

Evaluación de la huella hídrica en la edificación

Reducción del consumo de agua en los proyectos de construcción mediante curados alternativos del hormigón

Evaluation of the water footprint in buildings

Reduction of water consumption in construction projects through alternative concrete curing methods

Manuel de Vicente Peñafiel^{1*}, Francisco José Sánchez Medrano²

¹UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia. España. Email: manuel.devicente@vcaarquitectura.es

²UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia. España. Email: fjsanchez@ucam.edu

*Correspondence: Email: manuel.devicente@vcaarquitectura.es

Resumen

A raíz de la creciente escasez de agua dulce, el estudio evalúa la sostenibilidad mediante la huella hídrica, de 66 partidas de hormigón pertenecientes a una muestra de 25 obras ejecutadas en España durante el ejercicio anual de una constructora, comparando el curado convencional con alternativas basadas en la carbonatación acelerada con CO₂ en elementos prefabricados, y el empleo de agregados marinos en los hormigones in situ, caracterizando el impacto mediante el modelo AWARE, e interpretándolo con indicadores DALY y PDF. Los resultados indican que, mientras el 70% de reducción sobre la huella hídrica del curado con CO₂, repercute un 19% en la demanda de agua global de las partidas, la reducción del 84% sobre el material en los agregados marinos, reducen el consumo global un 15%, concluyendo la viabilidad técnica y económica de ambas estrategias, y destacando la alternativa del CO₂ por sus beneficios ambientales más inmediatos.

Palabras clave: construcción sostenible; extracción de agua dulce; curado con CO₂; agua de mar; áridos marinos.

Abstract

Due to freshwater scarcity, this study evaluates the water footprint of 66 concrete items drawn from 25 Spanish building projects completed in one year, comparing conventional curing route against alternatives based on accelerated carbonation with captured CO₂ for precast elements, and the use of marine aggregates in in situ concretes. Impacts are characterised with the AWARE model, interpreted through DALY and PDF indicators, and inventories show that a 70% cut in the curing water footprint of CO₂ translates into a 19% drop in the overall water demand of the analysed items, whereas an 84% material-level saving from marine aggregates yields a 15% global reduction, concluding how both strategies are technically and economically feasible, with CO₂ curing offering the fastest environmental return.

Keywords: sustainable construction; freshwater withdrawal; CO₂ curing; seawater; marine aggregates.

INTRODUCCIÓN

El agua siempre ha sido símbolo de vida, de evolución y de energía, pero cada vez más de escasez. La relación de la humanidad con este recurso ha sido cambiante: desde buscar controlarla o gestionarla hasta suplirla, buscando asegurar su disponibilidad futura como recurso estratégico. La creciente necesidad de agua dulce a nivel global, agravada por el auge demográfico y la urbanización, plantea un desafío crítico para la sostenibilidad. Diversos informes internacionales advierten que, de seguir las tendencias actuales, en 2030 la demanda mundial de agua podría exceder un 40% la oferta disponible¹. En este contexto destaca el sector de la construcción, tanto por su dependencia del agua como por su contribución al estrés hídrico, siendo el hormigón —el material constructivo más utilizado en el mundo— la segunda sustancia más consumida por la humanidad, solo por detrás del propio agua². Con una producción responsable del 9% de las extracciones industriales de este recurso en 2012 y al 1,7% del total, pudiendo alcanzar el 75% para el año 2050 la procedente de regiones con estrés hídrico³, la presión del binomio construcción-hormigón evidencia la necesidad de mejorar la sostenibilidad hídrica del sector.

Frente a este escenario, la huella hídrica (HH) surge como un indicador capaz de cuantificar el impacto sobre los recursos de agua dulce, midiendo el volumen consumido a lo largo del ciclo de vida de un elemento, así como su volumen asociado de agua contaminada⁴. Este concepto, introducido por Hoekstra y colaboradores en 2002 y estandarizado en la norma ISO 14046:2014, ha ganado terreno conforme aumenta la conciencia sobre la crisis del agua. En España, el primer análisis detallado de HH en una promoción residencial demostró la viabilidad de este enfoque en proyectos reales⁵.

Históricamente, la atención del sector así como la mayoría de estrategias de sostenibilidad se han centrado en reducir la huella de carbono (HC), relegando la gestión del agua a un segundo plano. Y aunque es comprensible por el papel del carbono en el cambio climático, el vacío que deja en la evaluación ambiental puede superar al de CO₂, especialmente en regiones áridas. Se busca así una perspectiva complementaria entre ambas huellas⁶, donde la integración de carbono y agua permita evaluar la sostenibilidad de forma más completa.

Dada la ineeficacia de medidas técnicas y normativas para reducir la HH al tener carácter voluntario, y la inviabilidad de eliminar el hormigón debido a su función estructural y a la ausencia de sustitutos equivalentes, el objetivo apunta a optimizar su ciclo de vida. Por ello, el estudio propone cuantificar la HH, su relación ambiental-económica en partidas de hormigón ejecutadas y su potencial de reducción mediante curados¹ alternativos, proporcionando evidencias objetivas y medibles que orienten a proyectistas, empresas y administraciones, en la adopción de soluciones constructivas más resilientes en entornos con estrés hídrico.

