UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil

TESIS DOCTORAL

**SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR DE LA
CONSTRUCCIÓN.
SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS Y PUENTES
FERROVIARIOS**

RAQUEL VALDIVIESO FERNÁNDEZ

MASTER EN TÉCNICAS EXPERIMENTALES
AVANZADAS EN LA INGENIERÍA CIVIL
GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

MADRID, 2016

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA: CONSTRUCCIÓN,
INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTES

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR DE LA
CONSTRUCCIÓN.
SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS Y PUENTES
FERROVIARIOS**

AUTOR: RAQUEL VALDIVIESO FERNÁNDEZ
MASTER EN TÉCNICAS EXPERIMENTALES
AVANZADAS EN LA INGENIERÍA CIVIL
GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR: DAVID FERNÁNDEZ-ORDOÑEZ HERNÁNDEZ
DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS

MADRID, 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL

Tribunal nombrado por el excelentísimo y magnifico Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2016

Presidente	D.
Vocal	D.
Vocal	D.
Vocal	D.
Secretario	D.

Realizado el acta de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2016 en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil.

Acuerdan otorgarle la clasificación de: _____

Madrid, de de 2016

PRESIDENTE/A

SECRETARIO/A

VOCALES

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL

Alfonso XII 3 y 5, 28014 Madrid

DAVID FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ HERNÁNDEZ, PROFESOR TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE: **INGENIERIA CIVIL: CONSTRUCCIÓN, INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTES**, DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

HACE CONSTAR:

Que el presente trabajo, titulado ***“Sostenibilidad en el Sector de la Construcción. Sostenibilidad en Estructuras y Puentes Ferroviarios”*** ha sido realizado en este Departamento por la alumna de Doctorado **D^a Raquel Valdivieso Fernández**, bajo mi dirección, constituyendo la Tesis Doctoral de su autor.

Madrid, a 2 de Noviembre de 2015

Fdo.: David Fernández-Ordoñez

Agradecimientos	XII
Resumen	XIII
Abstract	XV

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Introducción sobre el concepto del desarrollo sostenible	1
1.2. Contexto de referencia	13
1.3. Motivación	21
1.4. Objetivos	22
1.5. Estructura de la tesis y metodología	23

2. ESTADO DE CONOCIMIENTO.

2.1. Legislación aplicable	28
2.1.1. Normas ISO. Organización Internacional para la Estandarización	40
2.1.2. Normas EN. Comité Europeo de Normalización	47
2.1.3. El sector de la construcción en España	51
2.2. Las emisiones y la regularización de residuos	56
2.3. Características básicas e importantes del uso sostenible de los materiales ...	61
2.3.1. El sistema de Declaración Ambiental de Producto (DAP)	63
2.4. El ciclo de vida y el análisis del ciclo de vida	65
2.4.1. Análisis del ciclo de vida del hormigón	75
2.4.2. Análisis del ciclo de vida de un puente	87
2.5. La sostenibilidad en la ingeniería. Punto de partida	96
2.6. El sistema ferroviario Español actual. Criterios de sostenibilidad	103

3. SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN Y ESTUDIO COMPARATIVO.

3.1. Sistemas de certificaciones existentes. Revisión de los métodos	114
3.1.1. Sistema BREEAM	117
3.1.1. Sistema LEED	120
3.1.3. Sistema CASBEE	124
3.1.3. Sistema VERDE	126
3.2. Análisis y comparativa de las certificaciones más importantes	131
3.2.1. Primer nivel de análisis. Ambiental, social y económico	132
3.2.2. Segundo nivel de análisis. Materiales	135
3.2.2.1. Materiales de bajo impacto ambiental	135
3.2.2.2. Materiales reciclados y reutilizados	137
3.2.2.3. Reutilización del edificio. Elementos estructurales	140

3.2.2.4. Materiales regionales	141
3.2.2.5. Uso de compuestos orgánicos	143
3.2.3. Tercer nivel de análisis. Residuos de construcción	146
3.3. Conclusiones	152
3.4. Sistema MIVES	154

4. DESARROLLO DE UN MODELO DE PARA EL ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS FERROVIARIAS

4.1. Introducción	164
4.2. Requerimientos económicos R.1	167
4.2.1. Costes de ejecución. C1	168
4.2.2. Costes de explotación. C2	171
4.3. Requerimientos medioambientales R.2	177
4.3.1. Consumo de materiales. C3	178
4.3.2. Emisiones. C4	187
4.3.3. Residuos. C5	192
4.3.4. Energía. C6	195
4.3.5. Gestión ambiental. C7	198
4.4. Requerimientos sociales R.3	202
4.4.1. Sensibilidad frente a la comunidad. C8	202
4.4.2. Resiliencia. C9	211
4.5. Pesos del árbol de requerimientos	219

5. APLICACIÓN A ESTRUCTURAS EXISTENTES. PUENTES FERROVIARIOS.

5.1. Descripción del caso de estudio. Proyecto Alta Velocidad. Puente de hormigón sobre la M-40 en Madrid	220
5.1.1. Descripción del proyecto	220
5.1.2. Aplicación del método	229
5.1.3. Análisis de los resultados	254
5.2. Descripción del caso de estudio. Proyecto Alta Velocidad. Puente mixto sobre la calle Pedro Bosch en Madrid	256
5.2.1. Descripción del proyecto	256
5.2.2. Aplicación del método	265
5.2.3. Análisis de los resultados	294
5.3. Comparativa de los proyectos	296

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

6.1. Conclusiones	309
6.2. Futuras líneas de investigación	312

7. BIBLIOGRAFÍA314

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera dar las gracias de manera muy especial a David Fernández-Ordoñez, mi director de tesis, por la confianza que ha depositado desde el primer día en mí, por la cantidad innumerable de cosas que me ha enseñado y por la paciencia que siempre ha tenido conmigo.

Merece también un especial agradecimiento Marian Quijano, por su apoyo en la gestión de la tesis y por su papel de Subdirectora de Investigación, Doctorado y Postgrado.

En otro orden de cosas, quisiera agradecer a todas las personas y empresas que han posibilitado la realización de esta tesis con aportaciones diversas: facilitándonos documentación, dejándonos visitar sus instalaciones, con sus imprescindibles contribuciones personales, etc. En este sentido, quiero hacer mención especial Ángel Lorrio de Renfe-Operadora, a María Luisa Domínguez de ADIF y a Antonio Burgueño de FCC Construcciones.

Quisiera aprovechar esta ocasión para agradecer su apoyo a todo el equipo de investigación de análisis multi-criterio de la Universidad Politécnica de Barcelona.

A todos mis amigos y compañeros. Su apoyo ha sido siempre fundamental para seguir adelante con toda la motivación y fuerza que requiere esta titulación. Me han enseñado que el trabajo en equipo es fundamental para el buen desarrollo personal, académico y también profesional.

Por último, no quisiera olvidar el enorme agradecimiento a mis padres que me han enseñado desde niña que la perseverancia y el esfuerzo son el único camino para lograr los objetivos. Ninguno de mis logros hubiese sido posible sin su apoyo y colaboración.

Agradezco y dedico este trabajo a Yoann Le Guernic, por lo que representa en mi vida y el apoyo incondicional que me ha brindado en todas y cada una de las etapas que me han acompañado hasta lograr uno de mis grandes retos.

RESUMEN

La escasez de recursos, el cambio climático, la pobreza y el subdesarrollo, los desastres naturales, son solo algunos de los grandes retos a que se enfrenta la humanidad y a los que la economía verde y el desarrollo sostenible tienen que dar respuesta.

El concepto sostenible surge a raíz de la necesidad de lograr en todas las actividades humanas un nuevo equilibrio con el medioambiente, la sociedad y la economía, es decir un desarrollo más sostenible. La construcción supone en este nuevo concepto un sector básico, con grandes impactos en los recursos, los residuos, las emisiones, la biodiversidad, el paisaje, las necesidades sociales, la integración, el desarrollo económico del entorno, etc. Es por ello, que la construcción sostenible tiene una importancia esencial como demuestra su amplia aplicación teórica y práctica ya en proyectos de planificación urbana y de edificación. En la ingeniería civil estas aproximaciones son todavía mínimas, aunque ya se están considerando ciertos criterios de sostenibilidad en proyectos de construcción.

La construcción consume muchos recursos naturales, económicos y tiene gran incidencia social. En la actualidad su actividad consume un 30% de los recursos extraídos de la tierra y la energía, y en consecuencia genera el 30% de los gases de efecto invernadero y residuos sólidos del mundo (EEA, 2014). Este impacto debería suponer una gran responsabilidad para los profesionales y gobiernos que toman cada día las decisiones de diseño e inversión en la construcción, y su máxima eficiencia debería estar muy presente entre los objetivos.

En esta tesis doctoral se plantea un nuevo modelo para la evaluación de la sostenibilidad en los proyectos mediante un sistema de indicadores, basados en las áreas de estudio de las certificaciones de sostenibilidad existentes y en un análisis multi-criterio de cada uno de los axiomas de la sostenibilidad.

Como reto principal se marca la propuesta de una metodología que permita identificar, priorizar y seleccionar los indicadores y las variables más importantes de lo que es considerado como una construcción sostenible en el caso de infraestructuras ferroviarias, más concretamente en puentes ferroviarios, y que además sirva para priorizar nuevos proyectos que se adapten a los nuevos objetivos del desarrollo sostenible: el respeto al medioambiente, la integración social y la económica. El objetivo es la aplicación de estos indicadores desde las etapas más tempranas del proyecto: planificación, diseño de alternativas y selección de alternativas.

Para ello, en primer lugar, se ha realizado un análisis en profundidad de los distintas organizaciones de certificación de la sostenibilidad mundiales y se ha desarrollado una comparativa entre ellas, detallando el funcionamiento de las más extendidas (BREEAM, LEED, VERDE, DGNB).

Tras esto, se ha analizado la herramienta matemática MIVES de análisis multi-criterio para su aplicación, en la tesis, a las infraestructuras ferroviarias.

En la segunda parte se desarrolla para las estructuras ferroviarias un nuevo modelo de indicadores, un sistema de ayuda a la decisión multi-criterio basado en los tres axiomas de las sostenibilidad (sociedad, medioambiente y economía), articulados en un árbol de requerimientos inspirado en el método MIVES, que propone una metodología para el caso de las infraestructuras ferroviarias.

La metodología MIVES estructura el proceso de decisión en tres ramas: Requisitos, componentes y ciclo de vida. Estas ramas definen los límites de los sistemas. El eje de los requisitos del árbol de los requisitos o se estructura en tres niveles que corresponden al requisito específico: criterios e indicadores. Además, es necesario definen la función del valor para cada indicador, definen el peso de importancia de cada elemento del árbol y finalmente con el calcular el valor de cada alternativa selecciona el mejor de él.

La generación de este árbol de requerimientos en estructuras ferroviarias y la medición de los parámetro es original para este tipo de estructuras.

Por último, tras el desarrollo de la metodología, se ha aplicado la propuesta metodológica mediante la implementación práctica, utilizando el método propuesto con 2 puentes ferroviarios existentes. Los resultados han mostrado que la herramienta es capaz de establecer una ordenación de las actuaciones coherente y suficientemente discriminante como para que el decisor no tenga dudas cuando deba tomar la decisión. Esta fase, es una de las grandes aportaciones de la tesis, ya que permite diferenciar los pesos obtenidos en cada una de las áreas de estudio y donde la toma de decisión puede variar dependiendo de las necesidades del decisor, la ubicación del puente de estudio etc.

ABSTRACT

Scarce resources, climate change, poverty and underdevelopment, natural disasters are just some of the great challenges facing humanity and to which the green economy will have to respond.

The sustainable concept arises from the need for all human activities in a new equilibrium with the environment, society and the economy, which is known as sustainable development. The construction industry is part of this concept, because of its major impacts on resources, waste, emissions, biodiversity, landscape, social needs, integration, economical development, environment, etc. Therefore, sustainable construction has a critical importance as already demonstrated by its wide application and theoretical practice in urban planning and building projects. In civil engineering, these approaches are still minimal, although some criteria are already taken into account for sustainability in infrastructure projects.

The construction industry requires a lot of natural resources, has a real economic relevance and a huge social impact. Currently, it consumes 40% of produced power as well as natural resources extracted from the earth and thus leads to an environmental impact of 40% regarding greenhouse gas emissions and solid wastes (EEA 2014). These repercussions should highly concern our governments and professional of this industry on the decisions they take regarding investments and designs. They must be inflexible in order to ensure that the main concern has to be a maximum efficiency. Major events like the COP21 held in Paris in December 2015 are a concrete signal of the worldwide awareness of the huge impact of each industry on climate.

In this doctoral thesis a new model for the evaluation of the sustainability in the projects by means of a system of indicators, based on the areas of study of the existing certifications of sustainability and on an analysis considers multi-criterion of each one of the axioms of the sustainability.

The primary aim of this thesis is to study the mode of application of sustainability in projects through a system of indicators. . The main challenge consists of create a methodology suitable to identify, prioritize and select the most important indicators which define if a building is sustainable in the specific case of railway infrastructures. The methodology will help to adapt future projects to the new goals of sustainable development which are respect of nature, social integration and economic relevance. A crucial point is the consideration of these indicators from the very beginning steps of the projects: planning, design and alternatives reflections.

First of all, a complete inventory of all world energy certification organizations has been made in order to compare the most representative ones regarding their way of functioning (BREEAM, LEED, VERDE, DGNB).

After this, mathematical tool MIVES of analysis has been analyzed multi-criterion for its application, in the thesis, to railway infrastructures.

The second part of the thesis is aimed to develop a new model of indicators, inspired by the MIVES method, consisting in a decision-making system based on the 3 foundations of sustainability: nature impact, social concerns, and economic relevance.

The methodology MIVES structures the decision process in three axes: Requirements, components and life cycle. These axes define the boundaries of the systems. The axis of requirements or tree requirements is structured in three levels corresponding to specific requirement: criteria and indicators. In addition, is necessary define the value function for each indicator, define the weight of importance of each element of the tree and finally with the calculate the value of each alternative select the best of them.

The generation of this tree requirements in railway structures and measuring the parameter is original for this type of structures.

Finally, after the development of the methodology, it has validated the methodology through practical implementation, applying the proposed method 2 existing railway bridges. The results showed that the tool is able to establish a coherent management of performances and discriminating enough so that the decision maker should not have doubts when making the decision. This phase, is one of the great contributions of the thesis, since it allows to differentiate the weights obtained in each one from the study areas and where the decision making can vary depending on the necessities of the decisor, the location of the bridge of study etc.

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe el contexto internacional y nacional en el que se desarrolla la presente investigación. Respecto al ámbito internacional, se explica brevemente cual ha sido el desarrollo de los problemas ambientales, económicos y sociales y la respuesta dada por diferentes sociedades a lo largo de la historia. Se indican, además, los mayores hitos y compromisos adquiridos en las últimas décadas en relación con la sostenibilidad del ser humano y de su medioambiente. En relación a la situación española, este capítulo se centra en la descripción del reciente proceso de incorporación de aspectos sostenibles a las diferentes regulaciones de la actividad de la edificación y la ordenación del territorio. Una vez analizados estos aspectos normativos y su desarrollo pasado y presente, el capítulo concluye con la justificación de la conveniencia de incorporar y elaborar una certificación ambiental para las construcciones civiles de manera similar a las existentes actualmente para la edificación.

1.1 INTRODUCCIÓN SOBRE EL CONCEPTO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

Se denomina desarrollo sostenible a aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Informe de Brundtland, ONU 1987). Por tanto este concepto no es nuevo, pero ha ido evolucionando en las últimas décadas hasta tener una importancia capital en las decisiones que se toman dentro del mundo desarrollado. La inclusión de criterios de decisión teniendo en cuenta la sostenibilidad en proyectos de construcción está siendo tomada en cuenta más y más en los países desarrollados y asimismo está siendo paulatinamente incorporada a los países con menor desarrollo. Estos criterios todavía no se pueden utilizar como herramienta para la toma de decisiones en edificación y construcción, por la carencia de indicadores y datos suficientemente consolidados, pero ya se utiliza como orientación y se están desarrollando técnicas e indicadores que nos dirigen hacia ese fin.

Esta definición plantea importantes retos al sector de la construcción, de los materiales y de su procedencia en particular. Los aspectos relacionados con las materias primas, el consumo y ahorro energético, la contaminación ambiental, la reducción de residuos, el reciclado de materiales, etc., se perciben y deben ser tratados desde esta nueva perspectiva.

Para lograr un equilibrio sostenible es imprescindible que el ritmo al que se consumen los recursos sea inferior a la capacidad de los sistemas naturales para reponerlos. La supervivencia del actual sistema de vida depende de ese frágil equilibrio entre el mantenimiento de la diversidad biológica, la salud humana y la calidad del aire, del agua y del suelo.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son, probablemente, el mayor agente invasor de toda construcción que amenaza con no respetar las capacidades de las generaciones venideras (en los términos del Informe de Brundtland), por lo que no es extraño que el llamado efecto invernadero, provocado por el CO₂, por vapor de agua y otros gases sea en la actualidad uno de los fenómenos que genera mayor alarma social. En la siguiente Figura se pueden observar las emisiones de gases de efecto invernadero por sectores en España en el año 2010, según datos del Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (MARM).

Figura 1.1. Emisiones de gases de efecto invernadero por sectores
(Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España 2010)

La construcción tiene notables impactos ambientales en cuanto a consumo de recursos naturales y energía o emisión de gases de efecto invernadero, de ahí la necesidad de considerar la dimensión ambiental como clave en un enfoque de construcción sostenible. Como se puede ver más abajo (Figura 1.2), la construcción es responsable en más del 40% de los recursos naturales, más de un 30% del consumo de energía y más de un 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) a la atmósfera (EEA, 2014). Además es también responsable de una parte significativa de la generación de residuos y del consumo de agua en el mundo.

Figura 1.2 Consumo de recursos naturales y emisiones
(Fuente: EEA, 2014)

La razón de esta huella ecológica tan considerable hay que buscarla en los impactos ambientales ligados al proceso de construcción, desde la fabricación de materiales pasando por la operación del elemento construido y finalizando con la fase de demolición, según se puede ver en la siguiente figura (Figura 1.3.).

Figura 1.3. Impactos ambientales ligados al proceso de construcción
(Fuente: Propia)

Las emisiones producidas por las actividades de utilización de edificios y construcciones han sido, desde hace décadas, introducidas en los diversos estudios de sostenibilidad y mejoras hacia el medioambiente.

Como cualquier otra actividad económica la construcción debe generar valor para todas las partes interesadas que intervienen en el proceso, sin embargo el fenómeno constructivo se presta a una generación rápida de rendimientos para unos pocos agentes, por lo que resulta difícil erradicar el aspecto especulativo de esta actividad. Sin embargo la construcción en sus diferentes subsectores puede seguir jugando un papel importante en el desarrollo económico de un país como España si la actividad se desarrolla con profesionalidad y con criterios económicos similares a los de cualquier otra actividad industrial.

Parece evidente que para que una construcción pueda considerarse sostenible ésta debe ser apta no solo desde el punto de vista estructural y ambiental sino desde el punto de vista funcional, estético, y adaptado a su entorno. El modelo de construcción sostenible encuentra su mayor sentido en la ciudad, que es donde se ganará o perderá el reto del desarrollo sostenible. En palabras de Richard Rogers, arquitecto británico nacido en Italia, las ciudades deben responder a determinados objetivos sociales, medioambientales, culturales, políticos, físicos y económicos. Una ciudad sostenible debe ser justa, bella, creativa, ecológica, favorecedora de contactos personales, compacta y policéntrica y diversa.

El Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino dispone de unos indicadores que permiten conocer con claridad los datos de consumo energético (Figura 1.4.) y las emisiones de CO₂ (Figura 1.1.), que nos aproximan bastante a la situación actual de crisis energética y cambio climático. Según estos datos, en la Unión Europea, en relación al consumo total de energía, el sector industrial supone aproximadamente un 24%; el del transporte un 33%; el sector residencial un 27%; el del sector servicios un 13%, y la agricultura un 3%.

Figura 1.4. Indicadores de consumo energético en Europa y España.
(Fuente: MARM). Elaboración propia

A España, con un crecimiento de consumo energético de más del 40%, le corresponde un PIB que no llega al 30%. Al mismo tiempo, las emisiones de CO₂ en la última década del siglo XX aumentaron un 33%. Curiosamente, el límite establecido en el Protocolo de Kyoto era del 15%.

El consumo de energía final en España durante 2013, incluyendo el consumo para usos no energéticos fue de 85.436 Kilotoneladas equivalentes de petróleo (Ktep), un 4% inferior al de 2012. Esta evolución se ha debido a la situación económica y a la estructura de sectores consumidores, dado que han sido similares las condiciones climáticas y de laboralidad entre los dos años.

La demanda final de energía eléctrica ha bajado un 3,4% en 2013 respecto al año anterior, donde ha sido determinante la menor actividad económica y las diferencias estructurales del consumo. En relación con los combustibles, hay que destacar el ligero aumento del 0,1% en el consumo final de gas. El consumo de productos petrolíferos continúa bajando, un 2,1% en el año. El consumo de energías renovables finales ha bajado debido al descenso en biocarburantes, dado el cambio de normativa de apoyo a su consumo.

Figura 1.6. Consumo de energía final en España en 2013
(Fuente: Instituto Nacional de Estadística-INE)

Como se observa en la Figura 1.6., el consumo de energía primaria tiene un combustible principal: el petróleo, mientras que otros combustibles fósiles como el carbón o gas natural también suponen un significativo porcentaje.

La dependencia de los combustibles fósiles es evidente, y esto conlleva otro problema adicional: el grado de autoabastecimiento energético. España importa energía (80% del total de la energía primaria) en un porcentaje muy superior a la media europea: mientras que prácticamente el total del petróleo y gas natural es importado, el carbón

alcanza un grado de autoabastecimiento del 34,38%. Sin embargo, la utilización de este combustible durante los dos últimos años ha descendido de forma significativa.

Tan solo, las energías renovables continúan su ascenso, pero apenas superan el 6% con respecto al total de consumo de energía primaria (2013).

Si se observa la Figura 1.7. sobre la evolución del consumo de energía primaria en España desde 1990 se puede ver que durante los años 2008-2013, se ha producido un importante ajuste económico en las economías de los países desarrollados y, de modo especial, en los países de la Unión Europea (UE) y en España, como consecuencia de la crisis económica y la incertidumbre financiera mundiales, que ha afectado de manera importante al consumo de energía primaria.

Los elevados precios del petróleo de estos últimos años, están impulsando el desarrollo y la implantación de nuevas tecnologías de extracción de gas y petróleo no-convencionales y haciendo rentable la explotación de nuevos yacimientos situados a mayores profundidades, que hacen que la evolución del consumo de gas se prevé será en 2030 de más del 30% de la producción total de energía consumida en España en detrimento del consumo de petróleo, según se muestra en la Figura 1.8.

Figura 1.7. Evolución del consumo de energía primaria en España desde 1990
(Fuente: MINETUR)

Figura 1.8. Evolución del consumo de energía primaria en España por materia prima
(Fuente: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía-IDAIE)

Las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea descendieron en 2012 y ya se sitúan en niveles que permiten a la Agencia Europea del Medioambiente (EEA, en sus siglas en inglés) asegurar que la UE está en el buen camino para alcanzar los objetivos de reducción que se fijó para 2020. No solo eso: los datos con los que cuenta las Naciones Unidas en 2015, muestran que los 15 países europeos que se comprometieron en el Protocolo de Kioto a contener sus gases de efecto invernadero han cumplido de sobra su meta conjunta: emitir en conjunto un 8% menos que en 1990.

Como se puede ver en la siguiente figura (Figura 1.9.), tras varios años de descenso, en 2012 los registros muestran una caída de las emisiones del 1,3% en toda la Unión con respecto a 2011. Si se compara con dos décadas atrás (1990, el *año base* para los cálculos de Kioto) Europa ha conseguido reducir un 19,2% sus emisiones. Sin embargo, no todos los actuales miembros de la Unión se comprometieron igual. Los 15 que formaban parte de ella cuando se firmó el protocolo (1997), incluida España, decidieron ir en conjunto: cada uno debía reducir un 8%, pero entre los 15 se repartieron la carga de manera que, mientras países como Alemania tenían que emitir un 21% menos, otros podían aumentar, y España, en concreto, hasta un 15%. Globalmente han reducido un 11,8%, según los últimos datos disponibles.

2. Estado del Conocimiento

► Emisiones de CO₂

► Emisiones por sectores

Figura 1.9. Emisiones de CO₂ Europeas en 2012
(Fuente: Agencia Europea del Medioambiente.)

El año 2006 es el primer año en el que disminuye el consumo anual de energía primaria. Esta relación entre niveles de CO₂ y consumo de energía siempre está presente por la dependencia que esta tiene de los combustibles fósiles.

Por lo tanto, las oscilaciones entre las intensidades de emisiones de CO₂ y los consumos energéticos están claramente relacionados. En buena parte estas oscilaciones responden a las variaciones climáticas e hidrológicas. Los inviernos fríos suponen un mayor consumo energético, y los años con precipitaciones elevadas aumentan la producción hidráulica de la energía, lo que se traduce en el menor consumo de energía fósil.

Estas emisiones de CO₂ pueden producir un desequilibrio ambiental durante las fases iniciales, es decir, durante la selección de materiales a emplear, la extracción de los mismos y el propio proceso de construcción. A raíz de todos estos riesgos ha surgido el concepto de Análisis del Ciclo de Vida, más comúnmente conocido como **balance ambiental** que, es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos

ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia, "de la cuna a la tumba".

Dentro del conjunto de energía consumida y de emisiones de gases de efecto invernadero producidas a lo largo del ciclo de vida del edificio o estructura (fabricación de los materiales, transporte, construcción, uso y explotación, demolición y reciclado), el mayor peso corresponde, con gran diferencia sobre el resto (con la única excepción de la correspondiente a la fabricación de los materiales de construcción), a la fase de uso y explotación del edificio a lo largo de su vida útil. Esto no sucede así con otras estructuras, como nuestro caso de estudio con puentes ferroviarios, donde el mayor consumo energético se da en la fabricación de las materias primas.

El sector de la construcción es, por su gran influencia en el porcentaje de consumo energético, un receptáculo de oportunidades para reducir el consumo global (Observatorio de la Sostenibilidad, 2014). Es casi imperativa su aportación a un mundo sostenible, de ahí que se promuevan constantemente en el sector mecanismos destinados a tal fin, que abarcan desde la integración del clima local en el diseño constructivo, hasta la creación de mecanismos de gestión y operación que permiten optimizar los edificios. Este concepto es el que ha permitido el desarrollo de las certificaciones energéticas, en estos momentos ya de segunda generación, es decir, sellos ambientales que, a diferencia de los sistemas de primera generación, promueven la eficiencia energética en todas y cada una de las etapas de construcción además de buscar una amplia expansión a lo largo del territorio.

Actualmente hay desarrolladas diversas certificaciones energéticas de segunda generación, pero todas ellas enfocadas en el análisis de la construcción de edificios tanto administrativos, como industriales o de vivienda, pero ninguna de ellas centrada en el análisis de la construcción civil, que hoy en día representa un porcentaje muy alto respecto al total de obras del sector de la construcción.

Para poder enmarcar las tendencias de la ingeniería civil debemos entender las características actuales de la sociedad y de su economía. En la actualidad, el mundo pasa por muchos cambios, vivimos con el inexorable proceso de la globalización, en el vertiginoso avance de las innovaciones tecnológicas, las comunicaciones más rápidas y eficaces, la virtualización, la competitividad a todo nivel, y en una transformación del tiempo y del espacio.

Por tanto se puede entender la sostenibilidad desde una dimensión global (social, medioambiental y económica), como muestran las Figuras 1.10. y 1.11., tal y como define en el libro de Sostenibilidad y Construcción de la Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural (ACHE).

Figura 1.10. Evolución de los sistemas de desarrollo de la sostenibilidad
(Fuente: ACHE)

Para el año 2025 el mundo será muy diferente al actual, con una población mundial en permanente crecimiento, desplazándose desde zonas rurales hacia las zonas urbanas, la cual va a exigir la adopción generalizada para la sostenibilidad tales como la demanda de energía, agua potable, aire limpio y emisiones de CO₂, eliminación segura de residuos y transporte que se requiere para impulsar la protección ambiental y el desarrollo de infraestructuras sostenibles.

Figura 1.11. Dimensiones de la sostenibilidad en la actualidad.
(Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA))

Bajo estas circunstancias se presentan desafíos sin precedentes en especial para los ingenieros civiles, pues la civilización de hoy requiere de una infraestructura capaz de satisfacer las nuevas características de desarrollo: Crecimiento vertical, edificaciones sostenibles, utilización de materiales optimizados, mayor uso de nanomateriales, infraestructuras inteligentes; aprovechamiento racional de agua, lo que hace necesaria la creación de sistemas de calificación y certificaciones energéticas adaptadas a este tipo de construcciones, en definitiva, los sellos ambientales que actualmente ya se utilizan en la mayoría de las edificaciones.

La economía mundial enfrenta en la actualidad una serie de interrogantes respecto a su desempeño futuro como son el estancamiento de algunos países desarrollados, el crecimiento de los mercados emergentes, la creciente urbanización, los cambios demográficos de la población, los retos que plantea el cambio climático, el desgaste de la infraestructura en las economías desarrolladas, el legado de la crisis financiera y el déficit del sector público.

En la siguiente figura (Figura 1.12.) se puede ver el índice de desempeño del cambio climático (CCPI), en el año 2012, en el que se miden los resultados en protección climática de 58 países que suman el 90% de las emisiones globales de CO₂ según 5 categorías: nivel de emisiones, tendencias, eficacia energética, energía renovable y política gubernamental.

Figura 1.12. Clasificación de los países a nivel mundial en su comportamiento frente al cambio climático (Fuente: Germanwatch)

El sector de la construcción tiene singular importancia en el crecimiento económico mundial y por ello, el reto para muchas empresas de esta industria es entender cuál será el impacto de los temas mencionados en el volumen de su negocio hasta el año 2020. En la actualidad, el sector de la construcción representa más del 11% del PIB mundial y el informe predice que la construcción será un 13,2% del PIB mundial en el 2020.

1.2. CONTEXTO DE REFERENCIA

Delante de un escenario preocupante para el sistema económico que regía la dinámica de la sociedad contemporánea, en lo que concierne a la escasez de recursos y la una crisis ambiental, fue divulgado en 1987 el informe *Nuestro Futuro Común* (Our Common Future), también conocido como informe Brunthland, por la Comisión Mundial sobre Medioambiente y Desarrollo.

El informe alertaba al rumbo que el mundo estaba tomando, las tendencias de los principales sectores de la economía y como se podría afectar el medioambiente y la humanidad. También apuntaba la necesidad de un desarrollo más sostenible, “un desarrollo capaz de satisfacer las necesidades presentes, sin comprometer la capacidad de satisfacción de las futuras generaciones” que se hizo mundialmente conocida.

