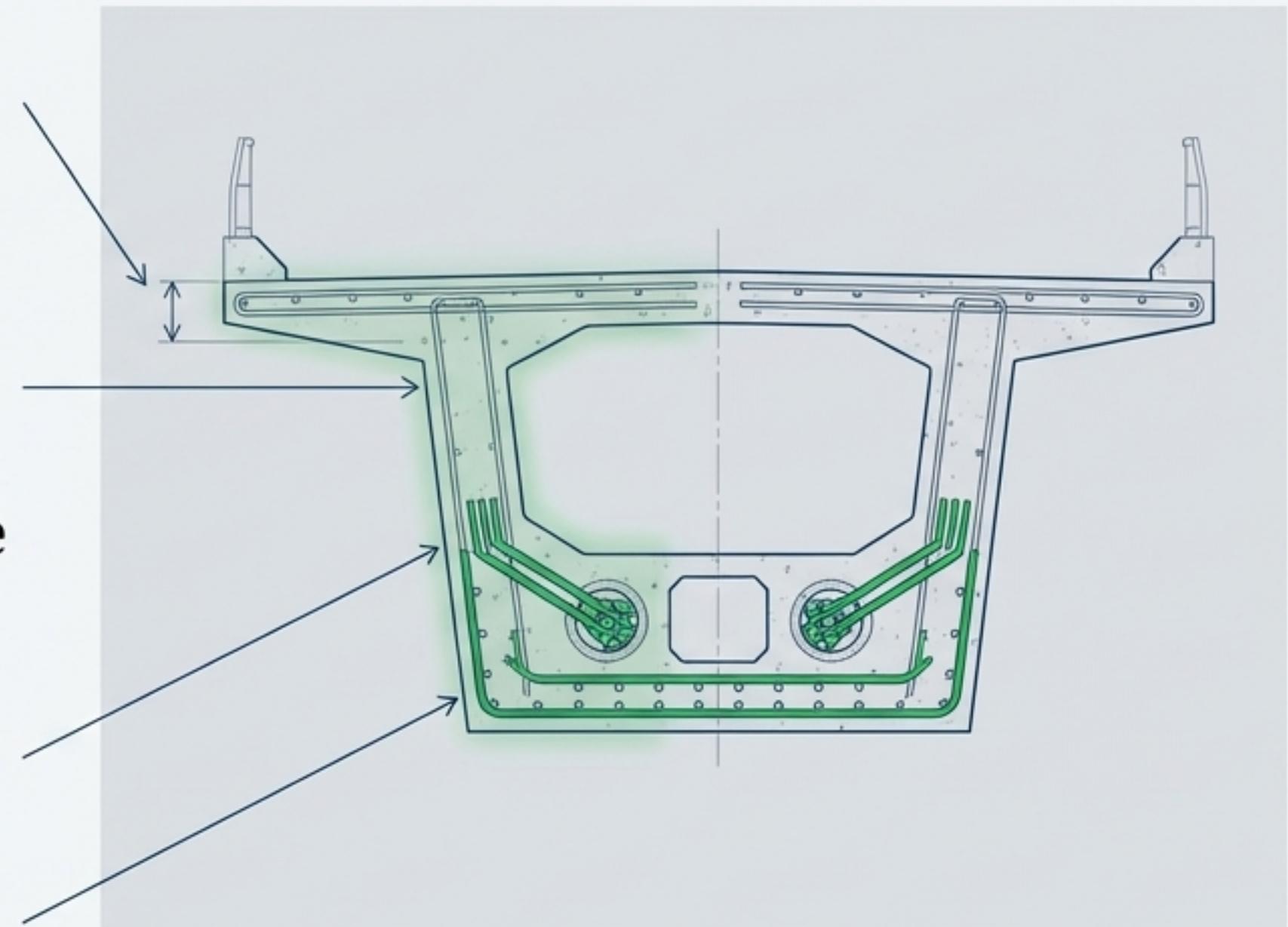
La investigación integra la optimización basada en Kriging con técnicas MCDM para evaluar y clasificar diseños considerando simultáneamente objetivos económicos, ambientales y estructurales.



Este enfoque permite una evaluación exhaustiva de las alternativas, gestionando los trade-offs entre coste, impacto ambiental y rendimiento estructural para facilitar la selección de diseños óptimos que se ajusten a los objetivos de sostenibilidad.

# Directrices prácticas para el diseño de puentes losa más sostenibles y eficientes

- **Ebeltez (Canto/Luz):** Buscar relaciones altas, en el rango de **1/28 a 1/30**, para minimizar el consumo de material.
- **Hormigón:**
  - **Cantidad:** Reducir el volumen a valores inferiores a **0.60 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>**.
  - **Resistencia:** Utilizar grados **C-35 a C-40 MPa**, que ofrecen el mejor equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad.
- **Armaduras:**
  - **Activa (Postesado):** Disminuir la cuantía por debajo de **17 kg/m<sup>2</sup>**.
  - **Pasiva:** Aumentar la cuantía por encima de **120 kg/m<sup>3</sup>** para compensar las reducciones anteriores.



# Un marco computacionalmente eficiente para el diseño de puentes sostenibles

## Contribución Principal

- ✓ Esta tesis demuestra que el modelado sustitutivo (Kriging y RNA) es un enfoque práctico y potente para la optimización multicriterio en el diseño de puentes.
- ✓ El marco de optimización en dos fases es una metodología robusta, eficiente y directamente aplicable a proyectos de infraestructura a gran escala.
- ✓ Se proporcionan directrices de diseño cuantificadas que equilibran coste, sostenibilidad y rendimiento estructural.

## Futuras Líneas de Investigación

- ➔ **Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Completo:** Integrar el mantenimiento, la deconstrucción y el reciclaje.
- ➔ **Nuevas Tipologías y Materiales:** Aplicar la metodología a otros tipos de puentes y explorar materiales de baja huella de carbono (hormigones verdes, etc.).
- ➔ **Herramientas en Tiempo Real:** Desarrollar herramientas que integren estos modelos de optimización directamente en el software de diseño de ingeniería.