Por un lado, el uso de agua y áridos marinos aprovecha los recursos salinos en regiones donde el agua dulce escasea, reduciendo la necesidad de lavar agregados con agua potable. Esta estrategia disminuiría la HH hasta un 12%, alcanzando el 84% junto a la sustitución con áridos terrestres⁷. Sin embargo, los cloruros y sulfatos que aceleran la corrosión de las armaduras genera preocupaciones de durabilidad, prohibiendo la norma EN 1008 su uso en hormigones armados⁸ incluso planteando soluciones como armaduras no metálicas o tratamientos inhibidores de corrosión. También deben considerarse los impactos en ecosistemas marinos y las cargas ambientales derivadas del transporte o la desalinización, siendo aspectos que requieren mayor investigación para evitar impactos colaterales.

Otra línea de investigación es el curado de elementos prefabricados con dióxido de carbono (CO₂) o carbonatación acelerada, concebida inicialmente para reducir las emisiones de CO₂. Este método inyecta CO₂ en una cámara cerrada en lugar de agua o vapor, reduciendo la HC entre el 40% y 70% al disminuir la proporción de clínker² y fijar parte del CO₂ en el material⁹, y sustituyendo el agua de curado, recuperándola mediante circuito cerrado entre un 70% y 80%¹⁰. Además, los estudios realizados son limitados, pero han demostrado que permite alcanzar en horas resistencias equivalentes a los 28 días del curado clásico⁹.

Esta comparación entre soluciones tradicionales, y curados sostenibles —mediante CO₂ o recursos marinos— permite evaluar su potencial de reducción y viabilidad real, aportando evidencia cuantificable para la toma de decisiones técnicas y normativas. A través de estas dos vías, se analizan las partidas de 25 proyectos de edificación construidos en España (viviendas y equipamientos públicos) bajo distintos entornos técnicos, distinguiendo tres grupos: elementos prefabricados o susceptibles de serlo; partidas de hormigón armado in situ no transformables; y partidas de hormigón en masa sin armados. Esta diferenciación permite identificar cómo las decisiones en fase de proyecto, la industrialización o la tipología de obra condicionan el margen de reducción de HH y su puesta en práctica.

DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Para determinar la huella hídrica (HH) de la muestra según la norma ISO 14046, se aplica el marco metodológico del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), encargado de evaluar los impactos ambientales de un producto o proceso desde la extracción de materias primas hasta su fin de vida (de la cuna a la tumba) y cuya norma ISO 14040:2006 estructura en cuatro fases: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados. Se toman como referencia los datos del estudio de Vía Célere⁵ y Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), siguiendo la unidad común del uso de agua dulce, para posteriormente, completar el proceso (figura 1) evaluando su impacto económico.