Años más tarde, entre los días 3 al 14 de junio de 1992 en Rio de Janeiro se desarrolló una de las Cumbres de la Tierra, organizadas por la ONU, y en la que participaron 178 países (CMNUCC). Aproximadamente 400 representantes de organizaciones no gubernamentales (ONG) estuvieron presentes, mientras que más de 17.000 personas asistieron al Foro de ONG celebrando paralelamente a la Cumbre, "Declaración de Río sobre el Medioambiente y el Desarrollo", que aclara el concepto de desarrollo sostenible:

« Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. », (Principio 1)

« Para alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medioambiente debe ser parte del proceso de desarrollo y no puede ser considerado por separado ». (Principio 4)

La Conferencia fue la oportunidad de adoptar un programa de acción para el siglo XXI, llamado Programa 21 (Agenda 21 en inglés) que enumera algunas de las 2.500 recomendaciones relativas a la aplicación de los principios de la declaración. Tiene en cuenta las cuestiones relacionadas con la salud, la vivienda, la contaminación del aire, la gestión de los mares, bosques y montañas, la desertificación, la gestión de los recursos hídricos y el saneamiento, la gestión de la agricultura y la gestión de residuos. Incluso hoy, el Programa 21 es la referencia para la aplicación del desarrollo sostenible en los territorios.

La Conferencia de Río fue testigo de la aprobación de la Convención sobre el Cambio Climático, que afirma la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que condujo a la firma en 1997 del Protocolo de Kyoto. La Declaración

sobre los Bosques y el Convenio sobre la Diversidad Biológica, que supedita el uso de la herencia genética mundial a una serie de condiciones y presenta un primer nivel en este ámbito, también fueron ratificados en la Cumbre.

Años más tarde, el Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático fue un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va de 2008 a 2012, en comparación a las emisiones a 1990. Esto no significa que cada país deba reducir sus emisiones de gases regulados en un 5 % como mínimo, sino que este es un porcentaje a escala global y, por el contrario, cada país obligado por Kioto tiene sus propios porcentajes de emisión que debe disminuir la contaminación global.

El Protocolo de Kyoto es lo que "pone en práctica" la Convención. Basándose en los principios de la Convención, este protocolo compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero. La Convención por su parte solo alienta a los países a hacerlo.

Fue estructurado en función de los principios de la Convención. Establece metas vinculantes de reducción de las emisiones para 37 países industrializados y la Unión Europea, reconociendo que son los principales responsables de los elevados niveles de emisiones de GEI que hay actualmente en la atmósfera, y que son el resultado de quemar fósiles combustibles durante más de 150 años. En este sentido el Protocolo tiene un principio central: el de la "responsabilidad común pero diferenciada".

El Protocolo ha movido a los gobiernos a establecer leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas a tener el medio ambiente en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre sus inversiones, y además ha propiciado la creación del mercado del carbono.

En general el Protocolo de Kyoto es considerado como primer paso importante hacia un régimen verdaderamente mundial de reducción y estabilización de las emisiones de GEI, y proporciona la arquitectura esencial para cualquier acuerdo internacional sobre el cambio climático que se firme en el futuro. Cuando concluya el compromiso del Protocolo de Kyoto, tiene que haber quedado decidido y ratificado un nuevo marco internacional que pueda aportar las severas reducciones de las emisiones que según ha indicado claramente el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) son necesarias.

El protocolo fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. En noviembre de 2009, eran

187 estados los que ratificaron el protocolo (Figura 1.13.). Estados Unidos, mayor emisor de gases de invernadero mundial, no ha ratificado el protocolo.

Figura 1.13. Posición de los diversos países en 2011 respecto del Protocolo de Kyoto.
(Fuente: United Nations Framework Convention on Climatic Change)

Las Partes que son países desarrollados y las demás Partes incluidas en el Anexo I se comprometen específicamente a lo que se estipula la Convención.

Las Partes que son países desarrollados y las demás Partes desarrolladas que figuran en el Anexo II, son las que proporcionan recursos financieros nuevos y adicionales para cubrir la totalidad de los gastos convenidos que efectúen las Partes que son países en desarrollo para cumplir sus obligaciones en virtud del párrafo 1 del artículo 12 del Protocolo.

Después de la primera cumbre histórica de Río de Janeiro en 1992, del Protocolo de Kyoto en 1997 y diez años después de la cumbre de Johannesburgo en 2002, se realizó la Cumbre de la Tierra Río + 20, llamada oficialmente "Conferencia de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible", se celebró del 20 al 22 de junio de 2012 en Río de Janeiro, Brasil. Esta cumbre fue un nuevo intento de Naciones Unidas en el comienzo de milenio para avanzar sobre el compromiso de los Estados y la comunidad mundial

en los grandes cambios de este siglo XXI. La reunión de las Naciones Unidas fue ambiciosa. Invitó a los Estados, la sociedad civil y los ciudadanos a “sentar las bases de un mundo de prosperidad, paz y sostenibilidad”, incluyendo tres temas en el orden del día:

1. El fortalecimiento de los compromisos políticos en favor del desarrollo sustentable.
2. El balance de los avances y las dificultades vinculados a su implementación.
3. Las respuestas a los nuevos desafíos emergentes de la sociedad.

Dos cuestiones, íntimamente ligadas, constituyeron el eje central de la cumbre:

1. Una economía ecológica con vistas a la sostenibilidad y la erradicación de la pobreza.
2. La creación de un marco institucional para el desarrollo sustentable.

Por último, en el marco internacional, cabe destacar la Conferencia de París organizada este mismo año 2015 por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El objetivo de la conferencia era el de concluir un acuerdo mundial para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

La conferencia ha alcanzado su objetivo, el de lograr por primera vez en la historia un acuerdo universal sobre los métodos para reducir el cambio climático, que fue aprobado por aclamación por casi todos los estados y que se convertirá en jurídicamente vinculante si por lo menos 50 países, que representen al menos el 55% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, se adhiere a ella a través de la firma seguida de su ratificación, aceptación, aprobación o adhesión. El acuerdo será aplicado a partir de 2020, ya que hasta esta fecha durará el aplazamiento del protocolo de Kyoto firmado en la cumbre de Copenhague 2012.

El 12 de diciembre de 2015 los 195 países participantes lograron por consenso un 21 pacto global, el Acuerdo de París (2015), para reducir las emisiones como parte del método para la reducción de gases de efecto invernadero. El acuerdo estará abierto para la firma el 22 de abril de 2016 y requerirá 50 ratificaciones para que entre en vigor. Su objetivo principal es mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2 grados centígrados y limitarla aún más, a 1,5 grados, según los niveles preindustriales.

De acuerdo con el comité organizador, el resultado esperado era clave para limitar el calentamiento global por debajo de 2°C en 2100, en comparación con anterioridad a la era industrial. Los investigadores de la ONU, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático acordaron en 2009 que esto era necesario para evitar catástrofes climáticas graves, y que ese resultado a su vez requeriría que las emisiones

de gases de efecto invernadero se redujeran entre un 40% y un 70% en 2050 en comparación con el año 2010, alcanzando un nivel cero en 2100.

Estos compromisos no eran suficientes para poder llegar a las reducciones necesarias (Figura 1.14.), por lo que esta meta ha sido no obstante superada por el proyecto definitivo formalmente aceptado del Acuerdo de París, que pretende también proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de temperatura a 1,5°C. Un objetivo ambicioso requeriría un nivel cero de emisiones de veces entre 2030 y 2050.

Figura 1.14. Proyecciones de los compromisos de los 195 países sobre las emisiones de GEI (Fuente: Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente)

Cada país que ratifique el acuerdo establecerá necesariamente un objetivo de reducción de emisiones, pero la cantidad será voluntaria. Habrá un mecanismo que forzará a cada país a cumplir los objetivos marcados.

Otro elemento clave del acuerdo es la financiación. En este sentido, las naciones acordaron definir una hoja de ruta para aumentar progresivamente esos fondos hasta 120.000 millones de dólares para 2020.

La Unión Europea, por su parte, ha sugerido en la Convención un compromiso con una reducción del 40% en las emisiones para el año 2030 en comparación con las de 1990 y ha desarrollado un Marco Normativo sobre el Desarrollo Sostenible. (Figura 1.15.).

Figura 1.15. Marco Estratégico para un desarrollo y una economía sostenible
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente

El Gobierno de España ya ha tomado la iniciativa para profundizar en la transformación del modelo productivo mediante el Proyecto de Ley de Economía Sostenible (LES) y la Estrategia para una Economía Sostenible, que conforma un marco estratégico del sistema productivo más amplio a medio plazo. Este marco estratégico, contando con la participación del conjunto de la sociedad, contempla cambios estructurales, que verán reflejados cambios en la manera de construir y en el mantenimiento de las obras construidas.

En el texto del Proyecto de esta Ley se menciona que España tiene el objetivo para el año 2020 de reducir un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto de los niveles de 1990, de alcanzar un consumo del 20% de energías renovables sobre el total de consumo de energía y de que al menos un 10% de consumo de energía en el sector transporte provenga de fuentes renovables.

Las iniciativas estratégicas en España están en consonancia con la visión de la Unión Europea para el próximo decenio. Así, la Estrategia UE 2020 (Figura 1.16.) marca como

prioridades clave crear una económica competitiva, conectada y más respetuosa con el medioambiente, no sólo creando nuevas industrias, sino también acelerando la modernización de los sectores industriales existentes en Europa. Al mismo tiempo, se estimula el uso más eficiente de los recursos, en particular de la energía y la aplicación de nuevas tecnologías más respetuosas con el medioambiente, con el fin de crear nuevos empleos y servicios, que ayudarán a la Unión Europea a mantener una base manufacturera sólida y un sector de servicios dinámico, y a alcanzar sus objetivos medioambientales y climáticos. Esta perspectiva marca las bases para transitar hacia modelos de producción, construcción y consumo más eficientes en el uso de los recursos naturales y humanos.

Figura 1.16. Estrategia Europea Horizonte 2020

Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España

Europa 2020 propone tres prioridades que se refuerzan mutuamente:

- Crecimiento inteligente: desarrollo de una economía basada en el conocimiento y la innovación.
- Crecimiento sostenible: promoción de una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, que sea más verde y competitiva.
- Crecimiento integrador: fomento de una economía con alto nivel de empleo

que tenga cohesión social y territorial.

La UE tiene que definir el lugar que quiere ocupar en 2020. Con este fin, la Comisión propone los siguientes objetivos principales de la UE:

- El 75 % de la población de entre 20 y 64 años debería estar empleada.
- El 3 % del PIB de la UE debería ser invertido en I+D.
- Debería alcanzarse el objetivo "20/20/20" en materia de clima y energía (incluido un incremento al 30 % de la reducción de emisiones si se dan las condiciones para ello).
- El porcentaje de abandono escolar debería ser inferior al 10 % y al menos el 40 % de la generación más joven debería tener estudios superiores completos.
- El riesgo de pobreza debería amenazar a 20 millones de personas menos.

Estos objetivos están interrelacionados y son fundamentales para que tengamos éxito. Para garantizar que cada Estado miembro adapte la Estrategia Europa 2020 a su situación particular, la Comisión propone que los objetivos de la UE se traduzcan en objetivos y trayectorias nacionales.

Los objetivos son representativos de las tres prioridades de crecimiento inteligente, sostenible e integrador, pero no son exhaustivos ya que será precisa una amplia gama de acciones a nivel nacional, comunitario e internacional para sustentarlos. La Comisión propone siete iniciativas emblemáticas para catalizar los avances en cada tema prioritario que son analizadas según diversos planes de acción analizados y validados por la ONU y la OCDE.

Todo ello se basa en la utilización de métodos de evaluación ambiental, que han emergido desde comienzos de los 90s, de tal manera que el desarrollo y aplicación de éstos, han provisto una considerable experiencia teórica y práctica, a través de toda la década. Actualmente, las herramientas que existen en el mercado han sido desarrolladas desde distintas perspectivas y de acuerdo a las necesidades del país de origen. Cubren diferentes actividades, escalas temporales, niveles espaciales y categorías (ambientales, económicas, sociales e institucionales). Cada una de ellas se basa en estructuras usadas para desarrollar indicadores.

Es en el año 2007 cuando entró en vigor el Real Decreto 47/2007 que establecía el procedimiento básico para la Certificación energética de edificios de nueva construcción. Todavía a día de hoy no existen certificaciones energéticas ni modelos de evaluación ambiental enfocados a obras civiles.

1.3. MOTIVACIÓN

Numerosos autores como Joel E. Cohen sostienen que la población mundial pasará de 6.500 millones en 2005 a 9.100 millones en 2050. Si continúa esta tendencia actual, prácticamente la totalidad del crecimiento poblacional se producirá en las áreas urbanas, pasando éstas a tener una población de 3.000 millones a 6.000 millones. En un periodo de 45 años la sociedad asistirá al reto de duplicar las infraestructuras de las ciudades. (L. Irastorza, Ciudades del Siglo XXI).

El sector de la edificación en los países desarrollados ha alcanzado cifras entre el 20% y el 40% del consumo energético total y ha superado los principales sectores, como son la industria y el transporte.

Como es conocido, el sector de la construcción es un sector clave en las economías naciones y un sector que no solo produce un consumo notable de recursos sino que, además, crea el entorno construido. Es, en definitiva, un importante sector en relación con los aspectos económicos, sociales y ambientales. Por esta razón, investigadores de todo el mundo han desarrollado procedimientos que permitan determinar con precisión las consecuencias ambientales de la construcción de un edificio y poder mitigar así los impactos ambientales negativos, creando edificaciones integradas en el medio y más respetuosas con el mismo. Estas iniciativas están de acuerdo con diferentes directrices marcadas por la Unión Europea.

Por todo ello, desde hace unos años se están desarrollando métodos de certificación y evaluación sostenible en el área de la edificación que a día de hoy están muy avanzados e implantados en el desarrollo de nuevos proyectos y rehabilitaciones de edificios, no abarcando el área de la ingeniería civil, donde no existen métodos para la evaluación de la sostenibilidad de las infraestructuras y los proyectos actuales basan su peso en el factor económico.

Es importante tomar conciencia del respeto por el medio que nos rodea e intentar adaptarnos a él en nuestra evolución, respetando los tres axiomas del desarrollo sostenible: Medioambiental, Económico y Social.

Uno de los objetivos de este proyecto es intentar dar a conocer y que se extienda cada vez más este tipo de prácticas sostenibles en nuestro país e ir implantándolas como se está haciendo en otros países del resto del mundo, creando un nuevo modelo matemático basado en valoraciones y análisis multi-criterio. Y es que llegados al punto en el que nos encontramos hay dos opciones, o continuar con las mismas prácticas que no tienen en cuenta el impacto de los sistemas constructivos en los recursos naturales, en la sociedad y por supuesto en el sector económico o tomar medidas que hagan posible un desarrollo más equilibrado y respetuoso con el medioambiente.

1.4. OBJETIVOS

En los últimos años, se ha tratado de dar respuesta a la necesidad de una mayor sostenibilidad en los proyectos urbanos, desde distintas perspectivas o mediante la creación de determinados instrumentos. Uno de estos instrumentos, son las herramientas de certificación de la sostenibilidad, con ya una cierta tradición en su aplicación a los edificios aislados y en los proyectos urbanos, pero todavía inexistentes en su aplicación en los proyectos civiles a gran escala como son las autovías, los puentes o las grandes construcciones ferroviarias.

El objetivo de este trabajo es, partiendo de la revisión, análisis comparativo, y compilación de los contenidos y metodologías de algunas de estas herramientas que se han considerado relevantes, llegar a una propuesta de los contenidos que debería tener una herramienta de estas características para su aplicación en el contexto civil, en particular en las infraestructuras ferroviarias, incluyendo todo su ciclo de vida. Todo ello según técnicas constructivas determinadas que sean respetuosas con el medioambiente, propicien un uso eficiente de la energía, favorezcan la conservación de los recursos disponibles y reduzcan el impacto ambiental, social, económico y visual ocasionado por la utilización de los diversos materiales, productos, sistemas y tecnologías de la construcción. Se pretende incorporar la infraestructura al entorno y promover la realización de construcciones civiles medioambientalmente responsables, rentables y saludables para las personas y el medio natural en el que ubican.

Para ello se va a crear un nuevo modelo de certificación aplicable a los proyectos de construcción de obras civiles, basado en el análisis multi-criterio y en los valores de las certificaciones existentes, que constituya una propuesta hacia la estandarización en la identificación y selección de indicadores de sostenibilidad en la gestión de proyectos de construcción.

Para demostrar la viabilidad y las ventajas de su aplicación, se plantea la aplicación de la metodología y herramienta para dos puentes ferroviarios ya existentes, analizando y comparando los resultados obtenidos.

Se pretende dotar al constructor, arquitecto o ingeniero proyectista de una herramienta útil para desarrollar su trabajo.

Objetivos específicos

Como **objetivos concretos**, la tesis doctoral estará orientada hacia:

- Llevar a cabo una comparación exhaustiva de las certificaciones más extendidas y aplicadas a nivel mundial.
- La correcta aplicación de los principios de la **construcción sostenible** en proyectos y obras de infraestructura ferroviaria, centrando el estudio en las estructuras y puentes ferroviarios.
- Establecer un marco de referencia objetivo que sirva de referencia para una construcción civil sostenible.
- Establecer una nueva metodología que facilite la realización y el seguimiento a lo largo de la evaluación de estructuras ferroviarias.
- Analizar el origen y la obtención de las materias primas utilizadas en la construcción.
- Crear parámetros determinados para aplicar en la evaluación de la sostenibilidad de puentes ferroviarios.
- Aplicar los parámetros determinados a obras concretas para evaluar su sostenibilidad.
- Preparar recomendaciones sobre buenos usos para la sostenibilidad de estructuras y puentes ferroviarios.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS Y METODOLOGÍA

La tesis está estructurada en 7 capítulos, esto de acuerdo a un proceso lógico de desarrollo en base a los objetivos de la investigación.

El capítulo uno recoge la introducción en donde se analiza el concepto de sostenibilidad, los objetivos y la estructura de la tesis.

El capítulo dos recoge el estado del conocimiento, posteriormente se examina la aplicabilidad del término de sostenibilidad al sector de la edificación y de la construcción en general.

En el capítulo tres se definen los mecanismos de evaluación existentes y como consecuencia de esta revisión, se hace un análisis comparativo de las certificaciones según tres niveles de análisis.

1. Ambiental, social y económico.
2. Análisis de los materiales.

3. Análisis de los residuos.

Estableciéndose una serie de conclusiones sobre la problemática existente y las pautas a seguir para la propuesta.

En el capítulo cuatro, se propone una nueva metodología para cuantificar el valor de una construcción desde el punto de vista sostenible, incluyendo los tres axiomas que actualmente forman parte de una construcción y un desarrollo sostenible. Para ello se desarrolla un nuevo modelo, que partiendo del análisis multi-criterio y del análisis de la función de valor, divide los requerimientos sostenibles en: Económicos R1, Medioambientales R2 y Sociales R3, desglosándolos a su vez en criterios e indicadores que conforman el modelo. Todo ello en base a unos pesos obtenidos del estudio de cada uno de los indicadores propuestos.

Se valoran las decisiones asociadas a la construcción de estas obras civiles respecto a una base conceptual y matemática. Se establecen las pautas para abordar la solución del problema descrito. Se presenta la caracterización y análisis de las variables que han sido definidas en la metodología y que ahora deben ser aplicables a los puentes ferroviarios.

En el capítulo cinco, se plantea la verificación de la propuesta a partir de dos casos prácticos reales de diferentes puentes ferroviarios. El primero de ellos, un puente de hormigón de 649 m de longitud y 14 m de ancho para la línea de Alta Velocidad Madrid-Levante y el segundo de ellos un puente mixto de 129 m de longitud y 14,35 m de ancho en el acceso a la Estación de Atocha, para los trenes de Alta Velocidad.

El capítulo seis resume las conclusiones y ofrece una visión general del desarrollo de la tesis. Adicionalmente se incluyen unas recomendaciones respecto a las futuras líneas de investigación.

El capítulo siete incluye la bibliografía consultada para el desarrollo de la tesis.

De manera más detalladas, el plan de trabajo de esta tesis doctoral esta estructurado de la siguiente forma:

- 1) Estudio y análisis de las certificaciones de sostenibilidad existentes hoy en día para la edificación. (BREEAM (Británico), LEED (Americano), VERDE, Estos estudios reconocen la reducción de impacto medioambiental de los edificios que evalúan comparándolos con un edificio de referencia. El edificio de referencia es siempre un edificio estándar realizado cumpliendo las exigencias mínimas fijadas por las normas y por la práctica común.

- Puntos básicos a aplicar. Categorías de aplicación.
 - Sistemas energéticos que fomentan el ahorro.
 - Exigencias mínimas fijadas.
- 2) Estimar las condiciones de frontera para la aplicación de los modelos.
 - 3) Establecer criterios de evaluación, según los diferentes ámbitos de la construcción:
 - Energía y atmosfera.
 - Materiales y recursos.
 - Innovación en el diseño.
 - Prioridad regional en los materiales.
 - Utilización de tipologías adaptadas a las zonas.
 - 4) Establecer criterios de evaluación, según las diferentes fases de construcción:
 - Fase de diseño.
 - Fase de ejecución.
 - Fase de mantenimiento.
 - 5) Establecer un modelo propuesto a seguir para la evaluación de las construcciones.
 - 6) Hacer un estudio comparativo con el modelo propuesto entre distintas construcciones, tomando dos construcciones de referencia.
 - 7) Establecer recomendaciones relativas a la sostenibilidad para la construcción de futuras construcciones.

Así, en primer lugar, se ha realizado una revisión del estado del conocimiento enfocado desde la perspectiva sostenible, su implicación tanto en la edificación como en las obras civiles, para llegar finalmente con la aplicación de estos conceptos a una evaluación sostenible. Para los mecanismos de evaluación en cuestión, se homogenizaron los distintos criterios y metodologías además de hacer un análisis crítico de sus ventajas y limitaciones.

Las herramientas existentes actualmente están muy focalizadas en la edificación y las zonas urbanas y es ahora cuando empiezan a progresar en otros países algunos sistemas de clasificación para la gestión de la sostenibilidad en sistemas de transporte. Aun así, hoy en día no hay herramientas estandarizadas que permitan una evaluación de las estructuras ferroviarias y ninguna de ellas incluye la resiliencia frente a eventos no previstos de las instalaciones.

A su vez, con el análisis de las herramientas existentes, se ha desarrollado una metodología para seleccionar la alternativa más óptima de un puente ferroviario desde el punto de vista de diseño. Esta metodología se ha basado en un modelo de tres ejes los cuales constituyeron el alcance del proyecto (requerimientos, componentes y ciclo de vida).

Se ha hecho uso de diferentes técnicas matemáticas como lo es el análisis multicriterio y el análisis de valor las cuales ayudan a tratar con mayor rigor el problema de toma de decisión para la creación del método de análisis. Este proceso de toma de decisión ha permitido estructurar el planteamiento de manera coherente y ordenada llegando a obtener una valoración atendiendo al ciclo de vida de los materiales y a los diferentes elementos que componen la estructura.

La metodología creada constituye una nueva propuesta hacia la estandarización en la identificación y selección de indicadores de sostenibilidad en la gestión de proyectos de construcción. Además, considerando la revisión de la documentación científica y la legislación aplicable, la propuesta metodológica permite obtener, por un lado el desarrollo de indicadores de sostenibilidad en la misma dirección que otros campos más desarrollados en estos momentos, como es el sector de la edificación, así como la aplicación en otros países.

Para finalizar este trabajo de investigación, se ha planteado la aplicabilidad de la metodología y herramienta para dos puentes ferroviarios ya existentes, analizando y comparando los resultados obtenidos. De este modo, ha quedado demostrado la viabilidad y las ventajas de su aplicación en el ámbito de estudio.

Se ha realizado la comparativa y el análisis con estructuras existente. Además, con el método desarrollado se pretende dar cabido tanto al estudio y la comparativa de varias alternativas de una misma estructura en una ubicación ya determinada como a sus diferentes ubicaciones dentro de las posibilidades de traza y a la elección de la zona más óptima sosteniblemente hablando. Esta línea aunque no se ha podido desarrollar en esta tesis deja abiertas futuras líneas de investigación para ampliar el contenido del método.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El sector de la edificación y construcción posee una participación importante en los impactos ambientales y una específica característica, el gran número de agentes que se ocupan del proceso desde la fase de desarrollo hasta la fase de deconstrucción o demolición, pasando por las fases de operación de cada componente. Esta característica particular hace lento y difícil cualquier cambio en este sector tan relevante para la sociedad.

Solo los edificios consumen entre 20 y el 60% de los recursos físicos de su entorno, teniendo especial responsabilidad en el actual deterioro del medioambiente la ampliación del parque construido. La actividad constructiva es la mayor consumidora, junto con la industria asociada, de recursos naturales como pueden ser madera, minerales, agua y energía. Se extrae 40% de arena, grava y piedra; 25% de madera, 16% de agua. Se estima que en Europa el 25% de los residuos son de construcción y demolición.

Todo esto hace preciso y necesario una definición clara de los marcos referencia ambientales, y que sean común a todas las diferentes escalas de actuación urbanística. Se hace necesario que estos marcos tengan congruencia, y objetivos definidos para que el proceso de transformación de la ciudad se produzca de forma que atienda las necesidades actuales de la sociedad. La construcción sostenible envuelve no solamente la elección de materiales y procesos constructivos, sino también al entorno urbano, el desarrollo del mismo y el entorno de la sociedad que lo utiliza.

Actualmente solo se considera el entorno, pero hay que empezar a desarrollar criterios que tengan en cuenta además de esto y el desarrollo ambiental, la sociedad y el desarrollo económico. Es necesario regular y controlar los instrumentos para mejorar el comportamiento ambiental (sus impactos) del sector de la edificación y construcción y mitigar el impacto de la construcción con el cambio climático.

2.1. LEGISLACIÓN APLICABLE

La importancia del sector de la construcción en los países europeos está marcada principalmente, por su influencia en la sociedad, ya que afecta directamente a la calidad de vida de los ciudadanos a través de las actuaciones en edificación, construcciones industriales e infraestructuras y obras civiles.

Los números básicos del sector reflejan que, en Europa significa, entre el 10 y el 12 % del PIB, representan del entorno del 25 % de toda la industria de manufacturera, con una gran capacidad de generar empleo. La situación en España, es similar en término medio al resto de Europa, si bien con picos más marcados tanto en el período de expansión, como en el de la recesión actual.

El tejido industrial que conforma el sector o hipersector de la construcción según COTEC (2000), está formado por empresas que se agrupan de la manera siguiente:

- Empresas constructoras generales y especializadas
- Fabricantes de materiales y productos de construcción
- Fabricantes de maquinaria de construcción
- Empresas de servicios técnicos

La anterior no deja de ser una forma de agrupar, aunque no refleja bien todas las etapas y actividades que se desarrollan en cada una de ellas. Hay que señalar que el sector está constituido por un número muy elevado de empresas, la mayoría de ellas de menos de 10 trabajadores, lo que representa una dificultad añadida para introducir los temas de sostenibilidad.

Este reducido tamaño, puede influir en la propia visión de futuro de la empresa, que viene asociado al concepto de sostenibilidad. Esto es, dada la facilidad de aparecer y desaparecer de una empresa pequeña, puede que esta no considere importantes algunos de los conceptos implícitos en la sostenibilidad y consecuentemente, no los incorpore en su estrategia de futuro, ya que la estrategia se basa más en una visión a corto plazo.

Todo ello muestra un sector muy atomizado, con importantes carencias en formación empresarial, lo que propicia el inmovilismo (gran inercia). La consecuencia es las dificultades de introducir conceptos innovadores en diferentes direcciones, tales como: calidad, seguridad, medioambiente, etc.

Hay características muy marcadas que distinguen la industria de la construcción y que ya han sido descritas por diversos autores como García Meseguer, 1984, Puertas 1993, Blay 2001 o Bilbao, 2002). Son estas características las que marcan una clara diferencia

en el ritmo de integración de la sostenibilidad y los sellos de certificación en los procesos de fabricación y desarrollo de ambos sectores y que pueden resumirse en:

- Salvo excepciones, la industria de la construcción crea productos únicos e irrepetibles y no productos seriados. Ello suele ser determinante para la empresa – porque obliga a “inventar” cada vez la organización y desarrollo de la actividad – y para el trabajador – porque su permanencia está ligada a la duración de la obra.
- Es una industria, mayoritariamente, de carácter nómada, sin que se pueda concentrar, usualmente, en una factoría. Los clientes de la construcción no adquieren un producto acabado sino una promesa de ejecución cuya fiabilidad depende de la solvencia y garantía del constructor. Este carácter en que la uniformidad de condiciones en materias primas y procesos es más difícil de conseguir que en otras industrias de carácter fijo.
- El grado de precisión con el que se trabaja es, en general, mucho menor que en otras industrias.
- Es una industria muy tradicional, con gran inercia a los cambios, pero por otro lado, la incorporación de nuevas empresas es fácil, ya que no es necesario disponer de mano de obra fija ni de una gran dotación de capital fijo inicial. Para trabajar con clientes privados no hay condiciones especiales, dentro del marco que la negociación imponga. Para trabajar con clientes públicos en España existe un sistema de clasificación de empresas contratistas cuyos criterios actualmente no suponen en la práctica condicionantes demasiado rigurosos.
- No es aplicable, usualmente, la producción en cadena sino la producción concentrada (operarios móviles en torno a un producto fijo), lo que dificulta la organización y control de los trabajos.
- En construcción, el usuario influye muy poco en la calidad del producto, ya que no coincide generalmente con el propietario y sus intereses pueden ser muy diferentes. Este concepto es algo que está evolucionando, especialmente con los sistemas de calidad total que se centran en la satisfacción del cliente y el usuario final del producto o servicio.
- Utiliza mano de obra intensiva poco cualificada, el empleo de muchas personas tiene carácter eventual y sus posibilidades de promoción son escasas. Todo ello repercute en una baja motivación en el trabajo y en mermas de calidad.
- Otras industrias trabajan a cubierto, mientras la construcción lo hace, en un gran número de casos, a la intemperie, con dificultades de buen almacenamiento, sometida a las inclemencias del tiempo. La protección, en todos los sentidos, es más difícil.
- Los poderes públicos tienen enorme influencia en el sector por su capacidad reguladora, particularmente importante en materia de contratación, sobre todo por aquellas empresas cuya actividad está más concentrada en la obra civil.

- Se emplean especificaciones complejas, a menudo contradictorias y no pocas veces confusas. Las calidades resultan mal definidas de origen. Asimismo, las responsabilidades aparecen dispersas y poco definidas.

Hay que poner de manifiesto que, con respecto a la construcción sostenible, que actualmente no existe ninguna normativa, ni europea, ni española, que desarrolle algunas leyes sobre la materia a pesar de ser un tema que cada vez preocupa más.

El marco normativo general bajo el que se mueve el sector de la construcción está regulado por una norma europea central, la Directiva de 21 de diciembre de 1988 (89/106/CE) relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción, que fue traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre y posteriormente retocada, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE, por el Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio. En ella no se regulan en ningún apartado temas relacionados con la sostenibilidad medioambiental.

La Directiva europea establece que todos los productos fabricados y comercializados por el sector deben disponer de unos requisitos de seguridad y salubridad mínimos. La transposición de esta directiva a la legislación nacional obliga al sector de la construcción a utilizar solamente aquellos productos que estén autorizados, o sea hayan pasado todos los controles y tengan la autorización permitente. Este tipo de permiso es obligatorio.

Ahora bien, los fabricantes pueden optar por otro tipo de controles voluntarios, más exigentes, que le aporten un valor añadido de calidad, como son las normas ISO (Organización Internacional de Normalización) o las normas europeas CEN (Comité Europeo de Normalización), encargadas del desarrollo de la normalización en sus ámbitos geográficos correspondientes y que agrupan a los organismos nacionales de normalización de los diferentes países que se desarrollan en los siguientes puntos.