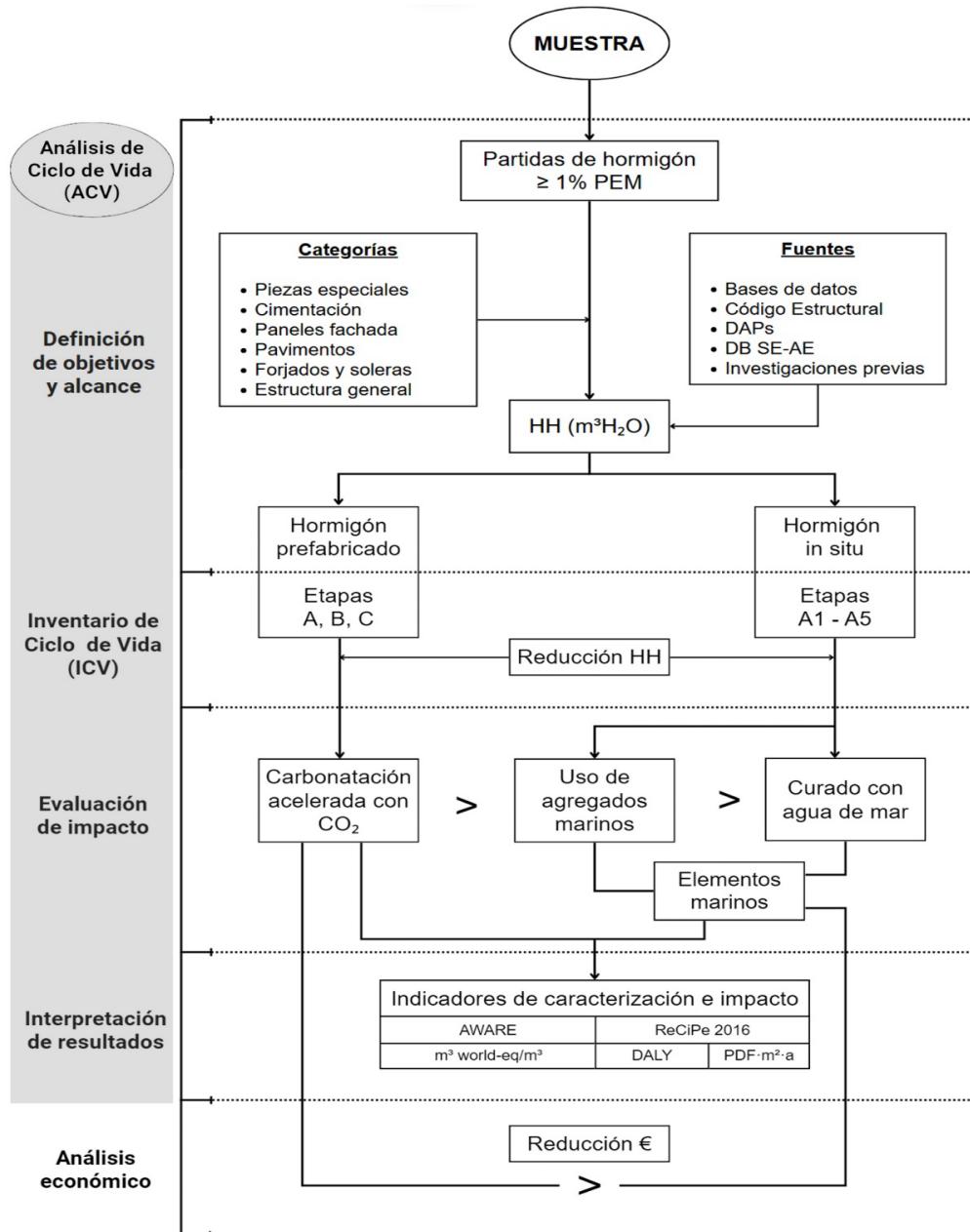


Figura 1: Esquema metodológico

Autor: Manuel de Vicente Peñafiel

Fuente: Elaboración propia (2025)

Definición de objetivos y alcance

El estudio se desarrolla sobre veinticinco obras adjudicadas a una constructora de ámbito nacional durante el ejercicio 2019, distribuidas por el territorio español y con presupuestos de ejecución material³ (PEM) comprendidos entre 1.000.000 y 14.000.000 €. El objetivo principal es cuantificar la huella hídrica (HH) asociada a las partidas de hormigón y evaluar su potencial de reducción mediante alternativas al curado con agua dulce. Para ello se comparan dos estrategias: (1) curado con dióxido de carbono (CO₂) como agente de endurecimiento; (2) curado con agua marina, con una variante donde se combina con la sustitución total de áridos terrestres por agregados marinos, garantizando en todos los casos la equivalencia funcional respecto al método tradicional.

La unidad funcional declarada es el metro cúbico de agua (m³H₂O), reportado como m³H₂O/año para asegurar una comparativa fiel entre obras o ejercicios posteriores. Las partidas, medidas originalmente en m, m² o m³, se adaptan a esta métrica según sus descripciones técnicas y valores medios, contrastados mediante el Código Estructural (Real Decreto 470/2021), el DB SE-AE⁴, bases de datos reconocidas (Ecoinvent v3.5 y DAPs específicas) y el estudio de Vía Célere⁵, complementados con investigaciones previas sobre los curados alternativos propuestos.

Los límites del sistema adoptan un enfoque “de la cuna a la puerta” incluyendo las etapas A1-A3 (extracción y fabricación) y A4 (transporte). En los elementos prefabricados se amplía a A5 (instalación) y C1-C4 (fin de vida), por su relevancia hídrica y su distinta gestión respecto al vertido tradicional. Este alcance responde a la práctica habitual en las DAPs, centrando el análisis en las fases que concentran el mayor impacto hídrico y garantizando la representatividad ambiental de los resultados.

Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El Inventario del Ciclo de Vida (ICV) consiste en identificar los flujos de agua empleada y contaminada en las actividades necesarias para la ejecución de las partidas de hormigón dentro de los límites del sistema. Se cuantifica tanto el volumen directamente utilizado en los procesos productivos como el requerido de forma indirecta para la energía consumida en la cadena de suministro.

La etapa A del ciclo de vida del hormigón abarca la extracción de materias primas y lavado de materiales (A1), el transporte de las mismas (A2) cuyas distancias y tipos de vehículos se determinan con datos de proveedores o el estudio de Vía Célere⁵, y la producción industrial (A3) relativa a la fabricación del clínker y molienda del cemento, donde se analizan los consumos de combustibles, incluyendo los usos auxiliares de planta, como la iluminación o los ensayos de laboratorio. En el caso de los prefabricados se incorporan, además, las operaciones de mezclado, compactación y tratamiento térmico, constituyendo el conjunto la fase denominada “de la cuna a la puerta”, siendo la que contiene mayor incidencia sobre la huella hídrica.

La etapa A4, correspondiente al transporte al lugar de ejecución, se cuantifica de manera equivalente para hormigones premezclados y prefabricados, dada la similitud de su contribución. En partidas de hormigonado in situ, esta etapa constituye la última fase analizada, mientras que en prefabricados continúa con el impacto relevante de la colocación en obra (A5), representando alrededor del 30% de la huella hídrica (HH) de estas partidas. Finalmente, en los elementos prefabricados se incluye el fin de vida (C1-C4) —desmontaje, transporte, tratamiento y disposición final—, cuyos bajos consumos hídricos (0,9-13% del total), explican que muchas DAP no declaran estos módulos.

Analizadas las ofertas de proveedores junto a la documentación técnica, la muestra resulta en 66 partidas de hormigón (distribuidas en 22 de las 25 obras) seleccionadas con un criterio de repercusión ≥1% del presupuesto de ejecución material (PEM). Las categorías de estudio (figura 2) se clasifican según su composición y función (cimentación, estructura, urbanización y cerramientos), agrupándolas operativamente en hormigón premezclado y prefabricado. El volumen total de 4.584.038,31 m³ en el ejercicio anual, equivalente al 10% del PEM promedio e implicando el 0,83% del peso total de las obras analizadas.

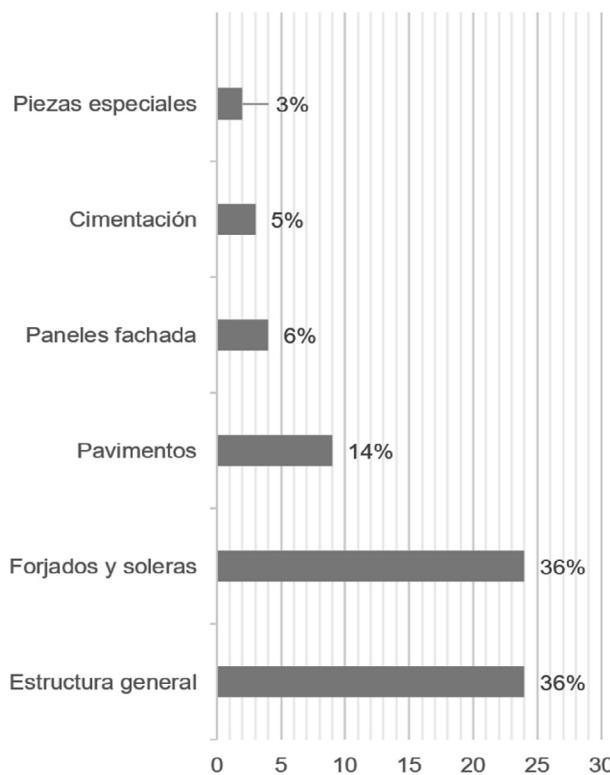


Figura 2: Categorías de las partidas de hormigón

Autor: Manuel de Vicente Peñafiel

Fuente: Elaboración propia (2025)

Evaluación del impacto

Tras obtener los resultados desagregados por categorías, se comparan las alternativas de curado propuestas según las líneas de investigación previamente validadas: el curado del hormigón mediante dióxido de carbono (CO_2)¹¹ se basa en una carbonatación acelerada que reduce significativamente la huella de carbono (HC) y la huella hídrica (HH) en elementos prefabricados, al sustituir el agua de curado y fijar parte del CO_2 emitido en la fabricación del clínker. La segunda línea de análisis procede del estudio experimental de V. Arosio, *et al.*⁷ quienes introducen el uso de agua salada como fluido de mezclado junto con agregados marinos, práctica replicada de países donde la extracción de áridos submarinos es común¹². Para garantizar la homogeneidad del análisis, se normalizan las condiciones de partida, aplicando una metodología uniforme en factores de conversión, límites del sistema y supuestos de impacto.

Proceso de curado mediante CO_2

Apoyado en la captura de CO_2 y su fijación en minerales estables para su aplicación en la carbonatación acelerada del hormigón¹³, los elementos recién moldeados se exponen a una atmósfera enriquecida en CO_2 bajo condiciones controladas de presión, temperatura y humedad. La reacción transforma la portlandita en carbonato cálcico (CaCO_3) liberando agua y gel de sílice (SiO_2), lo que densifica el material en pocas horas (2 a 24) reduciendo un 25% la porosidad y aumentando la resistencia entre un 30 y un 110%. Se absorben 0,18-0,30 kg CO_2 por kg de material tratado, equivalente al 20% de las emisiones de calcinación del clínker¹⁴, en contraste con los 20-25 litros de agua por kg de material que consume la hidratación tradicional. Asociada tradicionalmente a procesos patológicos, la carbonatación se revaloriza como estrategia funcional, al sustituir el agua dulce del curado y reducir alrededor del 70% la demanda hídrica, permitiendo tasas de reciclaje del hormigón superiores al 60%.

Aplicado a la muestra, el consumo hídrico inicial asciende a 4.617.330 m³ H_2O , correspondiendo 1.251.338 m³ H_2O a 30 partidas susceptibles de industrialización y curado con CO_2 (paneles, placas alveolares, pilotes, etc.). Tras aplicar los factores de reducción monitorizados en los prefabricados, la huella hídrica (HH) residual se sitúa en 375.401

m^3H_2O , con un ahorro neto de 875.937 m^3H_2O —equivalente al 70% de la HH de las partidas afectadas y al 19% del consumo hídrico global del ejercicio—. Este ahorro equivale al abastecimiento anual 34.000 habitantes en zonas de estrés hídrico, con una repercusión económica de 1,67 millones de euros, tomando el precio medio ponderado nacional de 1,92 €/ m^3 ¹⁵, lo que representa el 3,01% del coste total de las partidas (5.680.703 €), comparable a la instalación de dos cámaras de curado presurizadas amortizables en menos de cuatro años. Además, la sustitución del curado húmedo por CO_2 elimina el consumo de 5-20 L/kg-día de riego, recuperando el 70-80% dentro del sistema¹⁶, además de reducir la huella de carbono (HC) entre un 40 y 70%⁹.

Proceso de curado mediante agua y agregados marinos

Una planta dosificadora convencional emplea alrededor de 100 m^3H_2O diarios para mezclado, a los que añadir el lavado de agregados y operaciones auxiliares¹⁷. De las 66 partidas intervenidas, 36 pertenecen a hormigones premezclados, cuantificando su huella hídrica HH = 3.365.992 m^3H_2O (módulos A1-A4) y cuya industrialización en prefabricados alteraría sustancialmente los proyectos, surgiendo como alternativa sostenible el uso de agua de mar en el amasado y curado, combinada con agregados marinos para reducir la HH en la fase de fabricación. Este uso se justifica por la abundancia del recurso marino y conservación del agua continental, ya que solo el 3% del total planetario es dulce¹⁸. Además el factor de caracterización AWARE^{5 19} es nulo para el agua salada, reduciendo la HH residual a 3.267.212 m^3H_2O , un 3% menos que el caso base (98.780 m^3H_2O).