En este sentido, a pesar de que existen normas, procedimientos, métodos y tecnologías para reducir el impacto ambiental de las obras, no están integrados dentro de una metodología de actuación, sino que se aplican de manera dispar.

Aun así, aunque no hay tantos métodos de evaluación de obras de ingeniería civil como hay para los edificios, se puede encontrar algunos. La existencia de estos métodos demuestra una tendencia hacia una construcción más sostenible, cuyos objetivos principales son:

- Reducir al mínimo el uso de recursos (materiales, agua y energía) a través de una gestión de la materia prima adecuada, el reciclaje y la reutilización.
- Minimizar la generación de residuos mediante el uso de materiales y / o de energía recuperando reutilizables, reciclables.

- Reducir al mínimo los vertidos directos e indirectos en el agua, la atmósfera y el suelo, prestando especial atención a las emisiones de gases de efecto invernadero y de su relación con el cambio climático.
- Innovar y utilizar energías y materiales alternativos.
- Analizar y minimizar los impactos sociales, tanto en los usuarios directos de la infraestructura y de los indirectos.
- Minimizar el impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas.
- Seleccionar la alternativa más económica y respetuosa del medioambiente.

Estos métodos de evaluación del desempeño sostenible de obras de ingeniería civil proporcionan una base para demostrar y comunicar el resultado de los esfuerzos para mejorar el rendimiento sostenible en las obras de construcción. Los métodos normalmente establecen un medio de evaluar una amplia gama de consideraciones sostenibles contra criterios declarados explícitamente, y dan un resumen del desempeño sostenible. Estos métodos pretenden proporcionar:

- un conjunto común y verificable de referencias, de modo que los propietarios de obras de ingeniería civil, la búsqueda de estándares más altos sostenibles, tener un medio para medir, evaluar y demostrar ese esfuerzo,
- una referencia como base común por el cual obras de ingeniería civil propietarios, los equipos de diseño, contratistas y proveedores, pueden formular estrategias eficaces en Obras de Ingeniería Civil de diseño y operación, que están destinadas a mejorar el rendimiento de la sostenibilidad,
- información detallada sobre las obras de ingeniería civil que se recopila y organiza en una forma tal que pueda ser utilizado para bajar de operación, financiamiento y costos de seguros, menores tasas de vacantes y aumentar la capacidad de venta,
- una descripción clara de los factores que se consideran las consideraciones sostenibles clave y su importancia relativa, ayudando así al proceso de diseño.

La normativa europea de aplicación es muy extensa, pero se puede clasificar por sectores de aplicación, quedando de la siguiente manera:

Eficiencia energética:

- Plan de Eficiencia Energética 2011 de la Unión Europea.
- Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE.
- Directiva 2010/31/UE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).
- Decisión 2007/742/CE de la Comisión, de 9 de noviembre de 2007, por la que se establecen los criterios ecológicos para la concesión de la etiqueta ecológica

comunitaria a las bombas de calor accionadas eléctricamente o por gas o de absorción a gas.

- Directiva 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo.
- Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía.
- Directiva 2003/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de junio de 2003, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad.
- Directiva 2003/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de junio de 2003, sobre normas comunes para el mercado interior del gas natural.
- Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- Directiva 93 76 CEE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE).
- Documento Básico HE Ahorro de energía del Código técnico de la edificación. Apartados relativos a la eficiencia energética: HE 1 Limitación de demanda energética; HE 2 Rendimiento de las instalaciones térmicas; HE 3 Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.
- RD 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE).
- RD 47/2007, del 19 de enero, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.
- Norma UNE-ISO 50001 sobre los requisitos de un Sistema de Gestión Energética, para realizar mejoras continuas y sistemáticas del rendimiento energético de las organizaciones.

Energías renovables:

- Plan de energías renovables 2011-2020 (PER)
- Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020 (PANER)
- Directiva 2009/28/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE
- Reglamento (CE) no 1099/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2008, sobre estadísticas en el ámbito de la energía.
- Documento Básico HE Ahorro de energía del Código técnico de la edificación. Apartados relativos a las energías renovables: HE 4 Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria; HE 5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

- Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte.
- Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad.

Diseño ecológico:

- Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de julio de 2005, por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía.

Impactos ambientales:

- Decreto 21/2006, de 14 de febrero, por el cual se regula la adopción de criterios ambientales y de ecoeficiencia en los edificios.

Residuos:

- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

Inspección:

- Real Decreto 410/2010, de 31 de marzo, por el que se desarrollan los requisitos exigibles a las entidades de control de calidad de la edificación y a los laboratorios de ensayos para el control de calidad de la edificación, para el ejercicio de su actividad.

A continuación, en la Tabla 2.1 se detalla la normativa europea existente en el ámbito de la construcción, el medioambiente y la energía, con una síntesis del marco y los objetivos.

Tabla 2.1 Normativa principal en materia de medioambiente y desarrollo sostenible en la Unión Europea y España.

NORMATIVA DE LA UNIÓN EUROPEA - SÍNTESIS Y OBJETIVOS

Estrategia de Desarrollo Sostenible de la UE (EDS-UE)	Esta estrategia establece un marco político a escala de la Unión Europea para permitir el desarrollo sostenible. Se basa en cuatro pilares: económico, social, medioambiental e internacional. El objetivo de esta estrategia, que es complementaria de la Estrategia de Lisboa, es servir de catalizadora ante la opinión pública y los responsables políticos para influir en el comportamiento del conjunto de la sociedad. Se basa en medidas sobre los principales desafíos identificados, así como en medidas transversales, financiación adecuada, la participación de todas las partes interesadas y una aplicación y seguimiento eficaces de las políticas.
Estrategia temática sobre la contaminación atmosférica	Resultado de las investigaciones efectuadas en el marco del programa “Aire puro para Europa” (Clean Air For Europe - CAFE) y de los programas marco de investigación. Fija objetivos de reducción de determinados contaminantes y refuerza el marco legislativo de lucha contra la contaminación atmosférica, mejorando la legislación comunitaria en materia de medioambiente y la integración en las políticas relacionadas con la calidad del aire.
Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medioambiente	Cubre el período comprendido entre el 22 de julio de 2001 y el 21 de julio de 2012. Propone cinco ejes prioritarios de acción estratégica: mejorar la aplicación de la legislación en vigor, integrar el medioambiente en otras políticas, colaborar con el mercado, implicar a los ciudadanos y modificar sus comportamientos, y tener en cuenta el medioambiente en las decisiones relativas al ordenamiento y gestión del territorio.

Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia	Las partes se comprometen a limitar, prevenir y reducir paulatinamente las emisiones de contaminantes atmosféricos y, con ello, a luchar contra la contaminación transfronteriza consiguiente.
Estrategia de la UE para los biocarburantes	Define el papel que podrían desempeñar en el futuro los biocarburantes. Por otra parte, propone medidas que permitan fomentar la producción y el uso de los biocarburantes.
Estrategia ambiental para el Mediterráneo	Propicia un uso más sostenible de las zonas terrestres y marítimas del mediterráneo, impulsando la cooperación regional y mejorando la información a la opinión pública, y fomenta su sensibilización y su participación.
Estrategia de integración del medioambiente en las políticas de la Unión Europea	Establece un enfoque transversal de la política medioambiental para su integración en todas las políticas comunitarias.
Estrategia temática para la protección del suelo	Prevención de la degradación del suelo, preservación de las funciones de éste y rehabilitación de los suelos degradados.
Estrategia temática para el medioambiente urbano	Medidas de cooperación y orientaciones para la mejora del medioambiente urbano. Garantiza una aplicación eficaz de la legislación y favorece las mejores prácticas por parte de las administraciones locales.
Estrategia sobre la prevención y el reciclado de los residuos	Disminuir las presiones sobre el medioambiente derivadas de la producción y gestión de los residuos.
Estrategia en materia de medioambiente y salud	Crea un marco que ayude a comprender mejor las relaciones de causa-efecto entre el medioambiente y la salud, y a disponer de la información necesaria para desarrollar una política comunitaria integrada.

**Protocolo de Kioto
sobre el cambio
climático**

Es el instrumento más importante destinado a luchar contra el cambio climático. Contiene el compromiso asumido por la mayoría de los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento del planeta.

Estrategia en el
ámbito del cambio
climático: medidas
de lucha hasta 2020
y después

Aplicación de las políticas existentes, en la elaboración de nuevas medidas en coordinación con las demás políticas europeas, en el refuerzo de la investigación, en el refuerzo de la cooperación internacional y en la sensibilización de los ciudadanos.

Directiva
2002/91/CE relativa
a la eficiencia
energética de los
edificios

Se establece para valorar y comparar su eficiencia energética, con el fin de favorecer la promoción de edificios de alta eficiencia energética y las inversiones en ahorro de energía.

Estrategia sobre el
uso sostenible de los
recursos naturales

Disminuir las presiones sobre el medioambiente derivadas de la producción y del consumo de los recursos naturales, sin perjudicar al desarrollo económico, es decir, respetando a su vez los objetivos que fijó el Consejo Europeo de Lisboa en materia de crecimiento económico y empleo.

Convenio de Río de
Janeiro sobre la
diversidad biológica

Su objetivo es prever, prevenir y atajar en su fuente las causas de reducción o pérdidas significativas de la diversidad biológica, debido a su valor intrínseco y a los valores de sus componentes medioambientales, genéticos, sociales, económicos, científicos, educativos, culturales, recreativos y estéticos.

Convenio de Berna

Conservación de la vida silvestre y del medio natural de Europa mediante una cooperación entre los Estados.

Estrategia en favor
de la diversidad
biológica

Elaboración de políticas e instrumentos comunitarios que permitan cumplir las obligaciones del Convenio de Río de Janeiro sobre la diversidad biológica.

Plan de acción a favor de la biodiversidad	Detención del declive de la biodiversidad y las medidas que permiten alcanzar estos objetivos hasta el 2010.
Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medioambiente	Mejora de la competitividad del sector forestal a largo plazo, protección del medioambiente, mejora de la calidad de vida y aumento de la coordinación intersectorial y la comunicación.
Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (Plan EETE)	Acelerar el desarrollo y la implantación al mínimo coste de tecnologías con baja emisión de carbono. Este plan comprende medidas relativas a la planificación, la aplicación, los recursos y la cooperación internacional en el sector de las tecnologías energéticas.
Plan de acción sobre la biomasa	Aumento de la demanda de biomasa, reforzamiento de la oferta, eliminación de los obstáculos técnicos y desarrollo de la investigación.
Plan de acción sobre biodiversidad para la conservación de los recursos naturales	Mejora o al menos mantenimiento del estado de la flora y la fauna silvestres, sus ecosistemas y sus hábitats.
Plan de acción de la Unión Europea en defensa de los bosques	Mejora de la competitividad del sector forestal a largo plazo, protección del medioambiente, mejora de la calidad de vida y aumento de la coordinación intersectorial y la comunicación.
Reglamento (CE) 2037/2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono	Protege la salud humana y el medioambiente, limitando y controlando la producción, comercialización y utilización de sustancias que agotan la capa de ozono. Adapta el régimen comunitario los avances técnicos registrados, así como al Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

Programa marco para la innovación y la competitividad (CIP) (2007-2013)	Responde a los objetivos de la Estrategia de Lisboa renovada, y de fomentar así el crecimiento y el empleo en Europa.
Reglamento (CE) 1980/2000, relativo a un sistema comunitario revisado de concesión de etiqueta ecológica	Trata de promover la producción y el consumo sostenibles de productos, así como la prestación y el uso sostenibles de servicios, estableciendo criterios de buen comportamiento ambiental, con arreglo a los productos y servicios con mejor comportamiento del mercado.
Reglamento 1221/2009, relativo a la participación voluntaria de org. en un sist. comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS)	Promueve mejoras continuas del comportamiento medioambiental de todas las organizaciones europeas y la difusión de la información pertinente al público y otras partes interesadas.
Plan de acción para un consumo, una producción y una industria sostenibles	Aplicación de medidas dirigidas a mejorar el comportamiento energético y medioambiental de los productos a lo largo de su vida útil, y a fomentar la demanda y el consumo de productos de mejor calidad.
Plan de actuación a favor de las tecnologías ambientales	Fomento de las tecnologías ambientales con el fin de reducir la presión sobre los recursos naturales, mejorar la calidad de vida de los europeos y favorecer el crecimiento económico.
Directiva 2008/1/CE,	Evita o minimiza las emisiones contaminantes a la atmósfera,

relativa a la
prevención y al
control integrados
de la contaminación

las aguas y los suelos, así como los residuos procedentes de instalaciones industriales y agrarias para alcanzar un nivel elevado de protección del medioambiente.

Reglamento (CE)
1907/2006, relativo
al registro, la
evaluación, la
autorización y la
restricción de las
sustancias y
preparados
químicos (REACH)

Pretende garantizar un nivel elevado de protección de la salud humana y el medioambiente, así como fomentar la competitividad y la innovación en el sector de las sustancias y preparados químicos.

Directiva
2008/50/CE, relativa
a la calidad del aire
ambiente y a una
atmósfera más
limpia en Europa

Revisa la legislación europea relativa a la calidad del aire ambiente con el fin de reducir la contaminación a niveles que limiten al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana y el medioambiente, y mejorar la información proporcionada a los ciudadanos sobre los riesgos a los que se exponen.

Directiva
2002/49/CE sobre
evaluación y gestión
del ruido ambiental

Combate el ruido que percibe la población en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas en una aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y en los alrededores de hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido.

Directiva
2000/60/CE por la
que se establece un
marco comunitario
de actuación en el
ámbito de la política
de agua

Marco comunitario para la protección y la gestión de las aguas.

Directiva
2006/44/CE, relativa
a la calidad de las
aguas continentales
que requieren
protección o mejora

Protección y mejora de la calidad de las aguas continentales, corrientes o estancadas, en las que viven o podrían vivir, si se redujera o eliminara la contaminación, determinadas especies de peces.

para ser aptas para
la vida de los peces.

Directiva
2008/98/CE sobre
los residuos y por la
que se derogan
determinadas
Directivas

Marco jurídico para controlar todo el ciclo de los residuos, desde su producción a su eliminación, centrándose, para ello, en la valorización y el reciclaje.

Directiva 92/43/CEE
del Consejo, de 21
de mayo de 1992,
relativa a la
conservación de los
hábitats naturales y
de la fauna y la flora
silvestres

Aseguramiento de la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales, así como de la fauna y la flora silvestres en el territorio de los Estados miembros

2.1.1. Normas ISO. Organización internacional para la estandarización.

La Organización Internacional de Normalización o ISO, nacida tras la Segunda Guerra Mundial, en 1947, es el organismo encargado de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación (tanto de productos como de servicios), comercio y comunicación para todas las ramas industriales (excepto el electrónico y el electrotécnico). Su función principal es la de buscar la estandarización de normas de productos y seguridad para las empresas u organizaciones (públicas o privadas) a nivel internacional.

La ISO es una red de los institutos de normas nacionales de 163 países, sobre la base de un miembro por país, con una Secretaría Central en Ginebra (Suiza) que coordina el sistema. Está compuesta por delegaciones gubernamentales y no gubernamentales subdivididos en una serie de subcomités encargados de desarrollar las guías que contribuirán al mejoramiento.

Las normas desarrolladas por ISO son voluntarias, comprendiendo que ISO es un organismo no gubernamental y no depende de ningún otro organismo internacional, por lo tanto, no tiene autoridad para imponer sus normas a ningún país.

A Nivel mundial están las normas ISO 14000 (International Organization for Standardization), que es una norma internacionalmente aceptada que expresa cómo establecer un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) efectivo. La norma se empezó a publicar en 1996 y está diseñada para conseguir un equilibrio entre el mantenimiento de la rentabilidad y la reducción de los impactos en el ambiente y, con el apoyo de las organizaciones, es posible alcanzar ambos objetivos.

El surgimiento de la serie de normas ISO 14000 es consecuencia directa de la cumbre de Río de Janeiro de las Naciones Unidas sobre el medioambiente, que se realizaron en 1992. Las normas estipuladas por ISO 14000 no fijan metas ambientales para la prevención de la contaminación, ni tampoco se involucran en el desempeño ambiental a nivel mundial, sino que, establecen herramientas y sistemas enfocados a los procesos de producción al interior de una empresa u organización, y de los efectos o externalidades que de estos deriven al medioambiente.

Cabe resaltar dos vertientes de la ISO 14000:

1. La certificación del Sistema de Gestión Ambiental, mediante el cual las empresas recibirán el certificado.
2. El Sello Ambiental, mediante el cual serán certificados los productos ("sello verde").

La ISO 14000 se basa en la norma Inglesa BS7750, que fue publicada oficialmente por la British Standards Institution (BSI) previa a la Reunión Mundial de la ONU sobre el Medioambiente (ECO 92).

La norma ISO 14000 es un conjunto de documentos de gestión ambiental que, una vez implantados, afectará todos los aspectos de la gestión de una organización en sus responsabilidades ambientales y ayudará a las organizaciones a tratar sistemáticamente asuntos ambientales, con el fin de mejorar el comportamiento ambiental y las oportunidades de beneficio económico. Los estándares son voluntarios, no tienen obligación legal y no establecen un conjunto de metas cuantitativas en cuanto a niveles de emisiones o métodos específicos de medir esas emisiones. Por el contrario, ISO 14000 se centra en la organización proveyendo un conjunto de estándares basados en procedimiento y unas pautas desde las que una empresa puede construir y mantener un sistema de gestión ambiental.

La norma se compone de 8 elementos, los cuales se relacionan a continuación con su respectivo número de identificación:

- Sistemas de Gestión Ambiental (14001 Especificaciones y directivas para su uso – 14004 Directivas generales sobre principios, sistemas y técnica de apoyo).
- Auditorías Ambientales (14010 Principios generales- 14011 Procedimientos de auditorías, Auditorías de Sistemas de Gestión Ambiental- 14012 Criterios para certificación de auditores).
- Evaluación del desempeño ambiental (14031 Lineamientos- 14032 Ejemplos de Evaluación de Desempeño Ambiental).
- Análisis del ciclo de vida (14040 Principios y marco general- 14041 Definición del objetivo y ámbito y análisis del inventario).

La serie de normas ISO 14000 sobre gestión ambiental incluye las siguientes normas:

- Guía ISO 64:1997 De gestión ambiental (S G A): especificaciones y directrices para su utilización.
- ISO 14001:2004 Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.
- ISO 14004:2004 Sistemas de gestión ambiental. Directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo.
- ISO 14006:2011 Sistemas de gestión ambiental. Directrices para la incorporación del ecodiseño.
- ISO 14010 Sistemas de gestión ambiental. Auditorías. Principios Generales.
- ISO 14011:2002 Guía para las auditorías de sistemas de gestión de calidad o ambiental.
- ISO 14012 Sistemas de gestión ambiental. Criterios de calificación para auditores ambientales.
- ISO 14020 Etiquetado y declaraciones ambientales - Principios Generales.
- ISO 14021 Etiquetado y declaraciones ambientales – Autodeclaraciones.
- ISO 14024 Etiquetado y declaraciones ambientales.
- ISO/TR 14025 Etiquetado y declaraciones ambientales.
- ISO 14031:1999 Gestión ambiental. Evaluación del rendimiento ambiental. Directrices.
- ISO/TR 14032:1999 Gestión ambiental- Ejemplos de evaluación del rendimiento ambiental (ERA).
- ISO 14040:2006 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco de referencia.
- ISO 14044:2006 Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices.
- ISO/TR 14047 Gestión ambiental - Evaluación del impacto del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de ISO 14042.
- ISO/TS 14048 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida. Formato de documentación de datos.

- ISO/TR 14049 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida. Ejemplos de la aplicación de ISO 14041 a la definición de objetivo y alcance y análisis de inventario.
- ISO 14050:2009 Gestión ambiental – Vocabulario.
- ISO/TR 14062:2002 Gestión ambiental - Integración de los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo de los productos.
- ISO 14063:2006 Comunicación ambiental - Directrices y ejemplos.

Por último, a nivel internacional, están las ISO-TC59, que incluyen tanto en el ámbito del urbanismo como los de la edificación y obra civil.

- ISO/TC 59/SC 14 Edificios y activos construidos. Planificación de la vida de servicio. Costes del ciclo de vida.
- ISO/TC 59/SC 14/WG 10 Diseño de edificios. La evaluación del desempeño.
- ISO/TC 59/SC 17 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción.
- ISO/TC 59/SC 17/WG 1 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción. Principios. Generales y Terminología.
- ISO/TC 59/SC 17/WG 2 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción. Indicadores de sostenibilidad.
- ISO/TC 59/SC 17/WG 3 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de los productos.
- ISO/TC 59/SC 17/WG 4 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción. Comportamiento medioambiental de los edificios.
- ISO/TC 59/SC 17/WG 5 Construcción de edificios. Sostenibilidad en la construcción. Obra Civil.

Además de la normativa ya existente, este comité internacional está desarrollando con rapidez normas en el campo de la construcción para la definición de los parámetros de aplicación, encontrándose en pleno proceso varias de ellas, todas ellas bajo el marco de la norma ISO / TC59 / SC17 "Sostenibilidad en obras de ingeniería civil", actualmente en desarrollo y que fue creado en la quinta sesión plenaria de ISO / TC59 / SC17 celebrada el octubre de 2007 en Seúl y ha estado trabajando desde 2008 en la sostenibilidad en las obras de ingeniería civil.

El Comité Técnico ISO/TC59/SC17 "Sostenibilidad en obras de ingeniería civil" se estructura en 5 grupos de trabajo:

- WG 1: Principios Generales.
- WG 2: Indicadores de sostenibilidad en edificación.
- WG 3: Declaración ambiental de productos de construcción (DAPs).
- WG 4: Marco para la evolución del comportamiento ambiental de edificios.
- WG 5: Obra civil.

Dentro de este Comité Técnico se han desarrollado o se están llevando a cabo los siguientes estándares de internacionales, relacionados con la sostenibilidad en la construcción:

- la norma ISO TS 21929-2 (Especificaciones Técnicas), que comenzó a desarrollarse a finales de 2011, que en 2012 envió un borrador final al Comité SC17 y que a finales de 2014 se encuentra enviado el documento final para su publicación.
- La norma ISO TR 18971 (Informe Técnico), que nace en noviembre de 2012 y se desarrolla como una nueva propuesta de escrutinio de los elementos de trabajo en el análisis de los métodos de evaluación del desempeño sostenible utilizados para las obras de ingeniería civil tanto en ISO como en CEN.

El proyecto TR “Análisis de los métodos de evaluación de desempeño de sostenibilidad utilizados para obras de ingeniería civil” se aprobó el 25 de febrero de 2013 tanto en el CEN como en la ISO y fue registrado como ISO / TR 18791 NP y se tuvo que desarrollar en 1 año.

- La norma ISO 21931-2

Estándares internacionales

- Dentro de este Comité Técnico se han desarrollado o se están llevando a cabo los siguientes estándares internacionales, relacionados con la sostenibilidad en construcción.
- **ISO 15392:2008.** Sustainability in building construction - **General principles**
- **ISO/DTR 21932.** Buildings and constructed assets - Sustainability in building construction – **Terminology**.
- **ISO/DIS 21929-1.** Sustainability in building construction - **Sustainability indicators** - Part 1: Framework for the development of indicators for **buildings**.
- **ISO/NP 21929-2.** Sustainability in building construction - **Sustainability indicators** - Part 2: Framework for the development of indicators for **civil engineering works**.
- **ISO 21930: 2007.** Sustainability in building construction - **Environmental declaration** of building products.
- **ISO 21931-1:2010.** Sustainability in building construction - Framework for methods of **assessment** for environmental performance of construction works. Part 1: Buildings.

Normas relacionadas con indicadores de sostenibilidad para construcción: WG2 para edificación y WG5 para obra civil

Sostenibilidad en la ingeniería civil Madrid, 26 de mayo de 2011

Figura 2.1. Estándares Internacionales que está desarrollando ISO/TC59/SC17

La situación a finales de 2014 de ambas normas es la siguiente:

Figura 2.2. Situación del desarrollo de las normas ISO

En octubre 2014 se reunió en Toronto el Grupo de Trabajo número 5 de la organización internacional para poder preparar una nueva propuesta de ítems de trabajo con el fin de activar el preliminar y el índice de trabajo de ISO/NP 18177 basado en la norma ISO 21931-1 y las normas CEN relacionadas con la evaluación del desempeño sostenible.

Estas normas forman parte de una serie de normas internacionales que tratan de la sostenibilidad en la construcción y otras obras de construcción que incluye lo siguiente:

a) ISO 15392	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Principios Generales;
b) ISO/DTR 21932	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Terminología
c) ISO/TS 21929-1	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Indicadores de sostenibilidad – Parte 1: Marco para el desarrollo de indicadores para edificios;
d) ISO/TS 21929-1	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Indicadores de sostenibilidad – Parte 2: Marco para el desarrollo de indicadores para Obras de Ingeniería Civil;
e) ISO 21930	Sostenibilidad en la construcción de edificios - Declaración ambiental de productos de construcción
f) ISO/FDIS 21931-1	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Marco para métodos de evaluación de el desempeño ambiental de las obras de construcción - Parte 1: Edificios
g) ISO/FDIS 21931-1	Sostenibilidad en la construcción de edificios – Marco para métodos de evaluación de el desempeño ambiental de las obras de construcción - Parte 2: Obras de Ingeniería Civil

Todas ellas basadas en las normas ISO anteriores ya desarrolladas:

2. Estado del Conocimiento

- a) ISO 14020:2000 Etiquetas y declaraciones ambientales – Principios Generales;
- b) ISO 14025:2006 Etiquetas y declaraciones ambientales - Tipo III declaraciones ambientales - Principios y procedimientos
- c) ISO 14031:1999 Gestión ambiental - Evaluación del desempeño ambiental - Directrices
- d) ISO 14040:2006 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco
- e) ISO/TR 14047:2003 Gestión ambiental - Evaluación del impacto del ciclo de vida - Ejemplos de aplicación de la norma ISO 14042
- f) ISO 15392:2008 De sostenibilidad en la construcción de edificios - Principios generales

La relación entre las Normas Internacionales se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 2.2. Relación entre las normas internacionales

Fuente: ISO DIS 21931-2 Draft 3. Elaboración propia

	Aspectos medioambientales	Aspectos económicos	Aspectos sociales
Metodología básica	ISO 15392 – Principios Generales ISOTR 21932 – Terminología		
	ISO 21929-1:2011 Indicadores de Sostenibilidad - Parte 1 - Marco para el desarrollo de indicadores y un conjunto básico de indicadores para edificios		
	ISO 21929-2:2011 Indicadores de Sostenibilidad - Parte 2 - Marco para el desarrollo de indicadores para las obras de ingeniería civil		
Edificios u obras de ingeniería civil	ISO 21931-1: Marco para los métodos de evaluación del medioambiente desempeño de la construcción funciona - Parte 1 - Edificios		
	Marco para métodos de evaluación del desempeño sostenible de las obras de construcción - Parte 2 - Obras de ingeniería civil		
Productos de construcción	ISO 21930: Declaración ambiental de productos de construcción		

2.1.2. Normas EN. Comité Europeo de Normalización

El Comité Europeo de Normalización (CEN) es una organización sin ánimo de lucro privada cuya misión es fomentar la economía europea en el negocio global, el bienestar de ciudadanos europeos y el medio ambiente, proporcionando una infraestructura eficiente a las partes interesadas para el desarrollo, el mantenimiento y la distribución de sistemas estándares coherentes y de especificaciones.

El CEN fue fundado en 1961. Sus treinta y tres miembros nacionales (año 2015) trabajan juntos para desarrollar los estándares europeos (EN) en varios sectores para mejorar el entorno del mercado único europeo para mercancías y servicios. CEN es el representante oficialmente reconocido de la estandarización para los sectores a excepción de electrotécnico (CENELEC) y las telecomunicaciones (ETSI). Es la única organización europea reconocida de acuerdo con la Directriz 98/34/CE para la planificación, elaboración y adopción de normas europeas en todos los ámbitos de la actividad económica, con la excepción de electrotécnica (CENELEC) y las telecomunicaciones (ETSI).

Estos organismos establecen normas comunes que se aplican en el conjunto del mercado único europeo, el CEN y CENELEC garantizan la protección de los consumidores, facilitan el comercio transfronterizo, garantizan la interoperabilidad de los productos, fomentan la innovación y el desarrollo tecnológico, la protección ambiental y permiten a las empresas crecer. Los productos y servicios que cumplan con estas normas europeas (EN) pueden ser ofrecidos y vendidos en todos los países participantes. El CEN proporciona una plataforma para el desarrollo de normas europeas y otras especificaciones técnicas en una amplia gama de sectores. El CEN también coopera con la Organización Internacional de Normalización (ISO) para llegar a acuerdos sobre normas comunes que se pueden aplicar en todo el mundo, lo que facilita el comercio internacional.

Los cuerpos de estandarización de los 33 miembros nacionales representan a veinticinco estados miembros de la Unión Europea (UE), tres países de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC) y los países candidatos a la UE y a la AELC.

Figura 2.3. Países que integran el CEN
(Fuente: CEN)

En 2006 se publicó CEN/TC 350. Sostenibilidad en la construcción. Esta norma incluye:

- Normas europeas relativas a la evaluación de la sostenibilidad de las obras de construcción (edificios y obras de ingeniería civil) con el ENFOQUE basado en desempeño en términos de:
 - Desempeño ambiental (mandato M350)
 - Desempeño social
 - Desempeño económico
- Enfoque de ciclo de vida con los indicadores cuantificables.
- Desarrollo de normas relacionadas con los materiales, que ha tenido en cuenta las necesidades de las políticas de la UE relevantes relacionadas con los productos de la construcción y las edificaciones.
 - Reglamento de productos de construcción
 - Directivas: marco de residuos
 - Diseño ecológico
 - Planes: eficiencia de los recursos, economía baja en carbono

CEN/TC 350 – Sustainability of Construction Works					
Framework level	EN 15643-1 Sustainability Assessment of Buildings (and Civil Engineering Works) - General Framework				
	EN 15643-2 Framework for Environmental Performance of Buildings	EN 15643-3 Framework for Social Performance of Buildings	EN 15643-4 Framework for Economic Performance of Buildings	Technical Characteristics	Functionality
	prEN 15643-5 Framework for Assessment of Sustainability Performance of Civil Engineering Works			Service Life Planning – General Principles (ISO 15686-1)	
Works level	EN 15978 Assessment of Environmental Performance	EN 16309 Assessment of Social Performance	prEN 16672 Assessment of Economic Performance	CEN Standards on Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)	
Product level	EN 15804 Environmental Product Declarations	(see Note below)	(see Note below)	Service Life Prediction (ISO 15686-2), Feedback from Practice (ISO 15686-7), Reference Service Life (ISO 15686-8)	
	EPD of Build. Products (ISO 21930)	Note: At present, technical information related to some aspects of social and economic performance are included under the provisions of EN 15804 to form part of EPD			
	EN 15942 Comm. Form. B-to-B				

Figura 2.4 Normas CEN en desarrollo
(Fuente: Comité Europeo de Normalización (CEN))

Figura 2.5 Evolución del concepto de sostenibilidad.
(Fuente: Comité Europeo de Normalización (CEN))

Al mismo tiempo, en el ámbito de la ingeniería civil se está desarrollando una norma EN 15643-5 “Principios y marco en el requisito específico para obras de ingeniería civil” que pretende englobar los 3 partes de la sostenibilidad abarcando los aspectos económico, medioambiental y social en una única norma.