En cualquier caso, la mayor reducción proviene de la captura mineral asociada al acelerar la carbonatación y la reducción en la producción de áridos²⁰, eliminando casi por completo dicho consumo al poderse lavar los agregados marinos con la propia agua de mar. Aplicando esta doble sustitución, la HH se reduce a 2.674.532 m^3H_2O (-20%), con un ahorro de 691.461 m^3H_2O respecto al caso base, equivalente al abastecimiento anual de 27.000 habitantes y a un valor económico de 1,32 M €¹⁵. El principal obstáculo técnico es la presencia de cloruros, si bien existen soluciones como armaduras no metálicas, inhibidores de corrosión o diseños sin refuerzo metálico, confirmando los ensayos acelerados resistencias similares al hormigón tradicional a 28 días, situando esta opción como la más eficaz para reducir la huella hídrica en partidas *in situ*.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como última fase en el alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se procede a la discusión de los resultados obtenidos al comparar el caso base de curado con agua dulce frente a las dos vías de mitigación: (I) curado con CO_2 en elementos prefabricados y (II) uso de agua de mar, con y sin sustitución de áridos terrestres por agregados marinos. La lectura realizada en términos de huella hídrica (HH) a escala de partida y muestral agregada, contrasta la eficacia relativa de las alternativas sostenibles sobre la HH inicial, traduciendo los valores a indicadores de caracterización e impacto que permiten expresar los resultados en términos reales más sencillos de interpretar. Por último, se valora su viabilidad práctica bajo condicionantes normativos y económicos, ofreciendo una interpretación medible, comparable y útil para la toma de decisiones en los proyectos y obras.

Eficacia comparada de las alternativas

Los resultados evidencian que la tecnología de curado con CO_2 proporciona la reducción más significativa en lo referente a la huella hídrica (HH) dentro de las alternativas estudiadas. Si bien el proceso de carbonatación acelerada requiere condiciones controladas, el ahorro de agua dulce obtenido es sustancial, reduciendo un 19% el consumo hídrico global de la muestra ($\approx 876.000 m^3H_2O/año$) en el grupo de partidas de elementos prefabricados, y un 70% la HH específica de esos elementos respecto al curado convencional. Según Zhang²¹ la menor demanda de agua en los hormigones carbonatados se debe a la formación de carbonato cálcico ($CaCO_3$) en lugar de geles de silicato cálcico hidratado (C-S-H) que eliminan además la necesidad de curado húmedo. Aunque investigaciones como las desarrolladas por Wong y Kazemian han abordado el potencial del curado con CO_2 en el hormigón²², no se han localizado estudios aplicados que cuantifiquen de forma específica el ahorro hídrico en elementos prefabricados mediante este sistema, más allá del estudio base desarrollado por Solidia Technologies¹⁶ —empresa titular de la patente del proceso— y mucho menos con una base muestral comparable a las obras del estudio, constituyendo una aportación novedosa por su aplicación a casos reales.

El beneficio del curado con agua de mar presenta un carácter más limitado en el cómputo global, con un impacto del 2,14% ($\approx 99.000 m^3H_2O/año$) hasta que su combinación con el proceso de sustitución de áridos terrestres tradicionales por agregados marinos —eliminando la necesidad de lavar los primeros con agua potable— alcanza

ahorros hídricos promedio por partida el 15% ($\approx 691.000 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O/año}$). Estas cifras puntuilan el potencial máximo señalado por autores como Arosio, cuyas disminuciones de hasta un 12% con agua marina y un 84% al reemplazar también los áridos se formulan al nivel del hormigón como material, mientras en la práctica constructiva evidenciada en el análisis de las 25 obras de la muestra, la mayoría de partidas que contienen hormigón (aun siendo el componente principal en peso y coste) integran mayor variedad de elementos en sus descompuestos: acero, mano de obra, maquinaria, medios auxiliares etc. Esta composición explica la diferencia entre los resultados teóricos y las reducciones efectivas a nivel de partida, donde el efecto del material se diluye en el conjunto, quedando reforzada esta complejidad por las limitaciones técnicas y normativas actuales, como el riesgo de corrosión en armaduras metálicas que restringe el uso de agua salada en hormigones armados y condicionan su escalabilidad²³.

En síntesis, el uso de agua de mar se confirma como la alternativa menos eficaz (figura 3) incluso tras su combinación con agregados marinos, reduciendo el consumo de agua dulce en un 15%, quedando a cuatro puntos porcentuales de la obtenida mediante carbonatación acelerada. El curado con CO_2 se perfila, por tanto, como la opción más prometedora a corto plazo, al ofrecer reducciones superiores respecto a la alternativa marina, mayor viabilidad industrial inmediata y beneficios climáticos adicionales resultado de la fijación de CO_2 al material, reduciendo la huella de carbono (HC) asociada al hormigón. El agua salada por su parte no puede garantizar la ausencia de un *trade-off*⁶ que podría incrementar otras cargas ambientales si implica los procesos de destilación o transporte.