Para su desarrollo se ha tomado como base la fusión de las 3 normas de sostenibilidad en la edificación:

EN 15643-2: 2011. Sostenibilidad de las obras de construcción - Evaluación de edificios - Parte 2: Marco para la evaluación del desempeño ambiental.

EN 15643-3: 2012. Sostenibilidad de las obras de construcción - Evaluación de edificios - Parte 3: Marco para la evaluación del desempeño social.

EN 15643-4: 2012. Sostenibilidad de las obras de construcción - Evaluación de edificios - Parte 4: Marco para la evaluación de los resultados económicos.

Quedando de la siguiente manera:

Figura 2.6. Desarrollo de la norma EN 15643

Esta norma se encuentra en desarrollo y ha sido enviada a la secretaría en octubre de 2014 para que sea estudiada por los expertos. La norma pretende crear un marco estándar de trabajo para la ingeniería civil en línea con la estructura de los desarrollos existentes actualmente en la construcción. Para ello se seguirán los principios más importantes de evaluación de sostenibilidad en edificación, teniendo en cuenta también las especificaciones de la ingeniería civil.

2.1.3. El sector de la construcción en España

En 2006, el Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE) publicó un informe que ponía de manifiesto los cambios en los modelos de ocupación del suelo entre 1987 y el año 2000. Entre los aspectos señalados en dicho informe se pueden destacar los siguientes:

1. España es uno de los países de Europa, junto a Irlanda y Portugal, donde más ha crecido la superficie urbanizada. Con un ritmo medio anual de 1,9% muy por encima de la media de los 23 países del programa CLC2000, de sólo un 0,68%.
2. La superficie urbanizada en España que representa un 2,1%, se incrementó un 29,5% en el periodo 1987/2000 lo que supone un ritmo de crecimiento de 2ha/hora.
3. En el periodo estudiado se ha producido la desaparición de más de 200.000 ha. agrícolas o forestales, que han pasado a ser suelo urbano.
4. España es uno de los países que más viviendas tiene por habitante y el que más construye, con 18,1 nuevas viviendas por mil habitantes/año, frente al ratio europeo de 5,7. Durante el periodo 2000/2005, el ritmo de la construcción de la vivienda en España se ha acelerado hasta llegar a un promedio de una vivienda por cada dos habitantes. A partir de 2007 este crecimiento se ha desacelerado debido a la crisis económica.

En la siguiente tabla (Tabla 2.3.) se puede observar el incremento en el número de licencias urbanísticas concedidas en España durante un periodo de 10 años. Estos datos demuestran la importancia de la actividad del sector de la construcción de edificios en España, lo que justifica que haya sido y es aún, un factor clave para la economía española. Aunque desde 2007 se ha producido una disminución significativa en el ritmo de la construcción, la importancia del sector de la construcción en la composición del PIB nacional es fundamental.

2. Estado del Conocimiento

Tabla 2.3 Licencias municipales para construcción, rehabilitación y demolición por tipo de obra y periodo.

AÑO	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Edificación de nueva planta. (<i>New floor building</i>)											
Edificios a construir. <i>Buildings to build.</i>	129.830	146.939	158.008	144.576	145.048	167.138	184.278	203.377	230.044	187.147	93.678
Residencial <i>Residential</i>	115.333	131.280	142.035	128.874	129.279	150.064	166.180	184.218	208.631	166.322	79.752
No residencial <i>Non residential</i>	14.497	15.659	15.973	15.702	15.769	17.074	18.098	19.159	21.413	20.825	13.926
Superficie a construir. <i>Surface to build</i>	71.652	80.802	90.703	85.593	85.627	97.087	109.494	117.911	143.901	128.254	66.085
En edificación residencial <i>Residential</i>	58.870	66.586	73.710	67.215	68.807	79.936	90.910	98.506	118.310	102.790	48.205
En edificación no residencial <i>Non residential</i>	12.782	14.216	16.993	18.378	16.820	17.151	18.584	19.405	25.591	25.464	17.880
Viviendas a construir <i>Housings to build</i>	350.431	39.228	440.065	394.682	403.789	471.455	544.578	604.345	737.186	634.098	268.435
Obra de rehabilitación (<i>Rehabilitation Works</i>)											
Edificios a Rehabilitar <i>Buildings to rehabilitate</i>	25.405	25.591	25.727	25.818	27.336	28.392	32.229	33.086	35.856	33.359	34.308
Viviendas creadas en rehabilitación <i>Rehabilitated housings</i>	13.655	12.624	14.147	14.708	13.980	17.029	21.099	20.893	23.128	19.796	16.984
Obras de demolición (<i>Demolition Works</i>)											
Edificios a demoler <i>Building to demolish</i>	9.543	10.794	11.838	11.799	12.718	14.420	18.165	20.997	28.480	26.141	14.573
Viviendas a demoler <i>Housings to demolish</i>	12.638	13.947	12.605	13.969	13.592	15.474	19.041	21.597	29.147	25.244	13.253

Unidades: nº de edificios y viviendas. Superficie: miles de m²

En 2004 la construcción fue el sector más dinámico de la economía española, y fue el segundo mayor de la Unión Europea. Se estima que, en España, más de dos millones y medio de trabajadores estaban relacionados de forma directa con este sector en la actualidad. En los últimos años, el número total de viviendas construidas en España es, de forma global, mayor que en el resto de países de la Unión Europea.

La toma de conciencia sobre la importancia del sector de la construcción en este contexto, ha favorecido un cambio en el marco de los reglamentos y códigos de construcción. En las últimas décadas, se ha realizado un importante esfuerzo para modernizar el enfoque general del entorno construido de España y para incluir las experiencias de otras disciplinas, sectores y regiones más avanzadas en el campo de la arquitectura, conservación y desarrollo.

Durante la segunda mitad del siglo XX los procesos de urbanización y construcción acelerada han dado lugar, en España, a la generación de una gran producción constructiva. Estos grandes procesos de urbanización han creado entornos que dan satisfacción razonable a las necesidades básicas de la mayoría de la población española. Sin embargo, una gran cantidad de estos nuevos edificios construidos no siempre

responden a los parámetros de calidad demandados por los ciudadanos. En la sociedad española como en los países vecinos, existe una tendencia creciente en la demanda de mayor calidad en los edificios y espacios urbanos. Esta tendencia responde, probablemente, a una evolución en la forma de entender el confort y la calidad de vida en relación con el entorno en que habitamos. Este deseo de alcanzar mayor bienestar personal y social da lugar a una exigencia imperiosa por parte de la sociedad de construir edificios y ciudades más respetuosas con el medioambiente.

Con el objeto manifiesto de mejorar la calidad de la edificación, y promover la innovación y la sostenibilidad, el Gobierno de España aprobó en 2006 el “Código Técnico de la Edificación” (CTE). Se trata de un instrumento normativo que establece los requisitos básicos de calidad de los edificios y sus instalaciones. El objeto de esta legislación es satisfacer determinadas exigencias básicas relacionadas con la seguridad de los edificios y el bienestar de las personas. Este código se refiere tanto a la seguridad estructural y la protección contra incendios, como el saneamiento, la protección contra el ruido, la eficiencia energética y la accesibilidad para las personas con movilidad reducida. Según se indica en el propio texto, esta nueva ley tiene por objeto contribuir al desarrollo de políticas gubernamentales en materia de sostenibilidad, en particular el “Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia”. Según se indica en el RD 314/2006, por el que se aprueba el CTE, ese código *“da cumplimiento a los requisitos básicos de la edificación establecidos en la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad, la sostenibilidad de la edificación y la protección del medioambiente”*.

Con la aprobación del CTE se pretende mejorar y modernizar el marco legal precedente en España, regulado por las “Normas Básicas de la Edificación”, que establecía las disposiciones obligatorias en el diseño y ejecución de los edificios. Estas normas básicas fueron aprobadas a partir de 1979 pero no llegaron a construir un conjunto normativo estructurado similar a los existentes en otros países avanzados. El CTE plantea un enfoque orientado hacia exigencias básicas, en consonancia con el adoptado en el ámbito de la Unión Europea.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, el CTE tiene una especial repercusión en los siguientes aspectos:

- Ahorro de energía. Trata de conseguir el uso racional de energía en edificios, reduciendo su consumo dentro de límites sostenibles. Por otro lado, se asegura que parte de esta energía proceda de fuentes renovables.
- Trata de reducir a niveles aceptables el riesgo de molestias o enfermedades para los usuarios que ocupan el edificio y el deterioro del mismo y de su entorno como resultado de las características de su diseño, construcción, uso y mantenimiento.

- Protección contra el ruido. Trata de reducir el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido puede causar a los usuarios como consecuencia del diseño, construcción, uso y mantenimiento del edificio.

Otro reglamento importante en relación a la regulación del sector es la “Instrucción de hormigón estructural EHE”. Este importante reglamento constituye el marco normativo en el que se establecen los requisitos que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural, y proporciona los procedimientos para demostrar su cumplimiento son suficientes garantías técnicas. La edición de 2008 de este reglamento incluye algunos criterios de sostenibilidad en el diseño y construcción de las estructuras de los edificios, el uso del hormigón reciclado, el uso de subproductos como componentes de hormigones y el establecimiento de una tasa de contribución a la sostenibilidad.

Como regulaciones ambientales específicas se puede destacar la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Es una importante herramienta para la preservación de los recursos naturales y la protección del medioambiente. La aplicación de esta metodología de análisis en el campo de la degradación del medioambiente, proporcionando una mayor fiabilidad y confianza en la toma de decisiones.

En este contexto, la “Ley de Evaluación del Impacto Ambiental de proyectos (RDL 1/2008)” fue desarrollada con el objeto de integrar y actualizar la normativa española en este campo. De acuerdo a esta ley, la evaluación del impacto ambiental identificará, describirá y evaluará de forma apropiada, en función de cada caso particular y de conformidad con esta ley, los efectos directos e indirectos de un proyecto sobre los siguientes factores:

- El ser humano, la fauna y la flora.
- El suelo, el agua, el aire, el clima y el paisaje.
- Los bienes materiales y el patrimonio cultural.
- la interacción entre los factores mencionados anteriormente.

Por último, la Directiva 93/76/CEE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, que se centra en la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética, obliga a los Estados miembros de la Unión Europea a establecer e implementar programas para la certificación energética de los edificios. La certificación energética de los edificios, que no es más que la descripción de las características energéticas de estos, proporcionan a los usuarios información sobre la optimización del rendimiento energético de un determinado edificio durante su vida útil. Además de las limitaciones de las emisiones de dióxido de carbono, la certificación energética tiene el objeto de preservar la calidad del medioambiente, garantizar una utilización prudente y racional de los recursos naturales y el de promover una mayor transparencia en el mercado de la vivienda fomentando la inversión en el ahorro de

energía mediante el suministro de información sobre el rendimiento energético de los edificios.

Junto a las actuaciones de carácter obligatorio, ya mencionadas anteriormente, el gobierno español ha promovido desde la Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo otras actuaciones no reglamentarias, destacándose entre otras las siguientes:

5. La Guía de la Edificación Sostenible. Es una publicación basada en los trabajos del proyecto HIADES del Instituto Ildefons Cerdà de Barcelona, y que ha sido editada por la Dirección General de la vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo y por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
6. Grupo de trabajo EU WG 4 sobre Construcción Sostenible e incorporación al grupo de Trabajo “Whole Life Cost-WLC” creado por la Unión Europea.

En las últimas décadas, España ha experimentado varios cambios importantes en relación con las normas, códigos y leyes que regulan el sector de la construcción. El desarrollo de la “Ley de ordenación de la Edificación”, el “Texto refundido de la Ley del Suelo” y el “Código Técnico de la Edificación” están teniendo una gran influencia en la forma de diseñar, construir, rehabilitar y gestionar los edificios. Un parte muy significativa de estos cambios está en el deseo de integrarnos en el marco global de la Unión Europea y, de esta forma, lograr un nivel de calidad equivalente al alcanzado por los países europeos más avanzados.

La tradicional regularización del suelo contrasta con la falta de una configuración legal en el proceso de construcción de edificios, básicamente establecida a través del “Código Civil” y de una variedad de normas cuyo conjunto contenía serias lagunas en la ordenación del complejo proceso de la edificación, tanto respecto a la identificación, obligaciones y responsabilidades de los agentes intervinientes en el mismo, como en lo que se refiere a las garantías para proteger al usuario. Como respuesta, la ley “Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE)” se adoptó con el objetivo de regularizar el proceso de construcción, de actualizar y completar la configuración legal de los agentes implicados y de definir sus obligaciones y responsabilidad basándose en una definición de los requisitos básicos que deben cumplir.

La aprobación en 2006 del Código Técnico de la Edificación supone la superación y modernización del anterior marco normativo de la edificación en España. El código supone la mayor reforma normativa en edificación de los últimos 30 años. De una forma general, la llegada del Código y sus Documentos Básicos (DB) ha sido muy bien acogida en casi todos los sectores afectados. La configuración de un entorno más

flexible, por su enfoque basado en prestaciones, permite la evolución de la técnica y una actualización a la demanda de la sociedad.

Con el CTE, y principalmente del DB-HE (documento básico de ahorro de energía), se introdujo una nueva estrategia sobre el consumo energético de la edificación. La necesidad de regulación del sector sobre el consumo de energía era tan evidente como también urgente.

Con el DB-HE se pretende disminuir casi un 17% la demanda energética de las viviendas, con un coste añadido de entre un 1 y 2%. Los plazos de recuperación de la inversión añadida son cortos (4 ó 5 años de media) en comparación con la vida útil de la vivienda.

Es importante constatar que el código, incluyendo el DB-HE, trae una positiva evolución para el sector de la edificación, cuando lo comparamos con el marco de referencia que lo antecedió. Pero cuando consideramos las demandas y las necesidades actuales de la sociedad acerca de la sostenibilidad, sobre los impactos asociados a los edificios, se verifica que el CTE aborda casi exclusivamente los consumos directos asociados al edificio, es decir, los consumos que son consecuencia del uso diario. No están contemplados los consumos indirectos, es decir, la energía consumida en los procesos de producción de los materiales que suele ser “olvidada”, y que en ocasiones es tan o más importante que los consumos directos.

Aparte del CTE, en 2007 se redacta el RD 47/2007 de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.

2.2. LAS EMISIONES Y LA REGULARIZACIÓN DE RESIDUOS.

La generación y la gestión de los residuos, así como las emisiones de sustancias contaminantes al medioambiente es un grave problema para la sociedad moderna. La negligencia o la gestión inadecuada de las emisiones y los residuos producen impactos significativos, tales como la contaminación del agua, el suelo o el aire, afectando de forma negativa, en la mayoría de los casos a los ecosistemas y la salud humana.

España produce 35 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición al año. Una masa que cubriría 90 campos de fútbol como el Bernabéu o el Nou Camp hasta una altura de 25 metros. El reciclaje de estos residuos puede ser, y en Europa ya lo es, una oportunidad de negocio, pero en España sólo se trata y separa un máximo del 14%. El resto suele acabar en torrenteras y vertederos, muchos de ellos incontrolados, generando serios problemas de contaminación medioambiental.

La Ley de Residuos 10/1998, de 21 de abril define como "residuo" cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de la propia Ley, del cual se poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse.

Al objeto de producir un mayor control sobre la contaminación, en 2002, el estado Español aprobó la Ley 16/2002 "Prevención y Control Integrados de la Contaminación" (PCIC)", que incorpora al Derecho interno español la Directiva Europea 96/61/CE sobre la prevención y control integrados de la contaminación. Esta ley tiene por objeto "evitar, o en su caso, reducir y controlar la contaminación del aire, el agua y el suelo mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control de la contaminación, a fin de lograr un nivel elevado de protección del medioambiente en su conjunto".

El "Plan Nacional Integrado de residuos 2007-2015 (PNIR)" se pone en marcha con el fin de identificar objetivos y su finalidad es la de promover una política adecuada en la gestión de los residuos, disminuyendo su generación e impulsando un correcto tratamiento de los mismos: prevención, reutilización, reciclaje, valorización y eliminación.

Cabe destacar por un lado, que unos de los objetivos del PNIR es el cumplimiento de las medidas incluidas para reducir los gases de efecto invernadero y, por otro, que este Plan Nacional forma parte de las Líneas Estratégicas de Cambio Climático de España.

En relación con el sector de la construcción, se ha producido un aumento considerable de producción de residuos generados tanto durante la construcción de nuevos edificios como en la demolición, rehabilitación y reforma de los existentes. Estos residuos pertenecen a la categoría clasificada por la normativa en vigor como "residuos de construcción y demoliciones (RCDs).

El problema ambiental que plantean estos residuos se deriva no solo por su volumen, sino por su tratamiento, que todavía hoy no es satisfactorio en la mayor parte de los casos. A la insuficiente prevención en la generación de residuos en origen se une el escaso reciclado de los que se generan. Es por ello que en 2008 es aprobado el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. Al igual que el PNIR, este Decreto tiene como objetivos fomentar la prevención, la reutilización y el reciclado y otras formas de valorización de los residuos de construcción y demolición, asegurando que los destinados a eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción.

La consecuencia más directa de este Decreto en el proceso de diseño y ejecución del edificio son: el requisito de incluir en los proyectos arquitectónicos un Estudio de Gestión de RCDs y la obligación de elaborar un Plan de Gestión de RCDs cuyo

contenido mínimo consiste, básicamente, en la determinación de la naturaleza y cantidad de los residuos a generar en el proceso de construcción y la obligación en determinados casos de separación de residuos de obra.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) proceden en su mayor parte de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de las obras de nueva planta y de pequeñas obras de reforma de viviendas o urbanizaciones.

Una parte importante de estos residuos se llevan a vertederos, creando de esta forma un gran impacto visual y paisajístico, además de un impacto ecológico negativo al rechazar materiales que con un adecuado tratamiento, podrían ser reciclados.

En España la mayor parte de los residuos de demolición lo forman los residuos producidos en las operaciones de demolición de las estructuras de edificación, que constituyen el 80% según datos del Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid (Figura 2.8).

Figura 2.7 Porcentaje de residuos de construcción y demolición en España
(Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX))

En las siguientes líneas se analizan los residuos más comunes en obra civil:

Residuos de hormigón

Es el material predominante en las cimentaciones y estructuras. Se puede reciclar como árido para hormigón nuevo, un 20% máximo según el EHE, pero para ello, necesita estar limpio de residuos de albañilería así como de maderas, metales y plásticos. También se puede emplear en la modificación del paisaje en el que se

forman zonas ajardinadas o en obras civiles disponiéndose como base de carreteras o relleno de terraplenes. En función del tipo de obra y el uso posterior del residuo, el tratamiento de trituración será diferente.

Por otra parte, el polvo producido en la extracción de piedras puede utilizarse como agregante y conseguir un aspecto pétreo en la fabricación de morteros monocapas, por ejemplo. También se podría reciclar en elementos de hormigón prefabricados, como vigas, pilares, viguetas, paneles, losas alveolares, tuberías o piezas de mobiliario urbano. En última instancia se podrían depositar en cubas junto a otros escombros inertes y llevarlos a un vertedero de tierras y escombros.

Residuos de áridos y piedras naturales

Se originan fundamentalmente en la fabricación de hormigones en obra. Para reducir su consumo se aconseja utilizar hormigón triturado o mezclas bituminosas de firmes recicladas. Se podría reutilizar como material de cobertura y relleno para modificar orografías en la obra donde se generan o en otras colindantes. Como última opción, se dispondrían en contenedores junto con otros residuos inertes similares, como las tierras, para transportarlas y depositarlas en vertederos de obras.

Residuos de piedras, mármoles y pizarras

Las pizarras se encuentran en cubiertas, aplacados y pavimentos. Su reutilización en el caso de las cubiertas es más factible si el sistema de anclaje es mediante ganchos. Se deben reutilizar no obstante, si tienen calidad suficiente o en el proceso de fabricación de piedras artificiales.

Las piedras y mármoles fundamentalmente se encuentran en pavimentos y aplacados. Estos pueden incorporarse a la fabricación de gravas o piedras artificiales. En cualquier caso, como material inerte puede emplearse en rellenos.

Residuos de cerámica

Forma parte como componente principal de productos muy utilizados en las paredes de fachada y particiones interiores, fundamentalmente ladrillos, baldosas, y tejas. Por tanto suponen una fracción de los residuos de construcción y demolición (RCD) considerable. Si no es viable su reciclado se pueden almacenar como escombros o restos de obra junto a otros RCD inertes (áridos, tierras,...) pudiéndose depositar en vertederos controlados de tierras y escombros.

Si son de gres, este también puede ser reciclado, aunque el proceso es más complicado dada su diversidad y su pequeña cantidad. Así, en última instancia, se puede utilizar como material de relleno o de almacenamiento en vertederos de escombros

controlados. Los residuos de porcelana, se pueden emplear como relleno de obras y carreteras o para la fabricación de hormigón reciclado previo triturado.

Residuos de P.V.C.

Se originan en la instalación de tuberías, láminas de impermeabilización de cubiertas y carpinterías. En general, se ha de almacenar en contenedores especiales para su traslado a gestores autorizados. Su reciclado es dificultoso, y normalmente se destina a la fabricación de revestimientos de suelos de industrias y garajes y para proteger el cableado eléctrico.

Residuos de caucho

En el sector de la construcción no se suele generar este residuo, salvo en algunos productos sellantes, como material de impermeabilización (láminas de EPDM etc) como pavimentos ligeros, etc.). Se pueden recuperar en plantas de reciclaje como neumáticos, parachoques de automóviles, aislantes del calor y del ruido, etc. Fundamentalmente suelen proceder del proceso de fabricación de firmes de carreteras.

Residuos de madera

Principalmente proceden de actividades de encofrado, embalaje y transporte de materiales (palés) o restos de carpinterías deterioradas.

En el caso de que lleven algún tratamiento químico han de gestionarse como un residuo especial. Se han de eliminar los elementos metálicos (puntillas principalmente) y es conveniente rechazar las infectadas por insectos para garantizar la calidad del residuo. Tiene diferentes posibilidades de valorización, desde la reutilización, hasta el aprovechamiento energético por combustión controlada.

En el caso más concreto de un edificio, en la siguiente figura se ve claramente el peso de los residuos representan:

Figura 2.8. Porcentajes de emisión de residuos en el ciclo de vida de un edificio
(Fuente: CEDEX)

2.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BÁSICAS E IMPORTANCIA DEL USO SOSTENIBLE DE LOS MATERIALES

Una base muy importante del desarrollo sostenible son los materiales con los que se realizan las construcciones. Se consideran materiales de construcción sostenibles a aquellos que sean duraderos y que necesiten un escaso mantenimiento, que puedan reutilizarse, reciclarse o recuperarse.

El 40% de los materiales utilizados en la Unión Europea está destinado a la construcción y mantenimiento de edificios.

A lo largo de los últimos años hemos pasado por cambios fundamentales en el desarrollo de la obtención de los materiales, ya que tiempo atrás las poblaciones rurales los conseguían en las proximidades con un bajo impacto sobre el territorio. Luego, con medios de extracción y elaboración más poderosos y eficaces, y medios de transporte más accesibles, la producción de materiales devino en una actividad de alto impacto.

A diferencia del planeamiento, el diseño y la construcción de los edificios, que se circunscribe a un grupo de técnicos, el tema de los materiales está más al alcance de cualquier persona (reformas, mantenimiento, etc.)

Para considerar un material sostenible, hay que tener en cuenta unas pautas:

- Que tengan larga duración
- Que puedan ajustarse a un determinado modelo

- Que provengan de una justa producción
- Que tengan un precio accesible
- Que sean valorizables
- Que sean no contaminantes
- Que consuman poca energía en su ciclo de vida
- Que en su entorno tengan valor cultural
- Que provengan de fuentes abundantes y renovables
- Que posean un porcentaje de material reciclado.
- Que no utilicen materiales de aislamiento que contenga CFC.

Hay 6 puntos en los que podemos focalizar el impacto que causan los materiales sobre el medioambiente:

- Vida útil

Cuanto mayor es su vida útil menos necesaria es su reposición y por tanto hay un menor uso de la materia prima.

- Consumo de energía

Utilizar materiales de bajo consumo energético en todo su ciclo de vida, es uno de los mejores indicadores de sostenibilidad. Los materiales pétreos como la tierra, la grava o la arena, y otros como la madera, presentan el mejor comportamiento energético, y los plásticos y los metales (sobre todo el aluminio) el más negativo.

Los plásticos y los metales consumen mucha energía en el proceso de fabricación; sin embargo, los plásticos son muy aislantes y los metales, muy resistentes.

- Consumo de recursos naturales

El consumo a gran escala de ciertos materiales puede llevar a su desaparición. Es importante el uso de materiales que provengan de recursos renovables y abundantes, como la madera.

- Impacto sobre los ecosistemas

El uso de materiales cuyos recursos no provengan de ecosistemas sensibles, es otro punto a tener en cuenta. Como la bauxita que proviene de las selvas tropicales para fabricar el aluminio o las maderas tropicales sin garantías de su origen.

- Emisiones que generan

La capa de ozono se redujo, entre otras razones, por la emisión de los clorofluorocarbonos (CFC).

El PVC, debido a sus emisiones de furanos y dioxinas, tan contaminantes, van siendo prohibidos en cada vez más usos, como el suministro de agua para consumo humano.

- Comportamiento como residuo

Al concluir su vida útil, los materiales pueden causar graves problemas ambientales. El impacto será menor o mayor según su destino (reciclaje, incineración, reutilización directa). El uso posterior de vigas de madera, antiguas tejas cerámicas o material metálico para chatarra es muy apreciable.

2.3.1 El sistema de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) para la sostenibilidad de materiales.

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), en inglés, Environmental Product Declaration (EPD), son herramientas para mejorar el comportamiento ambiental de productos y servicios a través de una información fiable y verificable. Estos documentos, definidos en las normas ISO 14020, 14025 y 15804, son un sistema de eco-etiquetado de EPD de la construcción en España siguiendo las Directrices Europeas. Existen diversas categorías en función del tipo de verificación y control que se hace sobre el análisis del ciclo de vida de un material.

En abril de 2011 entró en vigor, parcialmente, el Reglamento 305/2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción, introduciendo como requisito básico la “utilización sostenible de los recursos naturales”. El resto del Reglamento ha entrado en vigor en julio 2013.

Las DAP, aportan información cuantitativa de los impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Son conocidas como “Eco-etiquetas” tipo III. La información que contiene una DAP se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV) de un material o sistema: consumo energético; agotamiento de recursos; consumo de agua; residuos sólidos; cambio climático; acidificación atmosférica; polución del aire y del agua; destrucción de la capa de ozono; formación de ozono fotoquímico...

Las DAP se fundamentan en diversas directrices ISO y se han ido desarrollando desde el año 2000. En Europa, a partir del mandato de la Comisión Europea para el desarrollo

de normativa en el campo de la sostenibilidad de los trabajos constructivos, se han desarrollado en países como Francia, Alemania, Suecia, Reino Unido, Holanda, Finlandia, Noruega y España. En otros países fuera de la UE como los EUA, Canadá, Japón o Corea.

Las DAPc son las Declaraciones Ambientales de Producto de Construcción y son un instrumento útil para la mejora ambiental en el sector de la construcción y para el cumplimiento de la legislación nacional e internacional.

Existen también las DAPc sectoriales, que muestran los valores medios de un producto con características funcionales similares y son las que se van a aplicar. Éstas resultaran especialmente útiles para el técnico en la primera etapa de un proyecto en la que se requiere conocer el impacto ambiental de un producto tipo sin conocer el modelo ni la marca exacta.

Figura 2.9. Contenido de las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP)

Fuente: Jornada de Declaración Ambiental de Producto 2012

Las DAP son una contribución básica en la utilización de materiales respetuosos con el medioambiente para una construcción sostenible y el principio para el desarrollo de herramientas ambientales centradas en la ingeniería civil:

- Se trata de una forma estandarizada de identificar las cargas ambientales de los productos de construcción.
- Permiten identificar en qué parte de la cadena de producción y suministro de los productos de construcción se producen los principales impactos.
- Dotan al sector de la información ambiental necesaria para poder realizar estudios de el análisis del ciclo de vida (ACV) de las obras de edificación u obra civil.
- Ofrecen información valiosa que ayuda en la toma de decisiones de diseño del proyecto y ejecución de las obras.
- Ayudan a conocer los impactos del edificio o infraestructura durante su ciclo de vida y, a partir de ello, a establecer criterios objetivos de sostenibilidad de la construcción.

Figura 2.10. Ilustración de una DAP tipo

Fuente: Sostenibilidad y Construcción según CEN

2.4. CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 2.18.), el ciclo de vida de un material, producto o construcción se puede clasificar en 5 puntos básicos:

- Extracción de materiales: Consideración por la transformación del medio.
- Producción: Plástico y Metal: Emisiones generales y consumo energético.
- Transporte: Consumo de energía (más alto cuanto de más lejos provenga el material).
- Puesta en obra y mantenimiento: Riesgos sobre la salud de la población y generación de residuos.
- Deconstrucción: Emisiones contaminantes y transformación del medio.

Figura 2.11. Esquema del ciclo de vida de un producto o material

El método del Análisis de Ciclo de Vida (ACV o LCA, por sus siglas en inglés) constituye se originó a finales de la década de los sesenta y principios de la década de los sesenta, debido principalmente a la crisis del petróleo y la escasez de energía, cuando distintas compañías de los Estados Unidos y Europa utilizaron esta herramienta para cuantificar el consumo energético de sus procesos productivos asociados a sus productos.

Aunque inicialmente los estudios de Análisis del Ciclo de Vida integraban principalmente la materia prima y sus desechos debido a su efecto directo en el consumo de energía, a partir de la década de los setenta se empiezan a incorporar nuevos aspectos en el análisis, como el impacto generado en el cambio climático u otras cuestiones ambientales. Durante ésta década y la siguiente se desarrollan procedimientos y se pretende su normalización.

Actualmente el Análisis del Ciclo de Vida un método de valoración de los impactos causados en el medioambiente y la sociedad por un producto, proceso o actividad durante su ciclo de vida completo. En el estudio se integran las diferentes fases que contemplan desde la extracción y adquisición de la materia prima, el transporte, la etapa de producción, el proceso de construcción, el uso, el mantenimiento y la reparación hasta el tratamiento al final de la vida útil, o lo que es lo mismo, utilizando un enfoque “de la cuna a la tumba” (Figura 2.19.).

Figura 2.12. Desarrollo del ciclo de vida de una construcción
(Fuente: Construcción 21)

A lo largo de su ciclo de vida tanto los productos como las estructuras o las edificaciones son responsables en mayor o menor medida de una serie de cambios o impactos sobre el medioambiente. Conocer el tipo y magnitud de estos impactos es el primer paso para poder tomar decisiones para evitarlos y reducirlos. En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología para la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida. Se trata de una metodología flexible que puede aplicarse a todo tipo de sistemas, desde productos o procesos singulares a edificios completos o incluso zonas urbanas.

En el estudio del impacto ambiental se considera flujo de entrada a la energía, el agua y la materia prima, así como flujo de salida a los desechos de material y emisiones ambientales y vertidos. Una vez definido el inventario del sistema, se evalúan los impactos ambientales asociados a cada una de las entradas y salidas. Para valorar los impactos se requiere un proceso de cuantificación, así como una posterior normalización para facilitar interpretación de los mismos. Los resultados obtenidos del estudio del sistema global del proceso pueden ser de gran utilidad de cara a la toma de decisiones, como por ejemplo en la comparación de distintos procesos, la mejora del producto, la planificación estratégica o incluso utilizarse como una herramienta de mejora del marketing (ISO 14040, 2006).