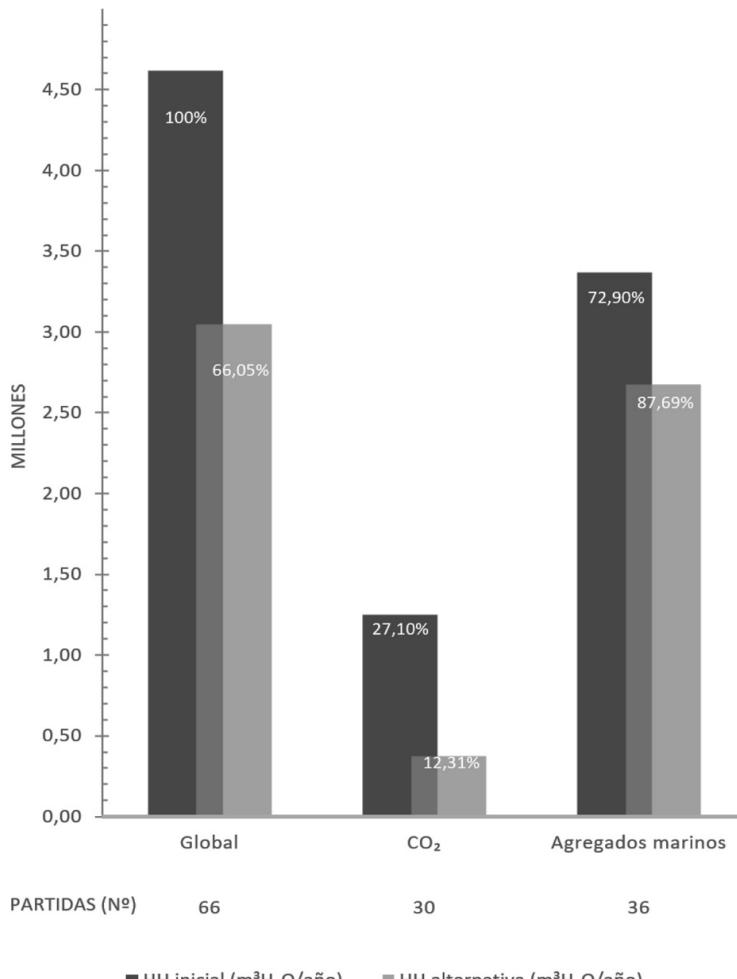


Figura 3: Comparativa de consumos hídricos entre el caso base y las alternativas
 Autor: Manuel de Vicente Peñafiel
 Fuente: Elaboración propia (2025)

Conversión de impactos

Obtenidos los resultados, se traducen a indicadores de caracterización e impacto para facilitar su comparación. En primer lugar, los $m^3 H_2O$ de la huella hídrica (HH) se transforman a su impacto relativo a nivel global ($m^3 world\text{-eq}/m^3$) mediante el factor de escasez AWARE regional de la cuenca mediterránea ($1,5 m^3 world\text{-eq}/m^3$) al localizarse las plantas de prefabricados mayoritariamente en esa área¹⁸. Así, para los prefabricados curados con CO_2 , el ahorro de $876.000 m^3 H_2O$ se convierte en $1.310.000 m^3 world\text{-eq}$ de escasez global evitada. Segundo, los factores de daño del método ReCiPe 2016⁷ ($0,28 DALY$ y $350 PDF \cdot m^2 \cdot año$ por $1.000.000 m^3 world\text{-eq}$)^{24,25}, resultan en $0,37 DALY$ —equivalente a cuatro meses de vida sana recuperados por la población expuesta— y $460 PDF \cdot m^2 \cdot a$ de hábitat protegido, un impacto equiparable a conservar libre de pérdida potencial de especies durante todo un año, un espacio natural del tamaño de cuatro pistas de tenis. En cuanto a los hormigones in situ que emplean agua y áridos marinos, la reducción de $691.000 m^3 H_2O$ se traduce en $1.040.000 m^3 world\text{-eq}$, evitando $0,29 DALY$ y $360 PDF \cdot m^2 \cdot a$ de biodiversidad salvaguardada, comparable a mantener una franja costera del tamaño de tres pistas de tenis en perfecto estado ecológico durante un año.

En conjunto, las traducciones evidencian cómo ambas estrategias contribuyen significativamente a la reducción del estrés hídrico y la mejora ambiental en términos de salud humana y biodiversidad. Así, la vía del CO_2 maximiza el beneficio sanitario y ecológico por unidad de agua empleada, mientras que la opción marina reduce de manera más directa la carga hídrica asociada al lavado de áridos, principal foco de consumo en los hormigones convencionales.

Implicaciones económicas y operativas

Se debe mencionar también la dimensión económica del ahorro de agua. En el caso base, las partidas de hormigón suponen aproximadamente un 10% del presupuesto de ejecución material (PEM) del conjunto ($5,68 M\text{€}$) consumiendo un total de $4,62$ millones de $m^3 H_2O$ que equivalen a $0,81 m^3/\text{€}$. El consumo hídrico se traduce así en ahorros financieros importantes, desde entre $0,85$ y $1,30 M\text{€}$ mediante la sustitución por recursos marinos, hasta $1,08-1,67 M\text{€}$ en los procesos de carbonatación acelerada. Dicho de otro modo, las alternativas sostenibles pueden aumentar un 152% el retorno en ahorro de agua respecto a su coste, justificando la necesidad de integrar cuanto antes la perspectiva hídrica en los proyectos de construcción.

En este sentido, existen iniciativas industriales que operan como palancas de demostración, estandarización y réplica, como el consorcio internacional de compañías energéticas (OGCI) que impulsa proyectos de mitigación ambiental, o el programa LIFE de la Unión Europea para medio ambiente y clima, que cofinancia proyectos a escala regional. Con la finalidad práctica de habilitar pruebas controladas, generar guías y facilitar la adopción en contextos reales, las propuestas buscan la consolidación industrial del curado con CO_2 , y la estructuración de cadenas de suministro de áridos marinos con garantías, extendiendo su aplicación más allá de la prefabricación sin reabrir cuestiones metodológicas ya resueltas en el estudio.

CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la reducción de la huella hídrica (HH) del hormigón es viable cuando se priorizan estrategias de control industrial. En los procesos estudiados, el curado con CO_2 en componentes prefabricados destaca por su eficacia al disminuir un 19% consumo hídrico de la muestra y un 70% la HH específica frente al curado tradicional, además de reducir la huella de carbono (HC) del hormigón, con ahorros estimados de $1,5$ billones de $kg CO_2$ y 3 billones de litros de agua al año. La alternativa marina por su parte, presenta un efecto limitado a escala global (2,14%) que alcanza un potencial del 15% al sustituir los áridos terrestres por marinos, condicionado ante la presencia de acero y restricciones normativas.

Los datos ubican el ahorro de agua como vía directa en la mejora ambiental, justificando la priorización de la carbonatación acelerada con CO_2 siempre que la prefabricación sea posible, para lo cual conviene mejorar su estandarización técnica en contextos menos industrializados a fin de ampliar el ahorro fuera de la fábrica. En cuanto a la sustitución por agua y agregados marinos, la viabilidad pasa por el estudio individual de partidas sin acero o con refuerzos no metálicos.

A nivel económico el uso de curados alternativos supone un ahorro de 2.910 millones de euros anuales ($\approx 0,20\%$ del PIB nacional) equivalente al 84% del gasto público en acceso a la vivienda y fomento de la edificación²⁶. Estos datos confirman que sostenibilidad y rentabilidad no son excluyentes, siendo la incorporación de incentivos económicos para el ahorro de agua junto a los criterios de diseño y contratación, un factor clave para fomentar su uso sin perder calidad técnica.

NOTAS

1. El curado del hormigón consiste en conservar condiciones controladas de humedad y temperatura para asegurar la hidratación del cemento y la resistencia prevista del material.
2. El clínker es el material resultante de la calcinación de una mezcla de carbonato cálcico y silicatos de aluminio a unos 1450 °C, cuya molienda con yeso da origen al cemento Portland, principal aglutinante en el hormigón.
3. El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) representa el valor económico de la ejecución directa de la obra, determinado por el coste de materiales, mano de obra y maquinaria, excluyendo honorarios, beneficios e impuestos.
4. DB SE-AE: Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación, un apartado del Código Técnico de la Edificación (CTE).
5. El factor de caracterización AWARE (Available Water Remaining) cuantifica la disponibilidad de agua dulce residual en una cuenca tras descontar los usos humanos y ecológicos, y se utiliza en el ACV para estimar el potencial de escasez de agua asociado a un consumo determinado.
6. En el contexto del análisis ambiental, un *trade-off* se refiere a una compensación entre impactos, donde la mejora en un indicador puede implicar el perjuicio de otro.
7. ReCiPe 2016 es la última versión de un método de evaluación de impacto ambiental utilizado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que traduce los datos del inventario en daños sobre salud humana, ecosistemas y recursos naturales. Los resultados se expresan en DALY (Disability-Adjusted Life Years) que indican pérdida potencial de años de vida saludable; PDF·m²·a (Potentially Disappeared Fraction of species over an area and time) que representa la pérdida potencial de biodiversidad; y US\$ 2013, que refleja el coste adicional asociado.