El análisis de ciclo de vida (ACV) se utiliza también para evaluar las cargas ambientales asociadas a la fabricación de un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando los impactos asociados al uso de materia y energía y a los vertidos al entorno. Su objetivo final es determinar el impacto de estos productos, procesos o actividades en el medioambiente para evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental. Sirve para integrar en un solo valor procesos complejos de producción de manera que sea posible su comparación con otros procesos similares y el seguimiento de los indicadores que lo definen. No obstante, en el caso de edificación, aún no es posible completar el cálculo de un ACV de un edificio, porque depende de numerosos factores de los que no se dispone suficiente información hasta el momento.

El uso de esta metodología ha aumentado en las últimas décadas, sobre todo por parte de empresas y compañías del sector industrial. No obstante, continúa existiendo una falta de consenso internacional o estandarización en las valoraciones ambientales y los análisis del ciclo de vida prestan unos resultados variables y difíciles de comparar (Jensen, 1996).

Una de las organizaciones que más ha influido en el desarrollo de una metodología unificada es la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, por sus siglas en inglés “Society of Environmental Toxicology and Chemistry”) fundada en el año 1979.

Finalmente en el año 1997 la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) publica la familia de normas ISO 14000 para la gestión ambiental. Las normas incluyen guías, herramientas y metodologías destinadas principalmente al uso por compañías y organizaciones con el objetivo de que puedan identificar, controlar y mejorar su impacto ambiental. Entre ellas se incluye la ISO 14040, con su segunda edición publicada en 2006, que presenta los principios generales y estructura de un estudio de Evaluación del Ciclo de Vida, constituyendo la normativa vigente actualmente. Esta norma no incluye especificaciones ni recomendaciones para definir las técnicas a utilizar en cada fase del estudio de un ACV, por lo que se define únicamente como una herramienta de guía sin considerar aspectos concretos restrictivos usuales en una norma. Actualmente se están desarrollando en los Comités normas complementarias que incluyan ejemplos prácticos de aplicación y documentación base para el desarrollo de un ACV.

La metodología adoptada por la ISO 14040, basada en la publicada anteriormente por SETAC, establece cuatro fases fundamentales y obligatorias para desarrollar un estudio de ACV: fase de definición del objetivo y alcance, fase de análisis del inventario, fase de evaluación del impacto ambiental y finalmente la fase de interpretación (Figura 2.13.).

Figura 2.13. Estructura del análisis del ciclo de vida

La metodología general del ACV consta de cuatro fases, aunque no existe un único método para su realización:

- 1) *Objetivos y alcance*: El primer paso para desarrollar un ACV es la definición del objetivo y alcance del estudio. En esta fase se describe la unidad funcional del sistema. Dado que el desarrollo y el alcance del estudio se orientarán hacia el objetivo, la norma exige una definición precisa del mismo que garantice una coherencia en el método y los resultados..

El alcance del ACV debe incluir la definición del sistema del producto estudiado, así como sus limitaciones. Se definirán en este punto los procesos de los materiales, o productos implicados así como los sistemas y sub-sistemas consideradas en la valoración. Las unidades funcionales, tanto de flujos de entrada como de salida, también deben indicarse en este apartado introductorio del ACV y se definirán en base a fenómenos físicos o funcionales. Dentro de las unidades físicas se incluyen las utilizadas para caracterizar propiedades del producto valorado, mientras que las unidades funcionales informan de la cantidad requerida para alcanzar un objetivo concreto, como por ejemplo las unidades para asegurar un buen comportamiento del producto durante una vida útil de 100 años. Esta información proporcionará la posibilidad de comparar o analizar distintos ACV y sus resultados, siempre y cuando compartan una base común en cuanto a las unidades utilizadas.

Dentro de la definición del alcance es preciso detallar la información sobre los límites del sistema analizado, incluyendo las suposiciones introducidas, las limitaciones que impiden analizar ciertas fases del proceso o las exclusiones consideradas y los motivos que han inducido a ello. La técnica de ACV es interactiva, puesto que a medida que se recopilan los datos e información necesaria para definir el sistema a analizar es posible que se deban modificar

los límites del mismo, con el fin de no desviarse del objetivo inicial del estudio y alcanzarlo de la manera más fidedigna posible.

- 2) *Análisis de inventario*: Esta fase comprende la obtención de datos sobre los materiales y flujos de energía y los procesos de cálculo, con el fin de identificar y cuantificar los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional.

Resulta una fase compleja dentro del método de análisis, donde a través de un proceso iterativo, se define el inventario de las entradas y las salidas de un sistema. A medida que se recopilan los datos, se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones que impliquen cambios en las consideraciones de introducción de los mismos de manera que se permita alcanzar los objetivos del estudio (ISO14040).

El procedimiento se inicia con la recopilación de datos sobre las entradas de energía, de materia prima, entradas auxiliares u otras entradas físicas, que pueden incorporar también productos o co-productos y residuos, y que comportan las salidas de emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, energías consumidas y otros aspectos ambientales. Seguidamente se procede con la cuantificación de cada uno de estos valores para cada proceso unitario, unidad funcional del sistema estudiado y etapa en la que se consume.

Existen diferentes bases de datos disponibles que presentan variaciones en el consumo de materias primas de un mismo producto, proceso o tecnología valorada, como por ejemplo los diferentes consumos de energía en base a la tecnología de los motores utilizada. Tampoco existe un consenso oficial por parte de los órganos competentes que regularice los valores a considerar o proporcione bases de datos de inventario unificadas en base a los parámetros variables de cada país o emplazamiento.

- 3) *Evaluación de impactos de ciclo de vida*: en esta etapa se lleva a cabo la clasificación, caracterización y evaluación de los resultados del inventario, relacionándolos con efectos ambientales observables a través de un conjunto de categorías de impactos seleccionadas. En la siguiente tabla (Tabla 2.xx.) se pueden ver varias categorías de impactos.

Tabla 2.4. Grupo de categorías de impacto

Fuente: Guineé et al., 2001

GRUPO A - Categorías de impacto básicas	GRUPO B - Categorías de impacto específicas del estudio	GRUPO C - Otras categorías de impacto
Agotamiento de recursos abióticos	Uso del suelo - pérdida de funciones de soporte a la vida	Agotamiento de los recursos bióticos
Uso del suelo - competitividad en el suelo	Uso del suelo - pérdida de biodiversidad	Desección
Cambio climático	Eco-toxicidad de sedimentos en agua fresca	Agua maloliente
Agotamiento del ozono estratosférico	Eco-toxicidad de sedimentos marinos	Etc.
Toxicidad humana	Radiación Iónica	
Eco-toxicidad acuática de agua fresca	Aire maloliente	
Eco-toxicidad acuática marina	Ruido	
Eco-toxicidad terrestre	Calor residual	
Formación foto-oxidantes	Damnificados	
Acidificación		
Eutrofización		

Todas las entradas y salidas del inventario de ciclo de vida deben clasificarse en diferentes categorías de impacto, de acuerdo con el tipo de impacto que pueden tener en el medioambiente. A continuación, la caracterización de los resultados consiste en que, para cada categoría de impacto, se evalúa la relevancia de las distintas entradas o salidas mediante el uso de factores de caracterización que representan la cantidad de ese compuesto que, de ser emitido, tendría un efecto en el medioambiente cuantitativamente comparable a una unidad base de la categoría de impacto (por ejemplo, 1 kg de CH₄ tiene el mismo efecto de calentamiento global que 23 kg de CO₂). Así, multiplicando cada una de las entradas y salidas del inventario por el factor de caracterización correspondiente, se calcula su contribución relativa a la categoría de impacto en relación a un determinado compuesto al que se le da el valor de referencia "1" (por ejemplo, el CO₂ en el caso de la categoría de impacto sobre calentamiento global).

Una vez clasificados y caracterizados, los resultados pueden ser también normalizados y/o ponderados. La normalización pretende facilitar la interpretación de los resultados al usuario final, presentándole una indicación de la importancia relativa del impacto medioambiental causado por el sistema en estudio en relación a una determinada área geográfica. Por último, los indicadores normalizados se pueden multiplicar por factores de ponderación y después sumar los resultados parciales para producir un único indicador de impacto ambiental global. La ponderación es sin duda el paso más arbitrario de todo el proceso de evaluación de impactos ya que la selección de los factores

de ponderación es, en gran medida, una decisión política con limitada relevancia científica (o ninguna, según ISO 14044).

Tabla 2.5. Categorías de impacto básicos y su indicador

Fuente: SAIC, 2006

Categoría de impacto	Escala	Ejemplo de datos del ICV	Indicador
Agotamiento abiótico	Global	Cantidad de minerales utilizados Cantidad de combustibles fósiles utilizados	Potencial de agotamiento abiótico (ADP)
Cambio climático	Global	Dióxido de Carbono Dióxido de nitrógeno Metano	Potencial de calentamiento global (GWP)
Acidificación	Local	Óxidos sulfúricos Óxidos nitrosos Amonio	Potencial de Acidificación (AP)
Eutrofización	Local	Fosfato Óxido de Nitrógeno Dióxido de Nitrógeno Nitratos Amonio	Potencial de Eutrofización (EP)
Formación foto-oxidante	Local	Hidrocarburo no metano	Potencial de Creación Foto-Oxidante (POCP)
Agotamiento de Ozono Estratosférico	Global	Clorofluorocarbonos Hidroclorofluorocarbonos	Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP)

Seguidamente se calcula el indicador de categoría de impacto en base a factores de caracterización. Estos factores se utilizan como coeficientes multiplicadores para cada flujo de inventario otorgándole la importancia relativa en base a la categoría de impacto estudiada (García, 2011), ofreciendo así el resultado del impacto ambiental del proceso estudiado. Los valores de los factores de caracterización se encuentran disponibles a modo de Tablas o integrados en los programas de cálculo actuales que desarrollan ACV. (Tabla 2.xx.).

La norma ISO 14040 incluye en su guía la información al respecto de incorporar en el ACV la fase de normalización y ponderación de los resultados, tal y como se detalla en la Figura 2.22.

Esta valoración de los impactos que genera cualquier producto nos permite analizar la interrelación del sistema con su entorno valorando las entradas y salidas, y centrándonos no solo en la parte económica, sino incluyendo un alcance ambiental y social. Tanto la valoración económica como ambiental utilizan este enfoque en su análisis, mientras que los aspectos socio-culturales son de naturaleza más difusa y en consecuencia más difíciles tener en consideración (Gervásio y da Silva, 2008).

Figura 2.14. Elementos de la EICV y principales características de acuerdo a ISO 14040, (2006)
Fuente: Bengtsson y Howard (2010).

- 4) Interpretación: los resultados de las fases precedentes son analizados conjuntamente, en consonancia con los objetivos del estudio, con objeto de establecer las conclusiones y recomendaciones finales. Debería incluir la identificación de los asuntos significativos, su evaluación y la presentación de conclusiones y recomendaciones. La interpretación debería también incluir un análisis de sensibilidad de los principales resultados obtenidos e incorporar recomendaciones de mejora. Finalmente, la revisión crítica es otro elemento opcional del ACV mediante la cual revisores internos o externos que no han participado en el estudio examinan las suposiciones adoptadas, los datos que las complementan y su integridad metodológica.

Como ya se ha dicho anteriormente, la metodología general de ACV está totalmente estandarizada en las normas UNE 150041:1998 EX, UNE-EN ISO 14040: 2006 y UNE-EN ISO 14044: 2006.

El estándar metodológico para las edificaciones está actualmente siendo desarrollado por el Comité Técnico 350 del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 350) y proporcionará un método de cálculo basado en el ACV que permita evaluar el comportamiento ambiental de un edificio de una forma normalizada. Este método contempla las siguientes etapas del ciclo de vida de un edificio:

- Producción del edificio (materias primas, transporte, fabricación).
- Construcción del edificio (transporte, procesos in situ de construcción).
- Uso del edificio (mantenimiento, reparación y reemplazo, rehabilitación, consumo de energía, consumo de agua).
- Disposición final del edificio (deconstrucción, transporte, reciclado, reutilización, disposición final en vertedero, incineración).

Figura 2.15. Impactos ambientales en la transformación de las materias primas

Desarrollar un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de productos complejos, como son las soluciones constructivas y los edificios, implica la recogida de una gran cantidad de datos cuantitativos para cada una de las etapas del ciclo de vida. Son muchos los procesos a tener en cuenta, desde la extracción de mineral de hierro, al transporte de madera, el consumo de diesel durante la instalación o de electricidad durante el uso, el vertido de residuos, etc. Según el alcance del estudio en cuestión, fácilmente se puede llegar a centenares de productos o procesos a inventariar y esto

incrementa la dificultad y la necesidad de invertir recursos para poder completar el estudio de ACV.

Para facilitar esta tarea, diferentes organizaciones y empresas han desarrollado bases de datos con información de inventario de ciclo de vida en las últimas décadas. Algunas de estas bases de datos son de uso gratuito (como la ELCD), aunque la gran mayoría están sujetas a una licencia comercial (como Ecoinvent, GaBi, IVAM, etc.). Todas ellas recogen información sobre las entradas y salidas de diferentes procesos, aunque difieren en el tipo de producto y proceso para el cuál ofrecen información y también en el nivel de agregación de la información mostrada.

A medida que crece el número de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) publicadas, de las que se hablará de manera más extensa en el punto siguiente, y que se extienden a nuevas tipologías de productos y procesos constructivos, se incrementa la posibilidad de que puedan convertirse en una alternativa a estas bases de datos. A diferencia de las bases de datos comentadas, las DAP contienen información cuantitativa a nivel de impacto ambiental del producto. Programas informáticos como Elodie (de la empresa CSTB), EcoCalculator (Athena Institute) o Bees (de la empresa Nist), software de gestión para el ACV de edificios, se alimentan directamente de DAP para desarrollar dichos estudios.

En cualquier caso, el uso de bases de datos permite desarrollar una parte del inventario de ciclo de vida del estudio de ACV, pero siempre se necesitará recopilar datos específicos de proveedores. Para ello, es recomendable el uso de cuestionarios que faciliten la toma y documentación de los datos.

2.4.1 Análisis del ciclo de vida del hormigón

El ciclo de vida del hormigón empieza con la extracción de materiales para la fabricación del cemento, el componente clave de la mezcla. La fabricación del cemento es una actividad industrial de procesamiento de minerales que se divide en tres etapas básicas:

- Obtención y preparación de materias primas
- Molienda y cocción de materias primas
- Molienda de cemento
- Transporte

Obtención y preparación de materias primas.

Áridos

Los áridos son materiales granulares inertes de naturaleza inorgánica, tamaño de 0 a 100 mm y de procedencia natural o artificial. Los áridos se consideran un componente inerte, no por su falta de colaboración a las propiedades del hormigón, sino porque si se han seleccionado correctamente, serán inertes desde el punto de vista químico, al contrario del cemento que basa sus propiedades en la reacción química de hidratación.

La explotación de áridos se realiza casi siempre a cielo abierto en canteras o graveras. Las primeras proporcionan materiales extraídos de un macizo rocoso, mientras que las graveras se nutren de áridos naturales acumulados en depósitos de gravas y arenas. El proceso de producción difiere esencialmente en la obtención del material primario.

Figura 2.16. Voladura en frente

Figura 2.17. Martillo hidráulico

En las graveras se aplican sistemas de arranque directo y carga, útiles para materiales no consolidados, con variaciones según la explotación sea seca, bajo lámina de agua o con rebaje del nivel freático. En vía seca se emplean excavadoras, bulldozers y palas cargadoras, mientras que en vía húmeda se usan dragalinas con cable desde la orilla, retroexcavadoras, o dragas desde el agua para profundidades mayores.

En las canteras se emplean técnicas de perforación y voladura destinadas a fragmentar la roca y obtener así un material transportable a la planta de tratamiento. En ocasiones puede ser necesario reducir el volumen y la masa de los fragmentos mediante un martillo hidráulico.

Las fases que tienen lugar durante el todo el proceso de obtención de áridos para el hormigón son, una vez vistos los tipos de explotación, la extracción, el tratamiento del material, las operaciones auxiliares y la restauración de los terrenos, con los

subprocesos que aparecen en la figura 2.28. En ella se detallan, además, los aportes que requiere cada proceso, así como los distintos tipos de contaminación ambiental que pueden producir y, tras la última fase, los impactos favorables que deben alcanzarse.

Figura 2.18. Proceso de una explotación de árido con detalle de los recursos consumidos

Aditivos

Los aditivos químicos son componentes habituales de los hormigones y cementos actuales, cuando no esenciales como es el caso del hormigón de alta resistencia o el hormigón autocompactante y, en general, de los hormigones de altas prestaciones. De hecho, el desarrollo de estos hormigones fue posible gracias al desarrollo de nuevos y más eficientes aditivos químicos. Cabe destacar que la práctica totalidad del hormigón producido en Europa actualmente lleva, al menos un tipo de aditivo químico. Esto se debe a las claras ventajas técnicas y económicas que aportan ya que, hoy en día, es

inconcebible la producción de hormigones de calidad sin el empleo de aditivos químicos.

El proceso de producción de los aditivos químicos para hormigón se ha sometido a un estudio medioambiental que ha permitido elaborar las diferentes Declaraciones Medioambientales de Producto que cubren aproximadamente el 80% de la producción de aditivos en la Unión Europea.

En la tabla 2.6. se muestran los tipos de aditivos para los que la European Federation of Concrete Admixture Associations (EFCA) ha elaborado declaraciones medioambientales de producto (Environmental Product Declaration, EPDs), incluyendo la composición química básica y el rango de materia activa que se ha considerado en las mismas, así como el porcentaje (%) de ventas del total de aditivos vendidos en Europa en 2006.

Tabla 2.6. Aditivos con etiquetado DAPs

Tipo de aditivo	Composición química	% de ventas	Materia activa, %
Plastificantes	Lignosulfonatos	40	30-45
Superplastificantes	Polímeros orgánicos sintéticos solubles en agua (naftaleno sulfonado; melamina sulfonada; polímeros vinílicos, éteres policarboxílicos)	38	20-45
Retardadores	Soluciones de fosfatos, fosfonatos, sacarosa, gluconato, polisacáridos	1,5	17-46
Aceleradores	Sales sódicas o cálcicas de cloruro o nitrato	4	35-50
Inclusores de aire	Surfactantes sintéticos aniónicos o no-iónicos	5	3-14
Hidrófugos de masa	Sales de ácido oléico, esteárico, caprílico y otros ácidos grasos	2	10-43

Los aditivos, tales como plastificantes, superfluidificantes y retardantes, estos suelen aditivarse en planta, mientras que los acelerantes y pigmentos de color se suelen aplicar en el camión cuba. En estos últimos casos se debe de verificar escrupulosamente el cumplimiento de las condiciones de amasado.

Los pigmentos de color empleados actualmente se hallan muy estudiados y presentan excelentes prestaciones, haciendo en ocasiones incluso innecesario recurrir a cementos o áridos blancos para obtener el color deseado. Por último, existen otros productos que se emplean con mayor o menor frecuencia: pinturas de acabado, pinturas translúcidas anti-graffiti, morteros de reparación, etc. En todo caso, el criterio de gestión de residuos a aplicar viene definido en la legislación vigente y se incorpora

al Plan de Gestión Medioambiental, y desde hace poco al Plan de Gestión de Residuos en Obra.

Debido a su origen orgánico, los aditivos químicos tienen un alto contenido de CO₂ embebido, siendo, en el caso de los plastificantes y superplastificantes, de 220 y 720 kg/tonelada, respectivamente. Sin embargo, la cantidad de aditivo químico empleada en el hormigón es muy pequeña y rara vez sobrepasa el 0,6% (en materia activa) por peso de cemento. Por ello, el aumento directo que provocan en el impacto medioambiental global del hormigón/cemento es muy bajo (menor del 1%) y, de acuerdo con la familia de normas ISO 14000 (Gestión medioambiental), su contribución puede ser ignorada.

Cemento

La producción de cemento, se compone de tres procesos principales: la obtención de materias primas, la fabricación del clínker y la molienda de éste con la incorporación de las adiciones y el regulador de fraguado. Las tres fases requieren un consumo intensivo de energía, tanto en forma de energía térmica como en forma de electricidad, así como de recursos naturales (mayoritariamente piedra caliza), cuyas fuentes se consideran sobreabundantes.

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínker.

El clínker se compone de los siguientes óxidos (datos en %):

	Porcentaje %
• Óxido de calcio "cal" (CaO)	60-69
• Óxido de Silicio "sílice"	18-24
• Óxido de Aluminio "alúmina" (Al ₂ O ₃)	4-8
• Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1-8

La obtención de la proporción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida:

- Caliza y marga para el aporte de CaO.
- Arcilla y pizarras para el aporte del resto de óxidos

Las materias primas son transportadas a la fábrica de cemento donde se descargan para su almacenamiento.

Molienda y cocción de materias primas

La finalidad de la molienda es reducir el tamaño de las partículas de materia prima para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada.

La molienda de materias primas (molienda de crudo) se realiza en equipos mecánicos rotatorios, en los que la mezcla dosificada de materias primas es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.

El material obtenido debe ser homogeneizado para garantizar la calidad del clínker y la correcta operación del horno.

Existen diferentes procesos de fabricación del clínker:

- a) Vía Seca
- b) Vía húmeda
- c) Vía semi-seca
- d) Vía semi-húmeda

En la actualidad, en torno al 78 % de la producción de cemento de Europa se realiza en hornos de vía semi-seca o semi-húmeda; y un 6 % de la producción europea se realiza mediante vía húmeda (IECA; 2006)

En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°. Este material es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas obteniéndose de esta forma el clínker. Estas temperaturas permiten las reacciones de los componentes cálcicos y silíceos. El carbonato cálcico (piedra caliza) reacciona para formar óxido de calcio y dióxido de carbono (esto ocurre a unos 900°C) y el óxido de calcio y los silicatos reaccionan para formar di- y tri- silicatos de calcio (a temperaturas entre 900 y 1500°C). Las reacciones que producen aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica ocurren en un grado inferior. La variación en las proporciones de estos cuatro componentes (disilicato cálcico, trisilicato cálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica) determinan las propiedades del cemento resultante.

a) Proceso de vía seca

La materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno.

El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

Este proceso de vía seca está probado como el más eficiente energéticamente, requiriendo hasta un 50% menos de energía que el proceso de vía húmeda (Wilson A.; 1993) (Lyons A.R.; 1997).

b) Proceso de vía húmeda

Este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clinker.

c) y d) Procesos de vía semi-seca y semi-húmeda

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo.

Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20 % de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado.

Molienda de cemento

El proceso de fabricación de cemento termina con la molienda conjunta de clinker, eso y otros materiales denominados "adiciones" con el fin de conferir al hormigón diferentes propiedades.

Los materiales que están normalizados como adiciones, son entre otros:

- Escorias de alto horno
- Humo de sílice
- Puzolanas naturales
- Cenizas volantes
- Caliza

La composición final del cemento dependerá de la resistencia y características adicionales que se quieran conferir al hormigón. La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.

Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser ensacado o cargado a granel. Esta primera parte de la producción de hormigón (la producción del cemento) genera por cada tonelada de cemento una cantidad semejante de dióxido de carbono, según alguna bibliografía 1,25 toneladas (Wilson, A.; 1993) y según otra 1 tonelada (Gjorv, O.E.; 2003). Esto implica que una variación en el porcentaje de cemento usado en el hormigón posiblemente alterará el impacto medioambiental generado.

La evaluación de la sostenibilidad del cemento se ha abordado por primera vez en España en la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 en el Anejo 13, titulado “Índice de Contribución de las Estructuras a la Sostenibilidad (ICES)”. El cemento aparece como uno de los componentes principales del material hormigón y tiene una contribución del 13,4% del total del Índice de Sostenibilidad Medio Ambiental (ISMA), índice a calcular previamente al cálculo del ICES.

Fabricación del hormigón

Cada planta produce diferentes tipos de hormigón los cuales pueden tener un mayor o menor efecto en la cantidad de energía consumida, el tipo de materias primas utilizadas, las emisiones líquidas y gaseosas producidas y los residuos generados. Los principales materiales requeridos para la fabricación del hormigón incluyen los áridos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del hormigón), grava (en aproximadamente un 48 % del hormigón), cemento (en un 12% de la composición del hormigón), agua (en proceso seco alrededor de un 6%), y cenizas volantes. Mientras los dos tipos de agregados consumen la mayor proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión de los otros componentes. (Wilson, A.; 1993).

El hormigón puede ser enviado al lugar de la construcción como prefabricado o realizado in-situ. Si no hay notable diferencia energética entre ambos tipos, el hormigón prefabricado implica menos consumo. Por otro lado, la medida de los bloques de hormigón es limitado debido a los impedimentos del transporte.

Figura 2.19. Sistema de fabricación del hormigón prefabricado.

Flujos de materia del proceso de fabricación del hormigón

Apenas existe bibliografía que desglose y cuantifique las emisiones del hormigón de forma científica. Existen inventarios de ciclo de vida para muchos productos industriales ampliamente utilizados, pero de estos muy pocos corresponden a productos relacionados con la construcción, incluyendo el cemento. Los análisis de inventario comparativos no son factibles a menudo debido a la falta de homogeneidad en el formato y tratamiento de los datos, en la indefinición de los límites del sistema o la falta de claridad sobre los métodos analíticos usados o la validez geográfica (Josa, A.; et al.;2004). En esta situación, ha sido necesaria la adaptación de los datos más formales disponibles. Así pues, la Tabla 2.7. elaborada a partir de (Häkkinen, T.; Vares, S.; 2003) muestra el perfil medioambiental de un hormigón cuya clasificación desconocemos y establece una guía sobre la proporción entre las cantidades involucradas de un material y de otro.

Tabla 2.7. Perfil medioambiental del hormigón
(Fuente: Häkkinen, T.; Vares, S).

La Tabla 2.8. elaborada a partir de (Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998) indica los porcentajes de energía y emisiones más relevantes (CO₂, NO_x y metales pesados) que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón. Los datos porcentuales referentes al cemento contemplan la obtención de materias primas, su transporte y la producción del cemento.

Tabla 2.8. Emisiones y energía en el ciclo de vida del hormigón
(Fuente: Häkkinen, T.; Vares, S).

En la tabla anterior se aprecia claramente que el cemento es el principal contaminante. Éste representa más del 70% de las emisiones y energía usada en la fabricación del hormigón debido a las altas temperaturas necesarias para su producción y para la descomposición del carbonato cálcico. Así pues, la cantidad total de efectos

ambientales producidos por el hormigón depende en gran parte de su contenido de cemento. Dicho contenido se encuentra habitualmente en porcentajes del 10 al 15% en peso. El contenido mínimo de cemento de un hormigón viene determinado por el ambiente de exposición al que se verá sometida la estructura a lo largo de su vida útil. Así pues, y tal como dicta la normativa Española de Hormigón Estructural (EHE-99) en su tabla 37.3.2ª, el mínimo contenido de cemento para un ambiente de, por ejemplo, clase I será de 250Kg/m³ mientras que para un ambiente de clase IV será de 325Kg/m³ (Ministerio de Fomento, 1999).

Los datos sobre la cantidad de emisiones de CO₂ por volumen de hormigón varían de unas fuentes a otras. El rango se encuentra entre 1 y 1.25 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento (Gjorv, O.E.; 2003; Wilson, A.; 1993).

Considerando de forma conservadora emisiones de una tonelada de CO₂ por tonelada de cemento y una densidad del hormigón de 2350Kg/m³ se obtienen las siguientes emisiones de CO₂ por tonelada de hormigón debidas al cemento:

$$\boxed{\text{Clase I}} \quad \frac{250\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 106\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

El cemento representa el 83% de las emisiones de CO₂ por lo que el total de emisiones de CO₂ será de **128gCO₂/Kg hormigón**.

$$\boxed{\text{Clase IV}} \quad \frac{325\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 138\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

En este segundo caso, el total de emisiones de CO₂ será de 166g CO₂/Kg hormigón.

Modificando la Tabla 2.7. a partir de los porcentajes vistos en la Tabla 2.8. y de las emisiones debidas al cemento calculadas anteriormente para cada clase de exposición, obtenemos los resultados sobre el perfil medioambiental que muestra la Tabla 2.9 a continuación.

Tabla 2.9. Perfil ambiental del hormigón para 2 clases diferentes

Elemento		Cantidad/Kg hormigón	
		Clase I	Clase IV
Energía	Fuel fósil y electricidad	1,16 MJ	1,36 MJ
Materias primas	Caliza	≈ 170 g	
	Otros productos minerales	≈ 850 g	
	Agua	≈ 80 g	
Emisiones	Dioxido de carbono (CO ₂)	128 g	166 g
	Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,58 g	0,70 g
	Óxido sulfúrico (SO ₂)	≈ 0,14 g	
	Metano (CH ₄)	≈ 0,13 g	
	Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	≈ 0,18 g	
	Polvo	≈ 0,023 g	
	Metales pesados (Cr, As, Cd, Hg, Tl, Pb)	21 µg	26 µg

Opciones de reciclado del hormigón

España genera anualmente 38,5 millones de toneladas de residuos de la construcción (Cemex, 2006). Se estima que la contribución del hormigón a los residuos de construcción y demolición es del 53% en volumen y del 67% en peso [Wilson, A.; 1993]. Esta enorme contribución los residuos sólidos subraya la necesidad de diseñar estrategias de gestión de residuos y de reciclado.

El hormigón es uno de los materiales más utilizados; sin embargo, existen pocos estudios sobre su reciclaje. Algunos expertos explican que el material pétreo, piedras y arena, que se utiliza para su elaboración es de gran abundancia en los ríos del país; por lo tanto, la necesidad de utilizar los desechos del material no se vislumbra a simple vista. Aún así, las consecuencias de su uso indiscriminado son claras. Si bien hay gran abundancia de áridos, este recurso no es renovable a corto o medio plazo. Por otro lado, su extracción produce impactos ambientales como cambio en el paisaje y en la forma del caudal del río.

La composición o textura del hormigón permite que este sea re-molido con relativa facilidad y preparado para su aplicación en áreas similares. El compuesto es generalmente machucado en áridos para nuevo hormigón o usado como material de relleno en terraplenados. Reutilizar los derribos de la construcción que actualmente se arrojan a vertederos le supondría a España un ahorro anual de 7,7 millones de toneladas de piedras, mitigaría el impacto ambiental que supone extraerlas de

canteras y no tendría ningún efecto en la resistencia de los edificios- El gran puente del Fòrum, construido en el 2004 en Barcelona, fue la primera gran estructura construida con materiales parcialmente reutilizados.

Hoy en día en España sólo se permite el empleo de hormigón reciclado como relleno en sustratos de carreteras. En la actualidad el Ministerio de Fomento está trabajando en la elaboración de normas específicas que regulen la utilización de estos derribos de la construcción tanto en el campo de la vialidad como en la fabricación de hormigones.

Esta normativa sólo permitirá utilizar hasta un máximo de 20% de árido reciclado. El equipo de Enric Vázquez, catedrático de la UPC, ha comprobado que ese porcentaje de material reciclado, e incluso el 30%, no merma ni la dureza ni la resistencia del hormigón (material formado normalmente por una base de áridos a la que se añade grava, cemento y agua).