BIBLIOGRAFÍA

1. JAYNES, Cristen Hemingway. "Global Freshwater Demand Will Exceed Supply 40% by 2030, Experts Warn." EcoWatch. <https://www.ecowatch.com/water-crisis-supply-demand-forecast.html>
2. DHANESH, E. and SHANMUGASUNDARAM, M. . "Experimental evaluation on the durability characteristics of ternaryblended concrete with ground granulated blast furnace slag and hydrated lime exposed to harsh environmental conditions." *Journal of Research on Engineering Structures and Materials*, 2025, vol. 11, no. 5, pp. 2623–2636. DOI: <https://doi.org/10.17515/resm2025-1033me0716rs>
3. MILLER, Sabbie A; HORVATH, Arpad and MONTEIRO, Paulo JM. "Impacts of booming concrete production on water resources worldwide." *Nature Sustainability*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 69-76. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
4. HETTIARACHCHI, Umesh; JAYASOORIYA, Varuni and MUTHUKUMARAN, Shobha. "Applications of ISO 14046 Water Footprint Assessment for Sustainable Water Management in Dairy Production." In *Emerging Trends and Technologies in Water Management and Conservation*, IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 439-476. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6920-3.ch015>
5. OBSERVATORIO UAM-VÍA CÉLERE. *Estimación de la huella hídrica de una promoción residencial*. 2019. <https://observatorio2030.com/sites/default/files/2019-11/Informe%20Huella%20Hídrica%20Observatorio%20UAM%20VC.pdf>
6. SOUZA, Eduardo. "¿Cuál es la huella hídrica de tu proyecto arquitectónico?" ArchDaily. <https://www.archdaily.cl/cl/1002236/cual-es-la-huella-hidrica-de-tu-proyecto-arquitectonico>
7. AROSIO, V; ARRIGONI, A and DOTELLI, G. "Reducing water footprint of building sector: concrete with seawater and marine aggregates." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 323, IOP Publishing, 2019, p. 012127. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012127>.
8. SIKORA, Paweł; AFSAR, Levent; RATHNARAJAN, Sundar; NIKRAVAN, Morteza; CHUNG, Sang-Yeop; STEPHAN, Dietmar and ABD ELRAHMAN, Mohamed. "Seawater-mixed lightweight aggregate concretes with dune sand, waste glass and nanosilica: experimental and life cycle analysis." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023, vol. 17, no. 1, p. 47. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00613-4>
9. TRIPLE BOTTOM LINE FOUNDATION. "Low Temperature Curing Process Cuts Cement's CO₂ Emissions by 70%." TBL Fund., <https://www.tblfund.org/low-temp-curing-cement/>
10. SOLIDIA TECHNOLOGIES. "Solidia Technologies can reduce the carbon footprint of cement and concrete in California by 7.4 million metric tonnes." 2018.
11. HAN, Seongho; KIM, Jae Hong; SINGH, Rohitashya Kumar and SHAH, Surendra P. "CO₂ utilization for cementitious materials-A review." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2025, p. 100227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.kscj.2025.100227>
12. EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION (UEPG). *Annual Review 2020-2021*. 2023. https://www.aggregates-europe.eu/wp-content/uploads/2023/03/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf
13. ZHUANG, Ronghua; LI, Ying; LIU, Quantao; SHEN, Zizhou; ZHANG, Tianwei; HE, Yanheng et al. WANG, Ruiyang. "Acceleration of chelator on mineralization reaction of cement paste at different CO₂ pressures." *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 95, p. 110116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110116>
14. PADMALAL, Akarsh; KULKARNI, Kishor S; RAWAT, Pradeep and SUGANDHINI, HK. "Efficacy of Accelerated Carbonation Curing and Its Influence on the Strength Development of Concrete." *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 8, p. 2573. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14082573>
15. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). *Estadística sobre el Suministro y Saneamiento del Agua. Año 2022*. 2022. <https://www.ine.es/dyngs/Prensa/Essa2022.htm>
16. SOLIDIA TECHNOLOGIES. *Technologies that Reduce Water Use in Cement and Concrete Help Global Industry Address Mounting Concerns of Water Scarcity*. 2016. https://assets.ctfassets.net/jv4d7wct8mc0/5u5Kg441tfr7cn9ZcTsE2w/a5000d45e215f576656cafd80fed753/Masterbuilder_-_Technologies_that_Reduce_Water_use_in_Cement_and_Concrete.pdf
17. MACK, Yazmin Lisbeth; OLIVEIRA, Lidiane Santana and JOHN, Vanderley Moacyr. "Concrete water footprint assessment methodologies." *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 668, pp. 247-254. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.247>
18. SHRIVASTAVA, Chitransh; RAMLI SULONG, Nor Hafizah; ZAHRA, Tatheer; ELCHALAKANI, Mohamed; GAMAGE, Kumari and FAWZIA, Sabrina. "Review of the short-term properties of confined seawater sea sand concrete columns under compression." *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 2, p. 544. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14020544>
19. BOULAY, Anne-Marie; BARE, Jane; BENINI, Lorenzo; BERGER, Markus; LATHUILLIÈRE, Michael J; MANZARDO, Alessandro et al. PASTOR, Amandine Valerie. "The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 368-378. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
20. XIAO, Jianzhuang; JIANG, Yuchao; WANG, Dianchao; NOGUCHI, Takafumi and LU, Zheng. "Global CO₂ sequestration potential of recycled aggregates: Modeling, life

- cycle analysis, and accelerated carbonation strategies." *Waste Management*, 2025, vol. 204, p. 114951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114951>
21. ZHANG, Duo. "CO₂ utilization for concrete production: Commercial deployment and pathways to net-zero emissions." *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 931, p. 172753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172753>
 22. WONG, Rosana WM and LOO, Becky PY. "Sustainability implications of using precast concrete in construction: An in-depth project-level analysis spanning two decades." *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 378, p. 134486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134486>
 23. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. *Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos de evaluación y aptitud al uso incluyendo las aguas de lavado de las instalaciones de reciclado de la industria del hormigón, así como el agua de amasado para hormigón*. UNE-EN 1008:2007, 2007. [https://revaenor.aenor.com/revista/pdf/oct15/\(EX\)UNE-EN_1008=2007.pdf](https://revaenor.aenor.com/revista/pdf/oct15/(EX)UNE-EN_1008=2007.pdf)
 24. HUIJBREGTS, Mark AJ; STEINMANN, Zoran JN; ELSHOUT, Pieter MF; STAM, Gea; VERONES, Francesca; VIEIRA, MDM et al. VAN ZELM, Rosalie. *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization*. RIVM report 2016-0104, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), The Netherlands, 2016. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
 25. TRIOLLET, Romain; MCCAFFERTY, Edward John; ALVAREZ, Martinez Angel Francisco; TÓTH, Barnabás; BELLAN, Emanuela and AL, Khudhairy Delilah. *JRC Annual Report 2019*. 9276141367, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2760/766791> <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119146>
 26. MINISTERIO DE HACIENDA. SECRETARÍA DE ESTADO DE PRESUPUESTOS Y GASTOS. "Presupuestos Generales del Estado." Gobierno de España, <https://www.hacienda.gob.es/es-ES/Areas%20Tematicas/Presupuestos%20Generales%20del%20Estado/>