Para fabricar este hormigón reciclado se utilizarán escombros procedentes de hormigón estructural, triturado y procesado en una planta de reciclaje, y convertidos en un nuevo producto granulado reciclado.

2.5.2. Análisis del ciclo de vida de un puente

Los puentes se diseñan para resistir una vida útil de 100 años y su análisis, sobretodo económico, se determina actualmente en base a los primeros años de la vida de la construcción. Este procedimiento puede inducir a la toma de decisiones incorrectas en cuanto a elección de la alternativa de diseño más eficiente. Del mismo modo, la estructura genera una serie de impactos, según su interrelación con el entorno, que no se tienen en consideración. Una de las metodologías introducidas para solventar este problema es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que valora el diseño del sistema constructivo en base a su impacto económico, ambiental y social durante el ciclo completo de su vida útil.

Del mismo modo que con el hormigón se puede realizar el estudio del ciclo de vida de una estructura más compleja, en nuestro caso de un puente. Para ello se pueden utilizar varias herramientas dependiendo de los parámetros analizados, así cabe destacar herramientas como BatMan (Suecia) que incorporan el ACV y CCV en la definición de la óptima estrategia de gestión y estudios de alternativas de actuación frente a impactos económicos, u otras de mayor sencillez en su funcionamiento, como SGP (España) que únicamente incluye un catálogo de costes de las actuaciones pero no implementa modelos de evaluación ni recopilación de información de costes, mejores o planificaciones en un marco temporal.

H. Sundquist y R. Karoumi – ETSI en 2012 introducen la metodología del análisis de costes de ciclo de vida en base a los costes inducidos de agencia, quien cubre principalmente el diseño, la construcción, el mantenimiento y la disposición final, así como los costes a los usuarios producidos por los retrasos, incomodidades e incremento de riesgos, y finalmente los costes en la sociedad repercutidos por accidentes, impactos ambientales y otros.

Introducen la metodología del cálculo de costes mediante el valor actual neto para comparar costes en distintos periodos de tiempo. En el caso de estudio de puentes, es necesario tener en cuenta que su mayor volumen no se produce únicamente en construcción, sino que existen diversas fases de su ciclo de vida que contemplan un gran peso en el coste total de la infraestructura, tal y como se refleja en la Figura 2.34., (Antonio G, 2010).

Figura 2.20. Representación sistemática de los costes de agencia de un puente. Los costes en esta Figura no están calculados usando el método de valor actual neto.

Fuente: ETSI 2012

El estudio realizado analiza la sensibilidad de los parámetros afectados en el cálculo, como por ejemplo la tasa de interés y la tasa de inflación utilizados para obtener el valor actual neto.

En cuanto a la determinación de las operaciones de mantenimiento, se considera que la vida útil real de un puente no es comparable a la vida útil de cálculo de 40 a 120 años.

Gervásio y Da Silva (2008) introducen un ACV para la cuantificación de los costes típicos a los usuarios (costes sociales) con un enfoque probabilístico y la aplicación del método en un caso de estudio. Se introducen dos tipos de costes: los costes

económicos absorbidos por el propietario de la obra sobre su ciclo de vida y los costes de usuarios que recaen directamente sobre los usuarios del puente. Los costes se evalúan para cualquier actividad en el puente que cause disturbios en el tráfico según las distintas franjas horarias.

Par la aplicación del ACV en puentes ferroviarios, siguiendo los estándares ISO será necesario que sobre el proyecto se realice un análisis del ciclo de vida sostenible que debe integrar, con un enfoque “de la cuna a la tumba”, aspectos ecológicos, económicos y socio-culturales.

En la Figura 2.21. se ilustra su estructura principal y los parámetros a evaluar para cada uno de los impactos que genera un puente mediante los enfoques de análisis de ciclo de vida y análisis de costes de ciclo de vida.

Figura 2.21. Clasificación de problemas para ACV en puentes

Los problemas ambientales generados por el puente se pueden medir mediante un ACV que evalúa el impacto generado en el medioambiente por cada una de las fases de su ciclo de vida. Su desarrollo requiere seguir los pasos que exige la normativa de aplicación ISO 14040 de definición del objetivo y alcance, inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación, aunque en la misma norma no se indican directrices ni recomendaciones para la elección de la metodología.

De cara a valorar el impacto económico de un puente es posible realizar un análisis de costes de ciclo de vida (CCV) que contemple los gastos que genera durante todas las fases de su vida. Para poder valorar costes aplicados en diferentes períodos de tiempo, como por ejemplo los costes de mantenimiento del puente actuando en un tiempo futuro, se requiere calcular inicialmente su valor actual neto. La ecuación (1) se puede aplicar para convertir el coste al valor de presente.

$$LCC_j = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Donde:

C_t corresponde a la suma de todos los costes a valorar ocurridos en el año t , con unidades de €.

r resulta la tasa de descuento real para convertir los costes desde el tiempo t al tiempo 0 y su cálculo de detalla en la ecuación (2) .

T es el número de años contemplados en el estudio.

$$r = \frac{r_L - r_i}{1 + r_i}$$

Donde:

r_L es las tasa de descuento (%) para préstamos de larga duración

r_i es las tasa de inflación (%)

En la elección de alternativas de diseño es frecuente utilizar una comparativa de costes para escoger la opción más rentable, tal y como se esquematiza en la Figura 2.35. Sin embargo, en el caso de puentes, la consideración del coste más efectivo teniendo en cuenta únicamente el proceso de construcción, puede no ser un reflejo de la realidad. Es muy posible que los costes de mantenimiento de la estructura tengan un gran peso en la decisión y puedan inclinar la balanza hacia otras alternativas con un coste de inversión inicial superior. Por este motivo es importante realizar un análisis de CCV, que valore el coste total más reducido integrando todas las fases de la vida del puente.

El impacto social de una construcción resulta más difícil de cuantificar y normalizar debido principalmente a su naturaleza difusa. Actualmente existen escasos estudios que contemplan los costes sociales en el caso de puentes y esta área se encuentra todavía en desarrollo. Principalmente se evalúan los costes de los usuarios afectados durante el ciclo de vida útil del puente, los cuales se resumen en costes operacionales de vehículos, costes de retraso del conductor y costes de accidentes.

Figura 2.22. Ciclo de vida de un puente
(Fuente: CEDEX)

La primera fase de definición del objetivo y alcance del estudio debe detallarse de forma muy precisa, prestando especial atención en el caso de comparativas de puentes a la definición de los límites y alcance del sistema evaluado para obtener resultados coherentes y definidos en base a las mismas consideraciones.

En la definición del alcance del estudio se debe incluir según especificaciones de la ISO 14040 el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto, y la subsecuente interpretación a utilizar, requisitos relativos a los datos, las suposiciones, las limitaciones, los requisitos iniciales de calidad de los datos, el tipo de revisión crítica y el tipo y formato de informe requerido para el estudio.

En el caso de proyectos constructivos de puentes se incluye en el alcance la adquisición de la materia prima, la manufacturación, el transporte, la instalación, las operaciones y el mantenimiento y finalmente la disposición final de las salidas del sistema según

consideraciones de reciclaje o gestión de residuos. La Figura 2.22. define las fases principales del sistema completo de construcción, operación y final de vida.

En el caso de las operaciones y mantenimiento, consideraremos el impacto producido en las fases indicadas para las labores de mejora, operación, inspección y reparación.

En el caso de los materiales utilizados en la construcción del puente es necesario definir las fronteras del sistema de su manufacturación consideradas, así como el consumo de electricidad, combustible o agua valorados en el análisis de los procesos.

En el caso de los materiales más habituales de construcción de puentes, como hormigón y acero, se debe definir en el sistema que incluye desde la adquisición del material hasta su producción, tal y como se muestra en las Figuras 2.23. y 2.24. para la manufactura de hormigón prefabricado y hormigón in situ respectivamente y Figura 2.25. para el material de acero.

Figuras 2.23. y 2.24. Proceso de fabricación del hormigón prefabricado y el hormigón in situ respectivamente (Fuente: Lafarge)

Como se ha podido ver anteriormente, la fabricación del hormigón incluye el consumo de la materia prima grava, arena, piedra caliza, arcilla y bauxita, extraídas de la Tierra. La piedra caliza se tritura y una parte pasa a la fase de molido y otra se quema, se tritura y se hidrata para la producción posterior junto con arcilla de marga calcárea. La marga calcárea resultante se mezcla con la bauxita, la piedra caliza molida, la piedra caliza triturada e hidratada y la arena, y se quema en un horno giratorio para la producción del clinker. El cemento se produce a continuación mediante la mezcla de clinker, yeso y otras sustancias. La escoria de alto horno, un subproducto no mixto producido en un alto horno, se añade en este punto para la producción del hormigón de cimentaciones. El hormigón finalmente resulta de la mezcla del cemento, la grava y

el agua. Según datos del Departamento de Medioambiente y Vivienda de la Generalitat de Cataluña son generados “34 kg de CO₂” para la fabricación del cemento son necesarios 30.000 litros de agua por tonelada de producto, a los que hay que añadir entre 1.500 y 3.500 litros para la limpieza de una tonelada de arena y entre 700 y 2.500 litros para el caso de una tonelada de grava.

En esta fase de definición del sistema de los materiales será necesario valorar las distintas tipologías de hormigón utilizado en la construcción del puente, por ejemplo tipo HA-25 o HA-30, y su dosificación. Uno de los parámetros que más impacto genera dentro del proceso de fabricación del hormigón es la producción del cemento, tal y como se ha constatado previamente, por lo que será adecuado precisar su porcentaje contenido en la mezcla y reflejarlo en el consumo de energía.

Figura 2.25. Proceso de fabricación del acero
(Fuente: CEDEX)

El acero se obtiene en base a dos materias principales: el arrabio, producido a partir del mineral de hierro, y la chatarra tanto férrica como inoxidable. En base a la cantidad de cada uno de ellos se definen dos procesos de fabricación: producción en alto horno con carbón o producción en horno de arco eléctrico. La reducción en el consumo energético y la utilización de recursos reciclados han decantado la balanza por la fabricación mediante horno de arco eléctrico, tal y como se constató en España tras el proceso de reconversión industrial de la siderurgia donde se abandonó la vía de alto horno (L. Medina, 2006).

La chatarra utilizada en su producción puede proceder principalmente de tres fuentes: la chatarra reciclada, obtenida de los rechazos o despuntes de las propias fábricas, la chatarra de transformación, producida durante la fabricación de elementos de acero y

obtenida con forma de virutas o recortes de material por ejemplo, y la chatarra de recuperación procedente del reciclaje de estructuras metálicas, componentes de barcos, automóviles, electrodomésticos, etc. El consumo de agua estimado en la fabricación del acero asciende a una cantidad de 95.000 litros por tonelada de producto, principalmente utilizados en la refrigeración del horno del arco eléctrico y la fabricación de piezas en colada continua, según estimado en la Exposición Universal de Zaragoza “Tesoros del agua” en 2008 (M. Bellart y S.. Mesa, 2009).

Tabla 2.10. Perfil medioambiental del acero
(Fuente: Häkkinen, T.; Vares, S).

Residuos de la obra

Los residuos de construcción y demolición suponen uno de los impactos más significativos de las obras por su gran volumen y su heterogeneidad, por lo que hay que tenerlos muy en cuenta a la hora de estudiar el ciclo de vida de un puente y sus costes asociados. La primera razón acelera el ritmo de colmatación de los vertederos y eleva el número de transportes por carretera; la segunda, dificulta enormemente las opciones de valorización del residuo (ya que se incrementa el coste posterior del reciclaje).

La solución a esta problemática, se basa en las recomendaciones del principio de jerarquía que podríamos equipararlo a la regla de las 3 erres.

3R = Reducir + Reutilizar + Reciclar

Para fomentar el reciclado o reutilización de los materiales contenidos en los residuos, éstos tienen que estar separados. Técnicamente es imposible reciclar residuos mezclados, pues tienen propiedades físicas y químicas diferentes, e incluso puede verse afectada la maquinaria empleada en el proceso de valorización. No obstante, para realizar correctamente la clasificación será necesario conocer los diferentes tipos de residuos, que se dividen en:

Residuos inertes. Aquellos que no presentan ningún riesgo de contaminación de las aguas y de los suelos y que, en general, podríamos asimilar a los materiales pétreos. por ejemplo, ladrillos, hormigón endurecido, mortero endurecido, etc.

Residuos no peligrosos. Son los que por su naturaleza pueden ser tratados o almacenados en las mismas instalaciones que los residuos domésticos. Por ejemplo, armadura de acero, palets, restos de encofrado, paneles de encofrado en mal estado, sacos de cemento, arena etc.

Residuos peligrosos. Los formados por materiales que tienen determinadas características perjudiciales para la salud o el medioambiente. Por ejemplo, aceites, lubricantes, desencofrantes, betunes, tubos fluorescentes, decapantes etc.

En cuanto a las alternativas de destinos posibles para estos residuos se señalan las siguientes:

Reutilización: aquello que puede ser utilizado nuevamente para la misma función tanto dentro de la propia obra como en otras obras.

Si hablamos del hormigón, la alternativa más ventajosa es reciclarlo en la propia obra como árido en un hormigón nuevo o en rellenos de soleras y trasdosados de muros de contención. Estos materiales están constituidos por sustancias naturales (la materia prima del cemento también tiene este origen mineral), de modo que cada tonelada de residuos de hormigón que sea reciclado -por ejemplo, como árido para un hormigón nuevo supone un ahorro aproximado de una tonelada de árido natural, que debería ser extraído de las canteras, con los consiguientes impactos ambientales y en el paisaje. Así pues, reciclar los residuos de obra de fábrica y hormigón puede reportar ahorro de dinero y, sin duda, beneficiosos efectos ambientales.

Además de reciclar estos residuos para la obra de edificación, también pueden ser empleados en la formación del paisaje de las zonas ajardinadas comunes. El uso intensivo en obras civiles es igualmente otra buena opción: por ejemplo, en sub-bases de carreteras y para rellenar terraplenes. Todas estas prácticas ahorran los áridos naturales y reducen los impactos asociados al transporte de los residuos al vertedero.

Valorización: aquello que puede ser utilizado para otra función, ya sea en forma directa (aprovechamiento) o mediante algún tipo de tratamiento (reciclaje).

Los residuos metálicos son los más fácilmente valorizables ya que poseen un gran valor. Se pueden vender sin problema porque poseen un valor residual como chatarra. El acero, el aluminio, el cobre etc. son materiales ideales para reciclar porque existe una demanda permanente y una industria de transformación adecuada. Además, sus posibilidades de reciclado no se limitan a un solo tipo de producto, ya que forman parte de productos que se encuentran en sectores diversos.

Por lo demás su reciclado no solamente es posible sino muy conveniente desde el punto de vista medioambiental puesto que la utilización de los residuos metálicos puede reducir el impacto que origina la producción de metales. En concreto:

- Evita extraer grandes volúmenes de roca para obtener el mineral.
- El proceso de transformación del mineral en metal es intensivo en gasto de energía y producción de dióxido de carbono (CO₂).
- El transporte desde las zonas de extracción alejadas de los grandes centros de producción requiere de mucha energía y provoca, nuevamente, emisiones de CO₂.

En otros sectores productivos se separan los metales para reciclarlos de forma más eficiente que en las demoliciones. Todavía hoy en la construcción hay residuos metálicos que no se recuperan y que van a parar al vertedero; o bien no se separan selectivamente de manera que se reducen sus posibilidades de reciclado. Hay, pues, que dejar de lado esas acciones y fomentar la reutilización y reciclado de los residuos metálicos siempre que sea posible.

Eliminación: destino para aquel residuo que no puede ser ni reutilizado ni reciclado y que debe ser dispuesto en algún sitio de disposición final.

2.5. LA SOSTENIBILIDAD EN LA INGENIERÍA CIVIL. PUNTO DE PARTIDA.

Como ya se ha ido indicando a lo largo de la tesis, actualmente la inversión en infraestructura se ha constatado como un símbolo de desarrollo y crecimiento de un país, por lo que su avance resulta necesario. Del mismo modo existen predicciones que estiman que la expansión de los medios construidos destruirán en el 2032 el 70% del hábitat natural y la vida animal mientras se mantengan las tendencias actuales globales (a pesar de que las ciudades del mundo constituyen únicamente un 2% de la superficie de la Tierra)(Gervásio y da Silva, 2008).

Una manera de considerar la sostenibilidad es utilizar un enfoque de ciclo de vida que incluya los aspectos ambientales, económicos y sociales durante la duración de vida completa de un sistema o servicio. Dado que los puentes son estructuras diseñadas para resistir una vida útil duradera, más que la mayoría de los productos, es especialmente importante considerar los impactos económicos y ambientales de su ciclo de vida. (Gu y Karoumi, 2012).

Las infraestructuras sostenibles son aquellas que soportan las estructuras social, económica y ambiental de un modo integrador y de forma que no queda ninguna de ellas favorecida en detrimento de las demás. Para profundizar un poco más en este punto se ha realizado un análisis más profundo de cada uno de estos aspectos más adelante.

Toda infraestructura tiene un impacto sobre la naturaleza en la que se asienta, sobre el terreno que ocupa, produciendo unos efectos sobre la actividad económica asociados a su construcción y utilización, y teniendo por tanto una influencia muy importante en el desarrollo de la sociedad que las utiliza.

Los efectos de las infraestructuras dependerán de las diferentes fases que constituyen su ciclo de vida:

- Diseño, fabricación de componentes y materiales.
- Construcción
- Uso
- Mantenimiento y reparación
- Deconstrucción y tratamiento de los residuos

Además dichos efectos dependerán del tipo de infraestructura que se trate pudiendo clasificarse por ejemplo en:

- Obras lineales o de significativo movimiento de tierras: carreteras, FFCC, aeropuertos, urbanizaciones, canalizaciones enterradas (en medio rural) y canales.
- Obras marítimas.
- Presas.
- Obra civil en medio urbano.
- Obras fluviales: encauzamientos, adecuación de márgenes, dragado fluvial...
- Obras especiales: tipologías no encuadrables entre las anteriores: EDAR, conservación de carreteras, etc.

La sostenibilidad consiste en mantener en el largo plazo la integración de tres principales factores: social, ambiental y económico. Así vamos a ver de manera más exhaustiva cada uno de ellos:

Figura 2.26. Bases de la sostenibilidad
Elaboración propia

Efectos económicos

La evaluación del impacto económico de las infraestructuras puede basarse en la economía del ciclo de vida. En ese caso se tienen que tomar en cuenta, además de los costes del ciclo de vida determinados en la inversión, uso, mantenimiento y deconstrucción, también los beneficios potenciales y el desarrollo del valor durante la vida útil de la infraestructura, pudiéndose representar mediante un análisis coste-beneficio.

Los efectos económicos que generan la construcción de una infraestructura afectan fundamentalmente al territorio en el que se asienta (mano de obra, servicios necesarios en el territorio, empleo de empresas subcontratistas, etc) y al impulso en la utilización de bienes de equipo empleados, que normalmente serán producidos en otros lugares, e incluso en países extranjeros (por ejemplo maquinaria especializada).

Pero sobretodo es en un adecuado comportamiento de la infraestructura con respecto a las necesidades de los usuarios, en la generación de economías de escala, en la mejora de conexiones entre territorios y en el fomento de la actividad económica, donde realmente se ven sus efectos positivos.

Los beneficios potenciales dependerán también de los mantenimientos periódicos planificados de la construcción de obra civil a la vez que se minimicen las interrupciones de los servicios proporcionados por las mismas.

Efectos medioambientales

Las infraestructuras dependiendo de qué tipo se traten, afectarán en mayor o menor medida a su entorno. Las principales afecciones serán las siguientes:

- Geología. Alteraciones en formaciones geológicas, con modificaciones del relieve, etc.
- Edafología. Alteraciones en la composición del suelo, estructura, productividad, capacidad de retención de agua, etc.
- Hidrología e hidrogeología. Afecciones a la escorrentía del agua por superficie, alteración de la calidad del agua. Alteraciones en las aguas subterráneas.
- Atmósfera y Ruido. Afecciones a la calidad del aire en el entorno, contribución al efecto invernadero, etc. Contaminación acústica.
- Paisaje. Alteración del medio perceptual, influencia de la visibilidad de la infraestructura y de la intervisibilidad entre dos puntos.
- Flora y fauna. Afecciones a las comunidades y poblaciones, especies protegidas. eliminación de la vegetación y destrucción de hábitats.
- Pérdida de biodiversidad.
- Pérdida de calidad de los ecosistemas.

Estas afecciones llevan consigo una serie de indicadores que se detallan a continuación y que serán estudiados en la hoja de cálculo para la determinación sostenible de la obra civil:

- Uso de la energía
 - uso de energías renovables
 - uso de energías no renovables
 - uso de combustibles ambientalmente gestionados de manera sostenible (agrupados por tipos de combustible: por ejemplo, criterios de sostenibilidad para los biocombustibles ISO 13065).
- Uso de Recursos
 - uso de recursos renovables (por ejemplo, la madera, el vidrio reciclado)
 - uso de los recursos no renovables (por ejemplo, los agregados, asfalto, hormigón, metales)
 - uso de materiales ambientalmente gestionados de manera sostenible (agrupados por tipos de materiales: por ejemplo, PEFC, FSC, fuentes responsables materiales BS 8902: 2009)
 - uso de sustancias tóxicas
 - uso de los recursos de agua dulce
- Contaminación / emisiones a la atmósfera, el suelo y el agua
 - emisión de polvo a la atmósfera
 - Las emisiones de GEI a la atmósfera
 - acidificación de emisiones de gases a la atmósfera

- contaminación lumínica
 - campos electromagnéticos y radiología
 - suspendido de emisiones sólidos al agua
 - sustancias tóxicas emitidas a la atmósfera, el suelo y el agua
- El ruido y las vibraciones
- La adaptación al clima
- La gestión del agua
 - Cantidad, calidad y ajustes
- La gestión de residuos
 - materiales para su reutilización
 - materiales para el reciclaje
 - materiales para la recuperación de energía
 - residuos no peligrosos para su eliminación
 - residuos peligrosos para su eliminación
- Uso de la tierra
 - cambios de uso del suelo
 - contaminado la tierra
- Paisaje y la salud del ecosistema
 - (impactos sobre la biodiversidad, como los efectos barrera, la mortalidad, la perturbación, las especies invasoras, las medidas compensatorias, la pérdida de hábitat, la fragmentación del hábitat, y los valores del patrimonio cultural creado, intrusión visual)
- Los indicadores de impactos ambientales (categorías de impacto LCIA)
 - potencial agotamiento abiótico (subdividido en elementos y combustibles fósiles)
 - acidificación de los recursos de tierras y aguas
 - destrucción del ozono estratosférico de la capa
 - eutrofización
 - formación de ozono a nivel del suelo
 - potencial de calentamiento global

Efectos sociales

Los impactos sociales pueden ser asociados a los beneficios del uso de las infraestructuras, así como las molestias y perjuicios que sufran algunos por la construcción de las mismas y por su uso posterior.

Los aspectos sociales del entorno construido que pueden ser relevantes a escala de comunidad, son por ejemplo: la accesibilidad de servicios básicos, disponibilidad de usos lúdicos; el atractivo de los entornos afectados por la infraestructura, el desarrollo

de zonas contaminadas o degradadas, la disponibilidad social de recursos como agua o energía, la seguridad, la calidad acústica y del aire, y otros.

Los aspectos sociales relevantes a escala de infraestructura incluyen, por ejemplo la calidad de las infraestructuras y del servicio que prestan, los efectos asociados a la construcción sobre la salud y la seguridad de los usuarios; la ausencia de barreras para el uso o que la infraestructura constituya o no una barrera; la protección del patrimonio cultural, etc.

Las infraestructuras llevan consigo beneficios asociados a los servicios que aportan a la sociedad, como la mejora de las comunicaciones (ferrocarril, carreteras), la disponibilidad de agua potable (embalses, desaladoras, conducciones), disponibilidad de energía eléctrica, gas natural, etc.

La gran mayoría de los servicios son imprescindibles para la sociedad actual, en la vida doméstica y permiten a su vez llevar a cabo otras actividades que requieren del uso de los servicios proporcionados por éstas.

Aparte de los beneficios comentados anteriormente, hay que valorar los costes sociales que llevan consigo determinadas infraestructuras. Algunos costes sociales pueden derivarse de la ocupación del terreno para la construcción de la infraestructura. Ello puede tener una afección importante ya que los usos tradicionales del suelo ocupado no pueden darse y ello afectaría al empleo de parte de la población de un territorio, como sería el caso de una población que se dedicara principalmente al sector primario. También sería el caso de poblaciones cuya principal actividad económica se centrara en el turismo y que, con la infraestructura, decayese.

Otros costes sociales que es necesario introducir en el estudio son las molestias a los vecinos por ruidos, contaminación, etc. Para cada caso particular habrá que estudiar detenidamente cuales serían los costes sociales derivados.

Un aspecto social relevante es la importancia de las obras públicas que por sus características históricas, de diseño u otras son consideradas bienes públicos incluso artísticos que representan el ser y el sentir de la sociedad donde se asientan.

Algunos aspectos del comportamiento están relacionados simultáneamente con los impactos ambientales, económicos y sociales. Como ejemplos tenemos:

- La localización de una infraestructura afecta a los impactos ambientales y económicos relacionados con el mismo
- Las soluciones espaciales afectan a la operatividad del uso de la energía
- La solución técnica determina la base para el comportamiento de la infraestructura: condiciones en su uso, seguridad, flexibilidad, utilidad, acceso y confort

Todos los aspectos del desarrollo sostenible están interrelacionados. Cuando se analiza la sostenibilidad de una obra civil de forma integral, debería prestarse especial atención a los aspectos económicos indicados por los flujos monetarios durante el ciclo de vida, en términos de costes del ciclo de vida (LCC) o economía del ciclo de vida.

Los aspectos ambientales indicados en términos de cargas o impactos ambientales durante el ciclo de vida de la infraestructura; a los aspectos sociales, indicados en términos de interacción con las consideraciones de la sostenibilidad en la escala de la comunidad; y todo ello atendiendo tanto a la conformidad, localización y servicios que presta como a las soluciones técnicas que cumplen las prestaciones requeridas para la infraestructura a lo largo de su vida útil.

Existen instrumentos para describir la relación entre los aspectos primarios de sostenibilidad, como por ejemplo: ecoeficiencia, coste funcional, impacto ambiental en relación con los beneficios (índice entre daños y beneficios).

Los indicadores de sostenibilidad pueden desarrollarse y utilizarse por separado o todos juntos para indicar varios aspectos sostenibles de las construcciones de obra civil. Cuando los aspectos ambientales, económicos y sociales de las infraestructuras son expresados mediante la ayuda de indicadores, la experiencia demuestra que los sistemas de indicadores son más efectivos que un indicador individual. Las series de indicadores pueden organizarse de modo que permitan la inclusión de una amplia representación de los aspectos de la sostenibilidad a la vez que siguen siendo relevantes para las perspectivas de los agentes implicados. Para el uso de los indicadores es necesario elegir los indicadores adecuados (dependiendo de las necesidades de las partes interesadas, los límites de decisión, el objeto y la disponibilidad de información) y encontrar los métodos convenientes y la información para evaluar sus valores.

Actualmente existen organizaciones y fundaciones internacionales sin ánimos de lucro que están desarrollando iniciativas para promover mejores prácticas de sostenibilidad en la ejecución de carreteras. Así podemos destacar:

- Greenroads Rating System de Estados Unidos.
- Invest Infrastructure. Es una herramienta de auto-evaluación voluntaria.
- CEEQUAL en Inglaterra e Irlanda. Promueve y alienta la consecución de rendimientos económico, ambiental y social en todas las formas de ingeniería civil a través de la identificación y aplicación de buenas prácticas. Introduce:
 - Mejoras importantes en sus proyectos y contratos a través de la adopción de las mejores prácticas. Incluyendo el ciclo de vida, la minimización de residuos, eficiencia de los recursos (materiales, agua, energía).

Prevé respuestas que los efectos del cambio climático, así como la gestión de proyectos y la reducción de quejas e incidentes ambientales.

- El fomento de la reputación y buenas relaciones públicas y demostración verificada de la protección del medioambiente, la sostenibilidad y / o políticas de responsabilidad social corporativa.

2.6. EL SISTEMA FERROVIARIO ESPAÑOL ACTUAL. CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

En la última década y media la inversión en infraestructuras de transporte en España ha tenido un fuerte impulso. Muy posiblemente, algunas carencias estructurales de carácter histórico se han querido superar en un periodo corto que se ha caracterizado por un crecimiento económico sostenido y la entrada de fondos estructurales procedentes de la Unión Europea (fundamentalmente Cohesión y FEDER). Esto dio lugar a una política pública muy orientada en esta dirección, tanto en los sucesivos gobiernos centrales como en los autonómicos y al desarrollo de la Alta Velocidad.

Figura 2.27. Transporte modal en España en 2008
(Fuente: PEIT)

España tiene la red de líneas de Alta velocidad más extensa, con más de 2.200 Km. de servicios en 2010 y donde se espera alcanzar los 10.000 Km. en 2020.

Actualmente España cuenta con el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) 2005-2020 fue aprobado por el Consejo de Ministros del 15 de julio y prevé una inversión de 248.892 millones de euros, de los cuales cerca del 50 por ciento irán destinados al ferrocarril.

Este nuevo plan, que en materia ferroviaria sustituye al Plan de Infraestructuras Ferroviarias 2000-2007 elaborado por la anterior administración del Estado, aporta una mejor vertebración del territorio mediante el diseño de una red mallada menos dependiente de los corredores radiales, apostando por la intermodalidad, permitiendo la integración de España en la red transeuropea de alta velocidad y compatibilizando los tráficos de viajeros y mercancías mediante la creación de líneas mixtas dentro de la red de alta velocidad.

El PEIT, estructurado en siete grandes líneas de actuación, se marca como objetivos principales:

- Impulsar la competitividad y el desarrollo económico.
- Fortalecer la vertebración y la cohesión territorial y social, garantizando la accesibilidad homogénea en todo el territorio.
- Asegurar la sostenibilidad del sistema de transportes.
- Incrementar la seguridad de los distintos modos de transporte.
- Lograr un sistema de transportes eficiente que satisfaga con calidad las necesidades de movilidad.
- Reestablecer el equilibrio entre los distintos modos de transporte.
- Lograr una adecuada inserción del sistema español de transporte en el ámbito europeo.

Figura 2.27. Red de ferrocarril horizonte 2020.

Fuente: Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF)

En la actualidad el sistema ferroviario Español cuenta con una amplia red de líneas convencionales y de Alta Velocidad (Figuras 2.28 y 2.29):

Figura 2.28 Líneas convencionales en España
Fuente: Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF)

Figura 2.29. Líneas de alta velocidad en España
(Fuente: Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF))

Para lograr una adecuada inserción del sistema español de transporte en el ámbito europeo, España está trabajando en asimilar todos sus sistemas de ferrocarril a la red europea, para ello está trabajando en los ámbitos de la señalización, la seguridad y el ancho de vía.

Tradicionalmente se ha venido identificando el diferente ancho de vía que la mayor parte de la red española tiene con respecto a la de otros muchos países como el único problema de interoperabilidad existente. Sin duda es el más importante de esta clase de problemas, pero no es el único. Los sistemas ferroviarios de los Estados europeos presentan características técnicas y de explotación muy diferentes y en muchos casos incompatibles: sistemas de señalización (más de 15 sistemas distintos), características de la electrificación, características de los materiales y condiciones de explotación.

El esfuerzo español por incorporar las condiciones de interoperabilidad contempla la paulatina y coordinada incorporación del ancho de vía UIC a la red española, previendo una adecuada compatibilidad de la circulación sobre las líneas existentes y las nuevas.

Al mismo, tiempo contempla la incorporación del sistema europeo de señalización (ERTMS) en las nuevas líneas, y prevé la adopción de normas y protocolos de

explotación coordinados con las de los países de nuestro entorno. Al mismo tiempo, la incorporación de las exigencias de interoperabilidad debe hacerse respetando las condiciones de la red ferroviaria existente, de forma que tanto las actuaciones en ella como en las nuevas líneas permitan la mayor compatibilidad entre ambas y posibiliten trasladar a la mayor parte del territorio las mejoras de calidad del servicio y ganancias de tiempo que se obtengan gracias a las nuevas líneas.

La correcta integración en la red europea debe basarse en la incorporación al sistema ferroviario europeo de una malla coherente y funcional que conecte a distintas velocidades y con parámetros diferentes, pero competitivos, el conjunto de las Comunidades Autónomas entre sí y con la red europea. Es decir, dando coherencia interna al sistema ferroviario nacional para que pueda contribuir al desarrollo de la red europea, además de satisfacer con la mayor eficacia y eficiencia su función básica en el sistema de transportes español.

Tabla 2.11. Vida útil de los distintos sistemas de infraestructura ferroviaria

SISTEMA	VIDA ÚTIL (años)
Plataforma	
Movimiento de tierras	100
Tuneles, puentes y obras de fábrica	100
Drenaje	25
Cerramientos	50
Superestructura de vía	30-60
Instalaciones eléctricas	
Línea aérea de contacto	20
Elementos de soporte de la línea aérea	60
Subestación eléctrica	60
Instalaciones de señalización, seguridad y comunicación	25
Material móvil	10-20

En España se ha conseguido construir las líneas de alta velocidad a costes muy competitivos en el marco internacional, manteniendo ese logro a lo largo del tiempo, tal y como se puede ver en las figuras 2.47 y 2.48. Los elementos determinantes para el coste de inversión son: los condicionantes de orografía y las características geológicas y geotécnicas del terreno; la proximidad de la línea en construcción a otras infraestructuras que puedan verse afectadas (especialmente cuando éstas son también infraestructuras ferroviarias); la gestión del impacto ambiental, y la entrada en las ciudades, incluidas las soluciones en las grandes estaciones.

Figura 2.30. Comparativa de costes unitarios de construcción de líneas de alta velocidad
(Fuente: Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF))

De los costes de explotación de una línea de alta velocidad destacan, por su cuantía, los de mantenimiento, por encima de los de operación y los generales. Los costes de mantenimiento se muestran invariables respecto al tráfico, y se concentran en la vía y, en España, en las instalaciones de señalización y telecomunicaciones.

Comparativamente, en España los costes de mantenimiento de los sistemas de vía y electrificación son un 30% más bajos que en Francia. En sentido contrario, nuestros costes para los sistemas de señalización y telecomunicaciones son muy superiores a los costes franceses reseñados en la bibliografía utilizada. En este sentido, se apunta la menor competencia en el mercado para el mantenimiento de estos últimos como una de las causas de su mayor coste.

El coste de mantenimiento de las líneas de alta velocidad es más reducido que el de las líneas convencionales.

El resultado contable global de la explotación de la alta velocidad en España sería levemente positivo, incluso con los niveles de tráfico existentes en el momento actual.

Figura 2.31. Comparativa de costes de construcción de líneas de alta velocidad
(Fuente: Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF))

Tras la puesta en servicio en 2010 de los 438 kilómetros del recorrido entre Madrid, Albacete y Valencia, España se situó como el primer país de Europa y segundo del mundo, tras China, en número de kilómetros de altas prestaciones en explotación, estando incluso por delante de países de gran tradición en este modo de transporte como son Japón y Francia.

En la actualidad, la red española de alta velocidad tiene más de 3.100 km en servicio.

En el plano tecnológico, España es precursora en el sector de I+D+i ferroviario, mediante la innovación en infraestructura, señalización, electrificación y material rodante.

Figura 2.32. Longitud de km en servicio en construcción en 2015.
(Fuente: ADIF y Unión Internacional del Ferrocarril)

2.6.1 Criterios de sostenibilidad aplicados actualmente en el ámbito ferroviario

La introducción de criterios de sostenibilidad en el transporte ferroviario hace necesaria la consecución de un modelo sostenible tanto en redes ferroviarias interurbanas como en redes metropolitanas y urbanas. En este desarrollo adquiere un papel clave la renovación de infraestructuras ferroviarias ya existentes con tecnologías ambiental y económicamente sostenibles.

En los últimos años se ha realizado una importante inversión económica en promoción de la construcción de líneas ferroviarias de alta velocidad con el fin de articular el transporte ferroviario en la península como se puede ver en la Figura 2.49. Esta red debe conjugar los criterios de competitividad económica, respetando el medioambiente y colaborando en el crecimiento sostenible del territorio.

Figura 2.33 Inversión económica en España en los últimos 5 años

El Ministerio de Fomento de España ha desarrollado un plan, El Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) que proyecta actuaciones en infraestructuras y transportes desde el año 2005 al 2020, con una inversión total de 241.392 millones de euros.

El PEIT señala que, debido a tensiones crecientes causadas por el crecimiento de las ciudades y el desarrollo de sistemas ferroviarios, se están generalizando las propuestas para mejorar la integración del ferrocarril en la mayor parte de las ciudades españolas, presentándose un amplio abanico de posibilidades técnicas de actuación, de complejidad, coste e implicaciones urbanas y ferroviarias variadas. A continuación se

resumen algunas de estas estrategias de mejora de la integración medioambiental del ferrocarril:

- actuaciones en materia de integración paisajística
- disminución del efecto barrera y de fragmentación
- control de emisiones
- control del ruido de las circulaciones ferroviarias

De igual interés son las intervenciones para la integración del denominado patrimonio ferroviario, como el desarrollo de pasillos verdes en las inmediaciones de algunos trazados, con el propósito de recuperación y acondicionamiento de infraestructuras lineales sin usos funcionales.

Renfe, como compañía encargada de la explotación de los ferrocarriles, ha establecido una serie de compromisos como ejes de su gestión, entre ellos un Compromiso con la Sostenibilidad y la Protección del Medioambiente.

El objetivo de Renfe en el ámbito del medioambiente es reducir e incluso eliminar los efectos ambientales ligados a sus servicios. Para ello, ha establecido una política ambiental, que se basa en tres ejes fundamentales:

- La adecuación ambiental de los servicios de Renfe mediante el cumplimiento de la legislación ambiental y de los compromisos ambientales adquiridos de forma voluntaria.
- La difusión y puesta en valor de las ventajas ambientales del ferrocarril como modo de transporte.
- La gestión de los aspectos ambientales existentes en la relación entre infraestructura y operación.

El ferrocarril es el modo de transporte de viajeros y de mercancías que presenta un menor impacto ambiental en su conjunto, es el modo que menos energía consume por unidad transportada, que presenta unos menores niveles de emisiones de CO₂, que menos contribuye a la contaminación local en las áreas urbanas, y que genera un menor impacto acústico. Además la ocupación del terreno realizada por las infraestructuras ferroviarias es, en términos relativos, significativamente menor que el espacio ocupado por las carreteras.

Todas estas ventajas ambientales, además de otras sociales y económicas tales como una menor accidentalidad y una contribución decisiva a la reducción de la congestión urbana, hacen que el tren sea el modo de transporte que menos costes externos genera a la sociedad. La carretera y la aviación generan entre 3 y 5 veces más costes externos que el ferrocarril, lo que hace que el ferrocarril sea reconocido, como el modo de transporte más sostenible.

La transferencia modal, tanto en viajeros como en mercancías, desde otros modos de transporte menos sostenibles hacia el ferrocarril genera una disminución notable de dichos costes externos, estableciendo las bases para un sistema de transporte más eficiente, para una Movilidad más Sostenible.

Respecto a las emisiones de CO₂, el ferrocarril es el medio que realiza unas menores emisiones de CO₂ por unidad transportada, entre 3 y 5 veces menos que viajando por carretera y entre 7 y 10 veces menos que viajando en avión. El ferrocarril en España ha reducido en un más de un 45% sus emisiones por unidad transportada desde 1990.

Estas menores emisiones son debidas a:

- Consumo eléctrico: Consumo eficiente

La utilización del freno regenerativo, tecnología de generación de energía por el motor en el proceso de frenado, permite que algunos trenes devuelvan a la red entre un 6 y un 10% de la energía en Alta Velocidad y hasta un 40% en Cercanías. La conducción económica de los trenes por parte de los maquinistas permite ahorros energéticos de hasta un 30% en algunos trayectos.

- Utilización de energías renovables

El consumo de energía eléctrica permite utilizar masivamente energías renovables a diferencia de otros modos de transporte dependientes del petróleo como la aviación, el transporte marítimo o la carretera. Con el aumento sostenido de la cuota de energías renovables en el ámbito nacional y con la posibilidad de contratar energías limpias las emisiones de CO₂ debidas al ferrocarril se están reduciendo de forma drástica.

- Transporte Público: Menor consumo de energía

El ferrocarril al igual que otros modos de transporte colectivo realiza un menor consumo de energía al realizar un aprovechamiento más eficiente de las plazas que los modos de transporte privados. Estos factores provocan que el ferrocarril consuma entre 3 y 5 veces menos que otros modos por unidad transportada.

- Reducción de las emisiones contaminantes locales

El ferrocarril, al consumir preferentemente energía eléctrica reduce considerablemente la emisión de contaminantes atmosféricos locales, evitando el aumento de la polución atmosférica en las ciudades causada por los modos de transporte por carretera.

- Menores emisiones acústicas

Los trenes realizan menores emisiones acústicas que otros modos como la carretera o la aviación. Según han observado estudios científicos, el ruido ferroviario cuando se produce es puntual y menos molesto que el ruido continuo que causa una carretera.

- Menor ocupación del espacio

El ferrocarril ocupa entre 2 y 3 veces menos espacio físico por unidad transportada que las carreteras. A nivel europeo, el ferrocarril con un 8% del mercado realiza solamente un 2% de la ocupación de territorio debida al transporte. Aunque la construcción de líneas de Alta Velocidad realiza una ocupación significativa del espacio, estas líneas ocupan un 35% menos que una autovía de dos carriles por sentido. Una línea de ferrocarril tiene una capacidad de transporte 6 veces mayor que las infraestructuras para el transporte con autobús y 45 veces mayor en el caso de los automóviles.

La integración paisajística y ambiental de las estaciones ha constituido otro de los pilares de sostenibilidad de la red ferroviaria.

3

SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN Y ESTUDIO COMPARATIVO

A raíz del concepto de sostenibilidad surgieron las llamadas certificaciones energéticas. Se entiende por calificación energética la expresión del consumo de energía que se estima necesario para satisfacer la demanda energética de un edificio o construcción en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación. Y posteriormente, se define certificación energética cómo el proceso por el que se verifica la conformidad de la calificación energética obtenida por el edificio con el proyecto y el edificio acabado respectivamente, que conduce a la expedición de un certificado de eficiencia energética.

Tener una perspectiva del ciclo de vida completo en las evaluaciones de construcción, es decir, en las certificaciones energéticas, es crucial para la mayoría de especialistas.

3.1. SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN EXISTENTES. REVISIÓN DE LOS MÉTODOS

Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, una certificación ambiental es un sello que otorgan diferentes organizaciones (GBCe, BREEAM, USGBC, LEED, CASBEE, DGNB) a un edificio, un proyecto, una vivienda, un local, etc. tras analizar su comportamiento desde el punto de vista medioambiental. Actualmente muchos países tienen sus propios sistemas de certificación. Los más importantes se detallan en la Figura 3.1.. Los elementos comunes entre los diferentes sistemas son:

- Es una evaluación que asegura que un edificio incorpora una serie de características de mejora ambiental.
- La evaluación es efectuada por un profesional independiente acreditado por la organización que emite el sello.
- La certificación otorga una valoración en función de la reducción de impactos medioambientales que suponen las medidas incorporadas en el edificio.
- Los impactos se miden cuantificando el uso de energía, el consumo de agua y recursos naturales, el uso de los materiales y la emisión de residuos al entorno.

- El edificio analizado obtiene un sello que tiene una categoría diferente en función del grado de eficacia alcanzado en la reducción de impactos.

Australia: <i>Nabers / Green Star</i>
Brazil: <i>AQUA / LEED Brasil</i>
Canada: <i>LEED Canada/ Green Globes</i>
Chile: <i>Nexo Residuos Limitada 271 3502.</i>
China: <i>GBAS</i>
Finland: <i>PromisE</i>
France: <i>HQE</i>
Germany: <i>DGNB</i>
Hong Kong: <i>HKBEAM</i>
India: <i>LEED India/ TerriGriha</i>
Italy: <i>Protocollo Itaca</i>
México: <i>LEED México</i>
Colombia: <i>VERDE</i>
Netherlands: <i>BREEAM Netherlands</i>
Portugal: <i>Líder A</i>
Singapore: <i>Green Mark and Construction Quality</i>
Spain: <i>BREEAM ES / VERDE</i>
United States: <i>LEED/Green Globes</i>
United Kingdom: <i>BREEAM</i>
Jordan: <i>JGBC</i>

Figura 3.1 Certificaciones utilizadas en cada uno de los países

Los sellos con mayor nivel de implantación en Europa son VERDE, BREEAM y LEED. Cada uno de ellos sigue una metodología propia diferente, premiando o evaluando de diferente modo las características de nuestro edificio, pero todos ellos persiguen un reconocimiento público del esfuerzo realizado para reducir el impacto medioambiental de nuestro edificio.

Por el momento, los sellos de certificación ambiental actuales pueden aplicarse a edificios existentes o de nueva construcción, locales comerciales, sedes corporativas, oficinas, viviendas, colegios, hoteles, proyectos de nueva construcción, etc.

Un edificio que ha superado el proceso de certificación consigue entre otros los siguientes beneficios:

- Aumento del valor de mercado del edificio: se estima que la obtención de un sello medioambiental aumenta el precio del alquiler en un 3% y el de venta en un 13%.
- Reducción de los gastos de uso del edificio: el coste energético de funcionamiento de un edificio puede reducirse más un 50% en función de su tipología y uso.
- Mejora de la imagen: un edificio que ha obtenido un sello medioambiental muestra el interés de sus propietarios por contribuir a la reducción de los impactos de su actividad sobre el medioambiente.
- Mejora del nivel de confort de los usuarios: criterios como la iluminación y ventilación natural, el uso de materiales sin COVs o el control de la temperatura

de confort y los niveles de CO₂ interior, son algunas de las medidas que inciden positivamente en el bienestar de los usuarios.

En este primer capítulo de la tesis se analiza de una manera exhaustiva las certificaciones utilizadas tanto en el resto de Europa como en Estados Unidos y sus diferentes maneras de enfocar el análisis (Tabla 3.1.)

Los sistemas de evaluación existentes, se orientan a las cuestiones medioambientales, económicas y sociales y sus impactos y se han desarrollado con la finalidad de establecer mecanismos comunes para diseñar y evaluar las construcciones, desde el punto de vista de la sostenibilidad. Actualmente hay desarrollados una gran variedad de herramientas para la edificación, estructuradas de tal manera, que algunas de ellas pueden ser herramientas de comparación, o fuente de información de productos (nivel 1), ser herramientas de diseño, o de soporte de decisión (nivel 2), o bien, ser aquellas que evalúen por completo la edificación (nivel 3). Se pueden resumir en 3 grandes grupos:

- Aquellos basados en la valoración de actuaciones, establecidas en criterios a los que se asocia un número de puntos en función de la importancia de los impactos asociados al crédito. En este grupo de encuentran los modelos LEED (EE.UU.) BREEAM (Inglaterra), ESCALE (Francia) y MIVES (España).
- Los basados en el cálculo de parámetros de ecoeficiencia. El método de evaluación de CASBEE (Japón) se basa en el concepto de ecoeficiencia, definido como “valor de productos y servicios por unidad de cargas ambientales”. La Eficiencia Medioambiental del Edificio que usa CASBEE como indicador se define como una relación entre las categorías de “Rendimiento y Calidad Medioambiental del Edificio” y las “Cargas Medioambientales asociadas”.
- Los basados en el cálculo de la reducción de impactos asociados a la incorporación de medida de diseño y factores de rendimiento establecidas en una lista de criterios. En este grupo se encuentra la herramienta VERDE.

En la tabla siguiente, se pueden ver la mayor parte de las certificaciones existentes:

Tabla 3.1 Sistemas de certificación existentes.

<ul style="list-style-type: none">• BREEAM (2)• GBC• VERDE (1) (2)• MIVES (1) (2)• LEED (2)• BEES• BRE Environmental Profiles• ECOPROFILES• ECOPROP• ECOQUANTUM	<ul style="list-style-type: none">• ENVEST• GBA• GREEN GUIDE TO SPECIFICATION• LISA• PIMWAQ• TQ BUILDING ASSESMENT SYSTEM• ATHENA• SIMA-PRO• GABI• CASBEE
--	--

(1) Metodología desarrollada en España

(2) Métodos basado en un n° limitado de indicadores

Figura 3.2. Comparación de la utilización de las principales certificaciones en Europa

3.1.1. SISTEMA BREEAM

El sistema de clasificación BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) es de origen británico y fue desarrollado a principios de los 90 por el centro de excelencia BRE (Building Research Establishment) del Reino Unido. El método de evaluación medioambiental para diseño de nuevas oficinas (BREEAM 1/90) vio la luz en julio de 1990 y una versión mejorada (1/93) se comercializó en enero de 1993, ahora conocida como “BREEAM/New Offices”. Es uno de los métodos de evaluación de sostenibilidad de edificios más maduros y es ampliamente reconocido tanto en Reino Unido como a nivel Internacional. BREEAM a diferencia de World Green Building Council (WGBC), tiene una mayor vocación a la adaptación regional y se ha realizado la adaptación del sistema a la legislación, naturaleza y particularidades de España que se indica con las siglas BREEAM ES.

Una evaluación BREEAM emplea medidas reconocidas y establecidas en base a unos patrones definidos que permiten evaluar el diseño, la construcción y el uso de un edificio. BREEAM tiene como objetivo establecer criterios para obtener un buen rendimiento medioambiental de los edificios, mediante una valoración creíble, independiente y objetiva. Las medidas se concretan en una amplia gama de requisitos ordenados en categorías ambientales desde energía hasta ecología, incluyendo aspectos relacionados con el uso del agua, el medio interno (social), la contaminación, el transporte, los materiales, los residuos, la ecología y los procesos de gestión.

Como entrada se requieren datos cualitativos y cuantitativos, haciendo una lista de chequeo con posibles preguntas o cuestionarios para los datos cualitativos. Para los cuantitativos se toman como datos de base los proporcionados por las agencias estatales y por guías de especificación de materiales o consultoras. Trabaja con Excel, cuantificando no solo categorías ambientales sino de gestión, transporte y económicas. Es una herramienta creada en el Reino Unido y sus bases de datos tienen como referencia a su país de origen.

En BREEAM, sus manuales técnicos recogen en diez categorías los requisitos que deben ser evaluados: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación, e Innovación. En la tabla XX se muestra el peso de los diferentes créditos existentes en función de cómo está repartida la puntuación.

Tabla 3.2. Ponderación de los créditos de evaluación BREEAM

Créditos	Ponderación
Gestión	11,5%
Salud y Bienestar	14%
Energía	18%
Transporte	8%
Agua	10,5%
Materiales	12%
Residuos	7%
Uso del suelo y ecología del lugar	9,5%
Contaminación	9,5%
Innovación	10%
PUNTOS TOTALES	100 %

Una evaluación que puede ser realizada tanto en la fase de diseño como en las fases de ejecución y mantenimiento, tanto en desarrollos urbanísticos como en la construcción de nuevos edificios, rehabilitaciones, ampliaciones y acondicionamiento de cualquier tipo de uso de edificación y, cerrando el ciclo, también en edificios existentes y en uso.

Tabla 3.2. Impacto de la certificación BREEAM en diferentes indicadores.

Indicadores	Impactos de la certificación	
Impactos medioambientales	Disminución energía de uso convencional	Entre 50% y 70%
	Disminución agua	40%
	Disminución coste de los residuos	70%
	Disminución gastos de mantenimiento	Entre 7% y 8%
Amortizaciones	A partir del segundo año	

Es obligatorio el uso de asesores acreditados externos independientes al equipo de proyecto, lo que le confiere credibilidad técnica y transparencia.

Se aplica un cuestionario definido al proyecto, y se van obteniendo puntos en función de la inclusión en el mismo, de una serie de estrategias. Cada crédito tiene un máximo de tres puntos que se pueden obtener (los créditos obligatorios también puntúan), y que se debe multiplicar por el factor de ponderación regional, para obtener su resultado parcial. Estos resultados parciales para cada crédito se suman para obtener el resultado global. En base a esta puntuación global, y una vez comprobado que todos los créditos obligatorios han sido cumplidos, se confirma el nivel de certificación alcanzado (ver niveles definidos anteriormente). Al final se calculan los puntos totales obtenidos y se otorga una calificación al proyecto, acompañada de un número de estrellas. Los puntos necesarios para las distintas categorías de acreditación son los siguientes:

Tabla 3.3. Puntos necesarios para las distintas categorías de acreditación BREEAM.

Pass	≥ 25
Good	≥ 40
Very Good	≥ 55
Excellent	≥ 70
Outstanding	≥ 85

El sistema BREEAM puede ser utilizado en las siguientes etapas:

ETAPA 1: Propuesta e inscripción del “Esquema de Evaluación de Cumplimiento”. Es el primer paso para poder obtener una certificación BREEAM. El Asesor BREEAM debe elaborar el ‘Esquema de Evaluación de Cumplimiento’. Para ello puede partir de una “Metodología de Evaluación de Cumplimiento”, y a partir de esta Metodología, identificar las cuestiones específicas de sostenibilidad económica, medioambiental y social para el desarrollo determinado a evaluar. Debe hacerse desde la perspectiva tanto de las Autoridades Locales como del Equipo de diseño (las Metodologías también pueden ser útiles para negociaciones con ambos). Una vez detectados los objetivos, el

Asesor redactará el Esquema de Evaluación de Cumplimiento propuesto, que debe ser enviado a BRE Global para su aprobación, previo a la puesta en marcha del proceso de Certificación.

ETAPA 2: Certificado BREEAM provisional. Se realiza una vez finalizado el Anteproyecto. Es una evaluación provisional (y opcional) en una fase preliminar del diseño, determinando el grado de cumplimiento de los objetivos ya determinados. No se indica un nivel de certificación, solo se indica si el informe presentado ha sido aprobado o no. Su objetivo es promover que se consideren estos aspectos desde las fases iniciales de redacción del proyecto, lo que facilite que se reduzca el coste asociado a su implementación.

ETAPA 3: Certificado BREEAM definitivo: completado al final de la fase de Proyecto de Ejecución. Es una evaluación final para determinar el nivel de cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad alcanzado por el desarrollo. Para obtener la certificación, el Asesor calcula la puntuación final alcanzada y envía el informe a BRE Global, que realiza una auditoria para verificar la calidad (Quality Assurance) y en caso de resultado positivo, expide el Certificado para la fase en que se encuentre el desarrollo.

3.1.2. SISTEMA LEED

El sistema de clasificación de edificios sostenibles LEED (acrónimo en inglés de Liderazgo en Diseño Energético y Ambiental) es un método americano que ha sido ideado por el World Green Building Council (WGBC) y ha sido uno de los que más se ha expandido internacionalmente.

El ámbito de evaluación de LEED se extiende a través de todo el ciclo de vida, desde la etapa de planteamiento urbanístico, hasta la de operación y mantenimiento del edificio. Ha creado sistemas para diferentes niveles de desarrollo y tipologías más significativas.

El desarrollo de los sistemas de calificación dentro del U.S. Green Building Council (USGBC) se desarrolla por parte de Comités específicos creados para cada uno de los diferentes sistemas. Dichos comités están compuestos por profesionales y expertos representantes de los distintos sectores representativos de la industria de la construcción. Los elementos clave del proceso de redacción y actualización posterior de los cuestionarios son:

- Creación de un Comité estructurado y equilibrado, con transparencia en la toma de decisiones y reuniones. Dicho Comité es específico para cada uno de los sistemas de certificación, y se ocupará de su redacción, implantación y seguimiento.

- Redacción del Cuestionario con apoyo de los Grupos de asesoramiento Técnico formados por expertos que aportan el conocimiento científico y técnico.
- Proceso que genere oportunidades para que todos los interesados puedan participar y opinar.
- Votación de los sistemas de certificación por parte de los miembros del USGBC.
- Continuación de un proceso abierto que facilite y propicie la recepción de sugerencias y comentarios y su incorporación en los sistemas de certificación.

Los Comités están compuestos por miembros del USGBC o de empresas asociadas al mismo. Cualquier miembro puede solicitar su admisión en cualquiera de los comités (cuando quedan vacantes se realizan convocatorias públicas), con un periodo de permanencia máximo en el mismo de 4 años. Cualquier miembro del USGBC puede solicitar que se le informe periódicamente de la evolución de los sistemas, o recibir las actas de las reuniones, etc. En la página del USGBC se pueden consultar los nombres de los integrantes de cada uno de los Comités y Grupos de Asesoramiento Técnico.

Los sistemas se organizan según diferentes áreas de eficiencia. Cada una de estas cuanta con una serie de prerequisites y créditos opcionales a cumplir, necesarios para obtener el nivel de certificación final del edificio. Para poder acceder al proceso de certificación LEED en el edificio, se debe satisfacer obligatoriamente todos los prerequisites y optar a un mínimo de puntos.

Todos los sistemas de clasificación LEED utilizan la metodología de la lista de verificación y constan de 100 puntos básicos. Adicionalmente, se puede obtener un plus de hasta 10 puntos en los créditos de Innovación en el diseño y Prioridad regional.

Para el caso concreto de LEED Nueva Construcción, los requisitos están organizados en siete categorías con prerequisites (obligatorios de obtener para obtener la certificación final) y créditos que llevan asociados puntos para la calificación del objeto evaluado. Así se tienen 100 puntos básicos, 6 posibles de Innovación en el Diseño y 4 puntos en Prioridad Regional.

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestra la ponderación de los diferentes créditos existentes en función de cómo está repartida la puntuación y el impacto que la certificación puede tener sobre los diferentes indicadores.

3. Sistemas de Certificación y Estudio Comparativo

Tabla 3.4. Puntuaciones y ponderaciones de los créditos de evaluación de LEED.

Créditos	Puntuación	Ponderación
Parcelas sostenibles	26	24%
Eficiencia en agua	10	9%
Energía y atmósfera	35	32%
Materiales y recursos	14	13%
Calidad ambiental interior	15	14%
Innovación en diseño	6	5%
Prioridad regional	4	3%
PUNTOS TOTALES	110	100 %

Las cinco primeras recogen la inclusión en el proyecto de estrategias ya definidas. Su estructura se basa en la inclusión de una serie de “prerrequisitos” cuyo cumplimiento es obligado para poder obtener la acreditación LEED, y de una serie de Créditos opcionales, pero cuyo cumplimiento supone la suma de puntos, que son los que finalmente permitirán alcanzar la acreditación o uno de los nivel superiores (Plata, Oro y Platino). La sexta (Innovación y Proceso de Diseño), se incluye para permitir reconocer también el impacto positivo de estrategias específicas que puedan plantear los redactores en el proyecto analizado. Así mismo, dentro de esta área se prevé un punto para aquellos proyectos que en el equipo redactor incorporen a un miembro acreditado LEED. La séptima (Créditos de Prioridad Regional) se añade durante la fase Piloto para poder reconocer y valorar las características diferenciales de cada territorio.

Tabla 3.5. Impacto de la certificación LEED en diferentes indicadores.

Indicadores	Impactos de la certificación	
Impactos medioambientales	Disminución energía de uso convencional	Entre 30% y 70%
	Disminución agua	Entre 30% y 50%
	Disminución coste de los residuos	Entre 50% y 90%
	Disminución emisiones de CO ₂	35%
Sobrecoste construcción y diseño	Un edificio con nivel plata puede aumentar su presupuesto total en más de 1,8%	
Amortizaciones	A partir del tercer año	

Se aplica un cuestionario predefinido por USGBC al proyecto, y se van obteniendo puntos en función de que determinadas estrategias se hayan incorporado en el mismo. Cada crédito tiene un máximo de puntos que se pueden obtener. Los créditos obligatorios (prerrequisitos) no puntúan. Estos resultados parciales para cada crédito se suman para obtener el resultado global. Al final, se suman todos los puntos

obtenidos, y en función del resultado, se otorga una clasificación al proyecto. Los puntos necesarios para las distintas categorías de acreditación son los siguientes:

Figura 3.3. Puntos necesarios para las distintas categorías de acreditación LEED.

Los requisitos mínimos del Programa de LEED definen las características mínimas que debe poseer un edificio para ser elegible para certificación bajo LEED. Estos requisitos mínimos son:

1. Obligación de cumplir las Leyes Ambientales.
2. Debe ser un edificio.
3. Debe utilizar unos límites de la parcela razonables.
4. Debe cumplir los requisitos mínimos de ETC (equivalencia a tiempo completo) y superficie de suelo.
5. Debe cumplir los índices mínimos de ocupación (IMO).
6. La actividad de registro y certificación debe cumplir unas tablas de tiempos y unas fechas de finalización del sistema razonables.
7. Debe permitir el acceso del USGBC a los datos de consumo de energía y agua de todo el edificio.
8. Debe cumplir una relación mínima entre la superficie del edificio y la superficie de la parcela.

Dado que el programa está diseñado para la certificación de proyectos con periodos de construcción mucho más largos que los de un edificio aislado, el proceso de certificación ha sido modificado respecto al proceso 'tipo' de certificación de edificios de LEED, previendo formas de pre-certificación en etapas iniciales del proyecto, pero asegurando que al completarse los proyectos hayan desarrollado las ideas inicialmente previstas. De esta forma, se plantea una certificación en tres etapas:

ETAPA 1: Pre-revisión opcional. Esta etapa es opcional, y su misión principal es permitir a los promotores del desarrollo obtener un tipo de pre-evaluación que puedan utilizar a la hora de conseguir acuerdos con las autoridades locales, etc.

ETAPA 2: Certificación del proyecto aprobado. Una vez que el Proyecto ha obtenido los permisos necesarios para su desarrollo.

ETAPA 3: Certificación del proyecto ejecutado. Una vez que el proyecto esta Completado o casi completado.

Así el camino que utiliza LEED en sus certificaciones podría resumirse de la siguiente manera:

Figura 3.4. Desarrollo del sistema de LEED

3.1.3. SISTEMA CASBEE

El CASBEE fue desarrollado por el Institute for Building Environment and Energy Conservation-IBEC conjuntamente con representantes de la industria local y representantes del medio académico e institucional de Japón.

El objetivo del sistema es evaluar y certificar grupos de edificaciones o proyectos a escala urbana, a partir de la verificación de las estrategias adoptadas en el objeto de certificación, con énfasis en los fenómenos exteriores al límite de la edificación y las relaciones que se establecen entre las edificaciones y el espacio exterior.

Según la organización, el sistema fue establecido para servir como instrumento para la planificación de proyectos urbanos, ayudar a promover el etiquetado ecológico para urbanismo, colaborar en la evaluación y planteamiento de estrategias para la economía de energía en la escala urbana y estimular la concienciación de los aspectos ambientales. Además, ha sido desarrollado según cuatro políticas fundamentales:

- 1.- Permitir la evaluación de los aspectos ambientales de las edificaciones.
- 2.- Ser tan sencillo como sea posible.
- 3.- Ser aplicable a una gran variedad de objetos y casos.
- 4.- Considerar los asuntos y problemas específicos de Japón y Asia.

El sistema CASBEE de evaluación y certificación también utiliza la metodología de lista de verificación y busca considerar todas las etapas del ciclo de vida del entorno construido en los requisitos del sistema.

Los parámetros de evaluación son organizados a partir de dos temas conceptuales base, la Calidad ambiental interior del proyecto “Q” (quality) y la Carga ambiental al exterior “L” (Load), que han sido definidos a partir de los límites de influencia del objeto evaluado: el límite hipotético de la edificación y el límite hipotético del área urbana evaluada.

La metodología busca específicamente verificar a través de un listado de requerimientos y especificaciones técnicas la reducción del impacto al exterior y la elevación de las calidades ambientales internas en el límite hipotético del desarrollo, en comparación con un objeto de referencia, definido a partir de las características básicas del objeto evaluado pero con las estrategias de diseño, gestión y equipamiento estándares, usualmente utilizadas en la práctica local.

La certificación final se obtiene a partir del valor del indicador BEE final, resultado de la media ponderada de los indicadores BEE de cada categoría. Así, tenemos:

Tabla 3.6. Puntuación necesaria para las distintas categorías de acreditación

– BEE = 3.0 o más, Q=50 o más: <i>Excellent (S)</i>	*****	5 estrellas
– BEE entre 1.5 y 3.0: <i>Very Good (A)</i>	***	4 estrellas
– BEE entre 1.0 y 1.5: <i>Good (B+)</i>	**	3 estrellas
– BEE entre 0.5 y 1.0: <i>Fairly Poor (B-)</i>	*	2 estrellas
– BEE menor de 0.5: <i>Poor (C)</i>		1 estrella

Para la presentación de los resultados se utiliza un gráfico que tiene “L” (carga ambiental) en el eje X y “Q” (calidad ambiental) en el eje de las Y, de modo que el resultado con el BEE final se visualiza en la pendiente del gráfico.

3. Sistemas de Certificación y Estudio Comparativo

Figura 3.5. Gráficos resultados de la evaluación CASBEE.

Los requisitos del sistema de evaluación son un total de 83 y están organizados en 31 subcategorías, que a su vez componen las seis categorías, tres relacionadas con la calidad ambiental y tres relacionadas con los impactos ambientales del desarrollo.

Las seis categorías repercuten de modo diferenciado en la evaluación pues son sometidas a pesos que varían en función de la ubicación del objeto evaluado, si está insertado en un tejido urbano consolidado o si se localiza fuera del área urbana consolidada.

Para un objeto de evaluación dentro de un área urbana consolidada, los pesos establecidos dan prioridad por un lado (Q) al capítulo relacionado el rendimiento de los servicios locales y por otro (L) al capítulo relacionado con las infraestructuras sociales.

Tabla 3.7. Categorías y pesos de la certificación CASBEE

Categorías	Peso centro	Peso general	Subcategorías	Créditos
Q _{ud} 1 Medio natural	0,25	0,35	5	17
Q _{ud} 2 Actuaciones de los servicios a escala local	0,45	0,35	6	15
Q _{ud} 3 Contribución a la comunidad local	0,30	0,30	4	8
LR _{ud} 1 Impacto ambiental	0,30	0,35	6	16
LR _{ud} 1 Infraestructura social	0,45	0,35	6	14
LR _{ud} 1 Gestión del medio ambiente local	0,25	0,30	4	13

3.1.4. SISTEMA GBCe - VERDE

Green Building Council España (GBCe) es una organización sin ánimo de lucro, asociada a “World Green Building Council”, WGBC, de la que constituye el Consejo español.

El sistema de certificación VERDE (acrónimo de Valoración de Eficiencia de Referencia De Edificios), nace como la regionalización de GBTool desarrollada en el entorno de la organización internacional Green Building Challenge. Se trata de una herramienta española de evaluación de la sostenibilidad del edificio en las tres áreas principales, la medioambiental, la social y la económica.

El sistema de evaluación se basa en un método de acuerdo con la filosofía del Código Técnico de la Edificación y las Directivas Europeas y actualmente, solo es posible certificar con VERDE la nueva edificación o gran rehabilitación de edificios multiresidenciales y oficinas. La herramienta de evaluación VERDE recoge los planteamientos de las normas ISO y CEN de la sostenibilidad y evalúa la reducción de los impactos del edificio y su emplazamiento por la implementación de medidas, tanto en estrategias de diseño como en factores de rendimiento, agrupadas en una lista de criterios. El procedimiento utiliza un método similar al método de evaluación energética de edificios.

Los criterios están agrupados por áreas temáticas similares a las de LEED y BREEAM. A cada criterio se le asocia una puntuación de referencia llamada benchmark. Estos valores se establecen a partir de la revisión de la reglamentación, ordenanza, etc.

Esta estructura permite que se reflejen las diferencias en las prioridades de las diferentes regiones y así asegurar que el sistema produce resultados que son significativos para la localidad donde se ubica el edificio.

Al igual que la certificación BREEAM, en VERDE es obligatorio el uso de asesores acreditados externos independientes al equipo de proyecto, lo que le confiere credibilidad técnica y transparencia.

Figura 3.6. Puntos necesarios para las distintas categorías de acreditación Verde

Los resultados de la evaluación se expresan en base a la reducción de impacto ambiental del edificio comparado con un edificio de referencia. El peso asignado a cada impacto está relacionado con la importancia de dicho impacto en la situación mundial en aquellos impactos globales y de la situación del entorno en aquellos impactos locales y regionales. La ponderación de los diferentes criterios e impactos asigna una puntuación final al edificio. Este método está basado en una aproximación al análisis de ciclo de vida.

Fase	Escenario	Proceso incluido
I. Fase de producto	A1. Producción de materias primas A2. Transporte A3. Fabricación	Análisis de la "cuna hasta la puerta de la fábrica" de los productos (materiales constructivos, equipamiento, etc.) que constituyen el edificio. Si se usan materiales reciclados, se deben incluir los procesos de recogida y reciclado de los residuos. Los impactos de fabricación de los bienes capitales (camiones, grúas, fábricas, etc.) no deben incluirse.
II. Fase de transporte	A 4 Transporte hasta la obra	Transporte de los materiales y productos desde la puerta de la fábrica hasta la obra
III. Fase de construcción	A5 Proceso de instalación / construcción	Se incluyen los materiales, productos, la energía y los procesos de gestión de residuos necesarios o derivados de los procesos de construcción.
IV. Fase de uso	B1 Uso o aplicación del producto instalado	Impactos que ocasionan los componentes del edificio durante su uso normal anticipado. Por ejemplo: emisión de sustancias (como compuestos orgánicos volátiles) desde la fachada, cubierta, pavimentos u otras superficies interiores o exteriores
	B2 Uso de energía operacional (consumo de energía e impactos derivados durante el uso del edificio)	El análisis debe incluir la energía utilizada durante el uso del edificio, así como sus impactos ambientales asociados, para las siguientes funciones: - Calefacción - Refrigeración - Ventilación - Agua caliente sanitaria (ACS) - Iluminación - Automatización y control Adicionalmente, se incluyen también el uso de energía para otros sistemas (ascensores, escaleras, sistemas de seguridad...).
	B3 Uso de agua operacional	Consumo de agua e impactos derivados durante el uso del edificio.
	B4 Calidad ambiental interior y reducción de emisiones	Calidad del aire, confort y salud de los ocupantes en periodo de uso
V. Fase de fin de vida	C1. Deconstrucción	Todos los procesos que se producen in-situ desde el desmontaje hasta la demolición, incluyendo el desmontaje, la separación de materiales y componentes u otros.

Figura 3.7. Fases del sistema CBCe-VERDE

Los criterios son entidades que permiten caracterizar el edificio a través de aspectos específicos (consumo de la energía primaria, emisiones de CO₂, consumo de agua potable, etc.). Para hacer operativa la evaluación de cada criterio, es necesario asociar cada criterio con uno o más impactos y el indicador que suministra un valor numérico y su unidad de medida (kWh/m² año, kg CO₂ equiv./ m² año, l/persona día).

Figura 3.8. Criterios y etapas del ciclo de vida relacionados con VERDE.

(Fuente: VERDE)

Los criterios a evaluar se estructuran en dos grandes grupos: los relacionados con la parcela (A) y los asociados al edificio agrupados en distintas categorías (B-F).

A Parcela y emplazamiento

1. Estrategias para la clasificación y el reciclaje de residuos.
2. Uso de plantas autóctonas.
3. Uso de árboles para crear áreas de sombra.
4. Efecto isla de calor a la altura del suelo.
5. Efecto isla de calor a la altura de la cubierta.
6. Contaminación lumínica.

B Energía y atmósfera

7. Uso de energía no renovable incorporada en los materiales de construcción.
8. Energía no renovable en el transporte de los materiales de construcción.
9. Consumo de energía no renovable durante la fase de uso. Demanda y eficiencia de los sistemas.
10. Demanda de energía eléctrica en la fase de uso.
11. Producción de energía renovable en la parcela.
12. Emisiones de sustancias foto-oxidantes en procesos de combustión.
13. Emisiones de sustancias que reducen el ozono estratosférico.

C Recursos naturales

14. Consumo de agua potable.
15. Retención de aguas de lluvia para su reutilización.
16. Reutilización de aguas grises.
17. Impacto de los materiales de construcción. Reutilización y uso de materiales reciclados.
18. Impacto de los materiales de construcción. Desmontaje, reutilización y reciclado al final del ciclo de vida.
19. Impactos generados en la fase de construcción. Residuos de construcción.

D Calidad del ambiente interior

20. Toxicidad de los materiales de acabado interior.
21. Concentración de CO₂ en el aire interior.
22. Limitación a la velocidad del aire en las zonas con ventilación mecánica.
23. Eficiencia de la ventilación en las áreas con ventilación natural.
24. Confort térmico en los espacios con ventilación natural.
25. Iluminación natural en los espacios de ocupación primaria.
26. Deslumbramiento en las zonas de ocupación no residencial.
27. Nivel de iluminación y calidad de la luz en los puestos de trabajo.
28. Protección frente al ruido a través de la envolvente y zonas de ocupación primaria.
29. Protección frente al ruido generado en el recinto de instalaciones en las zonas de ocupación primaria.
30. Protección frente al ruido entre aéreas de ocupación primaria. Particiones y medianeras.

E Calidad del servicio

- 31. Eficiencia de los espacios.
- 32. Disponibilidad de un sistema de gestión.
- 33. Capacidad de control local del sistema de iluminación, en las áreas de ocupación no residencial.
- 34. Capacidad de control local de los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, en las áreas de ocupación no residencial.
- 35. Desarrollo e implementación de un plan de gestión de mantenimiento.

F Aspectos sociales y económicos

- 36. Mejora el acceso para personas con discapacidad.
- 37. Derecho al sol.
- 38. Acceso a espacios abiertos privados desde las viviendas.
- 39. Protección a las vistas del interior de las viviendas desde el exterior.
- 40. Acceso visual desde las áreas de trabajo.
- 41. Coste a lo largo del ciclo de vida. Coste de construcción.
- 42. Coste a lo largo del ciclo de vida. Coste de explotación.

Entre el valor de referencia 0 y el máximo obtenible 5, se realiza una interpolación lineal. Según la calificación obtenida, el edificio obtiene uno de los posibles niveles de certificación: 0 hojas, 1 hoja, 2 hojas, 3 hojas, 4 hojas y 5 hojas.

3.2. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS CERTIFICACIONES MÁS IMPORTANTES

A continuación se van a analizar de manera particular los parámetros de sostenibilidad base de las certificaciones y las prioridades que determinan la elección de los criterios de evaluación de cada uno de los sistemas.

Dado el carácter de lista de verificación de todos los sistemas de certificación analizados, a excepción de MIVES que al tratarse de una elección multi-criterio no se incluye en esta comparativa, los parámetros de sostenibilidad considerados no se encuentran explícitamente, sino que se establecen a través de las estrategias o consideraciones predeterminadas en los requisitos de los sistemas de evaluación. Por tanto, el análisis se realiza a partir de la traducción y comprensión de los requisitos de los tres sistemas evaluados, así como de la distribución de puntos y pesos asignados a éstos.

La estructura base para la reorganización común de los requisitos y análisis de los criterios parte de la previa identificación de los temas generales y específicos que se abordan en los requerimientos.

Para ello se establecen tres niveles de análisis, el primero de ellos con tres grupos de análisis definidos a partir de los aspectos clave de la sostenibilidad: el ambiental, el social y el económico, con las variantes intrínsecas a estos tres aspectos, el segundo de ellos basado en los impactos asociados a la extracción y el procesamiento de los materiales y el último de ellos asociado a los residuos generados durante las obras.

Es importante destacar que los grupos para el análisis no poseen límites bien definidos, ya que su definición es difusa y están muy interrelacionados. Esto se debe a que los temas se organizan en múltiples estrategias y requerimientos y conjuntamente determinan el grado de sostenibilidad de los objeto de estudio.

3.2.1 Primer nivel de análisis. Ambiental, Social y Económico

El criterio fundamental para la clasificación de los requerimientos se establece a partir del objetivo específico y del ámbito de influencia directa de la estrategia, pero es necesario valorar también la repercusión de la estrategia o acción puede alcanzar uno o todos los ámbitos de análisis.

En el grupo de **aspectos ambientales** se encuentran todos los requerimientos de los sistemas que directamente hacen referencia al medioambiente natural, según tres temas generales:

- Territorio: Requerimientos relacionados con la localización del desarrollo urbano, el uso y la ocupación de suelo. Abordan aspectos como la localización dentro o fuera del área urbana consolidada, urbanización en suelo previamente urbanizado, preservación de suelo productivo etc.
- Biodiversidad: Requerimientos que abordan la conservación o potenciación de hábitats y recursos naturales, como la dotación de espacios verdes, vegetación autóctona planeamiento y gestión del ambiente natural.
- Calidad Ambiental: Requerimientos que se relacionan con el control de las variables físicas y el confort ambiental en los espacios libres.

En el grupo de los **aspectos económicos** se encuentran todos los requerimientos de los sistemas que directamente hacen referencia a requerimientos de base económica:

- empleo
- actividad económica local
- etc.

En el grupo de los **aspectos sociales** se encuentran todos los requerimientos de los sistemas que directamente hacen referencia a la calidad social del desarrollo urbano y la cohesión social.

- salud
- bienestar
- etc.

En el **grupo "otros"** se encuentran los puntos que hacen referencia a la certificación del edificio. Para LEED además se han incluido en este apartado los aspectos de innovación y prioridad regional, o la innovación para BREEAM.

Figura 3.9. Comparativa de pesos de las diferentes certificaciones en el primer nivel de análisis

La verificación cuantitativa de las prioridades de cada sistema ha sido realizada mediante la cuantificación del peso relativo (en porcentaje) de cada requerimiento, analizándose en el contexto del sistema. En la Figura 3.20 se pueden ver los resultados obtenidos.

En el caso de la certificación LEED, se han excluido del análisis cuantitativo los prerrequisitos del sistemas, ya que son condiciones y no repercuten en la certificación final. Además, prácticamente todos los temas de los prerrequisitos del sistema son abordados también en los créditos que puntúan y determinan la calificación del objeto evaluado.

En el caso de la certificación VERDE, se han tenido en cuenta tanto los criterios para la medidas incorporadas al proyecto como los impactos asociados a esas medidas. Valorando el peso de cada criterio sobre los impactos asociados.

Tabla 3.8. Tabla comparativa de la estructura y organización de los sistemas de certificación

Tabla comparativa de los sistemas de certificación			
	LEED	BREEAM	VERDE
Organización	USGBC - United State Green Building Council	BRE Global	World Green Building Council
Metodología	Lista de verificación	Lista de verificación	Lista de verificación
Categorías	4 temas abstractos con límites difusos: SLL - Smart Location & Linkage NPD - Neighborhood Pattern & Design GIB - Green Infrastructure & Building IDP - Innovation & Design Process	8 temas concretos y objetivos: CE - Climate & Energy RES - Resources TRA - Transport ECO - Ecology BUS - Business COM - Community PS - Place Shaping BLD - Building	2 grupos conceptuales (Quality & Load) y 6 temas: QUD1 - Natural Environment QUD2 - Service functions for the designated area QUD3 - Contribution to the local community LUD1 - Environmental Impact on Microclimates, Facade & Landscape LUD2 - Social Infrastructure LUD3 - Management of the local Environment
Requerimientos	56 en total	51 en total	83 en total
Requerimientos obligatorios	12 obligatorios (no considerados para el análisis comparativo)	23 obligatorios	--
Requerimientos optativos	44 créditos optativos	28 créditos optativos	83 créditos optativos
Sistema de puntos	Puntos variables determinados para cada requerimiento optativo y según la opción que se cumpla	Puntos fijos (1, 2 o 3) para todos los requerimientos, incluidos los obligatorios, según la opción de requerimientos atendida	Niveles de cumplimientos (1 a 5) para todos los requerimientos
Sistema de ponderación	NO	SI - Valores definidos por un asesor BREEAM según la localización y contexto geopolítico	SI - Según la localización del objeto y créditos auto determinados de importancia social con peso duplicado
Sistema de clasificación	4 niveles: LEED certificate (de 40 a 49) LEED silver (de 50 a 59) LEED gold (de 60 a 79 pts) LEED platinum (más 80)	5 niveles: Pass (entre 25 y 39%) Good (entre 40 y 54%) Very good (entre 55 y 69%) Excellent (entre 70 y 84%) Outstanding (más de 85%)	5 niveles: Excellent - S (BEE Very good - A ($1,5 \leq BEE < 3,0$) Good - B ($0,5 \leq BEE < 1,0$) Fairly Poor - B ($0,5 \leq BEE < 1,0$) Poor - C ($BEE < 0,5$)
Herramienta de evaluación	Tabla Excel para autoevaluación, disponible gratuitamente; LEED online, software en formato de tabla para evaluación final, necesario inscripción y pago de cargos para acceso	Regional Checklist (herramienta online) para autoevaluación, disponible gratuitamente, software en formato de tabla para evaluación final por un asesor	
		BREEAM, necesario registro y pago de cargos	Tabla Excel para autoevaluación disponible gratuitamente

En las tres certificaciones analizadas son verificados los requerimientos relacionados tanto con los recursos básicos, es decir agua, energía y materiales, como los residuos sólidos generados.

Las certificaciones de LEED y VERDE dedican créditos a la polución y la gestión de los impactos de la construcción. VERDE a su vez le otorga gran importancia al tratamiento de los residuos generados. Los valores medios de los aspectos considerados en las tres certificaciones otorgan una mayor importancia a los recursos energéticos, y en orden decreciente al agua, materiales y residuos.

Figura 3.10. Pesos de cada certificación por categorías en el primer nivel de análisis
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.2 Segundo nivel de análisis. Materiales

La evaluación de este apartado se establece a través de los impactos asociados a los materiales, y tiene como objetivo reducirlos mediante la elección de materiales de bajo impacto ambiental durante el ciclo de vida del edificio. Para ello se realiza un estudio de como busca este objetivo cada una de las certificaciones estudiadas.

3.2.2.1 Materiales de bajo impacto ambiental

BREEAM

Busca impulsar la utilización de materiales de construcción de bajo impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del edificio.

La tabla 3.9. muestra las puntuaciones y los criterios exigidos para la obtención de puntos.

Tabla 3.9. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Materiales

Puntuación	Criterio
1 punto	Si los componentes principales de dos de los elementos de la tabla 5.2, siendo uno o Particiones verticales o Revestimiento de suelos, disponen de una etiqueta tipo II (Autodeclaración).
2 puntos	Si los componentes principales de dos de los elementos de la tabla 5.2 disponen de una etiqueta Tipo I o Tipo III.
3 puntos	Si se demuestra que utilizar una herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para seleccionar materiales influye positivamente (1) en tres elementos del edificio, siendo uno o particiones verticales o revestimiento de suelos.
4 puntos	Cuando se demuestre que la utilización de una herramienta de ACV para la selección de materiales influye positivamente en cuatro de los elementos del edificio, siendo al menos uno o Particiones verticales o Revestimiento de suelos.
4 puntos + punto extra diseño (Nivel ejemplar)	Cuando se demuestre que la utilización de una herramienta de ACV, la cual cumple los requisitos especificados en el apartado Notas importantes, influye positivamente en seis de los elementos del edificio.

Los componentes principales de los elementos del edificio deben contener productos y materiales que dispongan de etiquetas ambientales (Tipo I, Tipo II y Tipo III) o utilizar una herramienta ACV para seleccionar qué componentes utilizar con la finalidad de realizar un análisis del ciclo de vida de los componentes.

Para cumplir los requisitos de puntuación del crédito, al menos el 80% de los componentes principales de los elementos deben disponer de etiquetas ambientales. Si se utiliza una herramienta de ACV aceptadas por BREEAM, ésta debe haber influido positivamente en el 100% de los componentes principales de los elementos del edificio que se elijan. La influencia positiva en el diseño se puede demostrar realizando un análisis completo que compare un edificio tipo y el edificio evaluado.

Tabla 3.10. Composición de las principales estructuras en BREEAM

Elementos	Ejemplos de los componentes principales
Estructuras (incluye forjados)	Hormigón armado, madera, ladrillo, hormigón prefabricado, acero, piedra, viguetas, bovedillas, etc.
Fachadas	Ladrillo, bloque hormigón, piedra, panel metálico, hormigón prefabricado, revestimientos (baldosas, madera, pintura), etc.
Ventanas	Aluminio, PVC, madera, vidrio, etc.
Cubiertas	Teja, pizarra, sintéticos, fibrocemento, paneles galvanizados y prelacados, etc.

LEED

Para el ámbito de los impactos de los materiales de la construcción, LEED no contempla ningún requisito para su valoración.

VERDE

Reducir los impactos asociados a la producción de los materiales de construcción. Elige materiales de bajo consumo durante la extracción y transformación y se utilizan materiales recuperados y reciclados.

Tabla 3.11. criterios adicionales en VERDE. Materiales

Referencias	Criterio
Práctica habitual	Impactos iguales al edificio de referencia.
Mejor práctica	Un 20% menos de los impactos generados por el edificio de referencia.

3.2.2.2 Materiales Reciclados y Reutilizados

Existen muchos productos de construcción que se componen de materiales reciclados como por ejemplo tejas de asfalto orgánico que contienen papel reciclado, perfiles de plástico reciclado, tejas hechas de fibras de maderas remanufacturadas, tableros rígidos fabricados a partir de un triturado de restos de moqueta, aislantes de celulosa fabricados con papel de periódico refinados, etc.

Además de materiales reciclados, también existen muchos materiales que pueden ser reutilizados, restaurados o recuperados. Los materiales se diseñan para ser usados en un ciclo de vida, pero habitualmente se fabrican con materiales duraderos y ricos que podrían aguantar más usos. La reutilización de materiales, supone un menor impacto que el reciclaje de materiales por tanto, es una prioridad en la construcción sostenible y en las certificaciones medioambientales se intenta fomentar su uso.

La utilización de materiales con contenido en material reciclado o materiales reutilizados, repercutirá principalmente en la disminución del uso de materiales vírgenes, en la reducción de residuos medioambientales y en el impacto ambiental asociados con la extracción y el procesado de materias primas.

BREEAM

Pretende valorar el uso de áridos reciclados y áridos secundarios en la construcción de manera con la finalidad de que se reduzca la demanda de material virgen.

Los áridos reciclados pueden obtenerse de la obra o de instalaciones de procesado de residuos que cumplan las condiciones que se especifican en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Materiales Reciclados

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se demuestra que la cantidad de áridos reciclados y áridos secundarios supera el 25% (por peso o volumen) del total de áridos de alta calidad utilizados.

Se consideran áridos de alta calidad todos aquellos que tienen los siguientes usos:

- Ligados: Marcos estructurales, forjados (incl. losas de piso), substancias bituminosas/capas de asiento, aglutinante/superficie ligadas hidráulicamente para asfaltar o para carreteras.
- Suelos: Calzadas con base de asfalto o similares, rellanos y sellados granulados, lechos de apoyo para tuberías, sub-bases/cimientos, paisajismo con grava.

Tabla 3.13. Requisitos exigidos para instalaciones de procesamiento de residuos en BREEAM.

Tipo de obra	Criterio
Obras mayores	Distancia máxima: 25 km de la instalación a la obra
Obras ubicadas en poblaciones de más de 200.000 habitantes.	
Obras menores	Distancia máxima: 80 km de la instalación a la obra
Obras no ubicadas en zonas de concentración poblacional importante.	

LEED

Leed incluye dos puntos distintos y diferencia entre contenido en materiales reciclados y reutilización de materiales.

Para el contenido en materiales reciclados, tiene como objetivo incrementar la demanda de productos que incluyan materiales con contenido en reciclados, y así reducir los impactos asociados a la extracción y al procesamiento de materias primas.

Tabla 3.14. Requisitos exigidos para instalaciones de procesamiento de residuos en LEED.

Puntuación	Criterio
1 punto	Si el contenido en reciclados es como mínimo un 10% del valor total de los materiales del proyecto.
2 puntos	Si el contenido en reciclados es como mínimo un 20% del valor total de los materiales del proyecto.
2 puntos + punto extra en diseño	Si el contenido en reciclados es como mínimo un 30% del valor total de los materiales del proyecto

Para la reutilización de materiales y productos del edificio tiene como objetivo que se reduzcan los residuos y la demanda de materias primas. Por este motivo, se reducen los impactos ambientales asociados con la extracción y el procesamiento de materias primas.

VERDE

Propone incentivar que el diseño facilite el desensamblaje de los componentes y así se puedan reutilizar o reciclar materiales después de su vida útil. Calcula a partir del documento guía para la recuperación y gestión de los materiales en el proceso de deconstrucción y desensamblaje del edificio, el porcentaje de materiales de cada elemento que podrá ser reutilizado al final del ciclo de vida del edificio.

De lo anteriormente dicho, se puede concluir:

Tabla 3.15. Resumen de criterios para Materiales Reciclados

IMPACTO EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS			
Características	LEED	BREEAM	VERDE
Incluye material de los componentes de las cubiertas	-	Sí	Sí
Incluye material de los componentes de los pavimentos	-	Sí	Sí
Incluye material de los componentes de las fachadas	-	Sí	Sí
Incluye material de los componentes de los cerramientos	-	Sí	Sí
Incluye material de las particiones interiores	-	Sí	Sí
Incluye material de los componentes de la estructura	-	Sí	Sí (*)
Incluye material de los componentes de las ventanas	-	Sí	Sí
Incluye material de los componentes de las puertas exteriores	-	No	Sí
Incluye material de los componentes de los aislamientos	-	Sí	Sí
Incluye materiales reutilizados/reciclados	-	Sí	Sí
Permite utilizar materiales con etiquetas Tipo I	-	Sí	No
Permite utilizar materiales con etiquetas Tipo III (EPD)	-	Sí	Sí
Permite utilizar materiales con etiquetas Tipo II	-	Sí	No
Calculo de impactos mediante herramienta ACV	-	Sí	Sí
Calculo de impactos mediante base de datos BEDEC - No Sí	-	No	Sí
Incluye reutilización de las fachadas (1)	Sí	Sí	-
Incluye paredes exteriores: medianeras y paredes en contacto con el terreno	Sí	Sí(*)	-
Incluye paredes interiores estructurales	Sí	Sí	-
Incluye forjados	Sí	Sí	-
Se incluyen cimientos	No	Sí	-
Se incluyen las vigas en los cálculos	Sí	Sí	-
Se incluyen las ventanas en los cálculos	No	No	-

(1) Cualquier cara expuesta del edificio

(*) Solo se incluye si es muro de carga

3.2.2.3 Reutilización del edificio. Elementos Estructurales

La reutilización de edificios es una estrategia muy efectiva de reducir el gran impacto ambiental que supone la construcción de un edificio. Reutilizar ya existentes reduce significativamente el uso de energía asociada a la demolición de un edificio, de los residuos de la construcción así como de los impactos asociados a la extracción de materias primas, la fabricación y el transporte.

Esta estrategia puede tener una importancia especial en lugares con áreas históricas. Reutilizando el edificio se puede incitar al desarrollo de nuevas actividades pero preservando el carácter histórico de la zona.

BREEAM

Breeam fomenta la conservación in situ de la fachada y la estructura del edificio existente.

Otorga un punto si se conserva in situ al menos el 50% de la fachada (por superficie) y al menos el 80% (por masa) de la fachada, esté compuesta por materiales reutilizados in situ. Los cálculos deben basarse en el volumen de cada material y su densidad, comparando los totales de la parte nueva y la parte conservada.

Otorga un punto si se demuestra que como mínimo el 80% de la estructura del edificio existente se conserva y la masa de material nuevo es inferior al 50% de la estructura reutilizada.

Tabla 3.16. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Elementos Estructurales

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se conserva in situ al menos el 50% de la fachada (por superficie) y al menos el 80% (por masa) de la fachada, esté compuesta por materiales reutilizados in situ.

LEED

Pretende mantener las estructuras del edificio existente y las del envoltorio.

Tabla 3.17. Puntuación y criterios exigidos por LEED. Elementos Estructurales

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se conserva un 55% de la estructura ya existente.
2 puntos	Si se conserva un 75% de la estructura ya existente.
3 puntos	Si se conserva un 95% de la estructura ya existente.

Para este crédito no se deben incluir elementos no estructurales de la cubierta, materiales de los ensamblajes de las ventanas, estructuras ni envoltentes que estén defectuosos ni materiales tóxicos o peligrosos.

VERDE

Tiene como objetivo garantizar periodos de vida útil superiores a los mínimos reglamentarios establecidos según los diferentes tipos de estructuras.

En la Tabla 3.18 se muestra una comparativa de las tres normativas en cuanto al apartado de materiales de construcción.

Tabla 3.18. Resumen de criterios para Elementos Estructurales

IMPACTO EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN REUTILIZACIÓN DEL EDIFICIO			
Características	LEED	BREEAM	VERDE
Incluye reutilización de las fachadas (1)	Sí	Sí	-
Incluye paredes exteriores: medianeras y paredes en contacto con el terreno	Sí	Sí(*)	-
Incluye paredes interiores estructurales	Sí	Sí	-
Incluye forjados	Sí	Sí	-
Se incluyen cimientos	No	Sí	-
Se incluyen las vigas en los cálculos	Sí	Sí	-
Se incluyen las ventanas en los cálculos	No	No	-

(1) Cualquier cara expuesta del edificio

(*) Solo se incluye si es muro de carga

3.2.2.4 Materiales Regionales

Actualmente, aproximadamente el 80% de la energía que se utiliza, se genera por los combustibles fósiles y constituyen el principal recurso energético. La utilización de materiales regionales contribuye a una fuerte reducción de la contaminación asociada al transporte en barco, tren, camiones u otros vehículos que consumen las reservas de

petróleo y contaminan el aire. También es importante el lugar de extracción de las materias primas ya que muchas se extraen en el mismo sitio en el que luego se manufacturará el material consiguiendo así, una reducción de los impactos ambientales causados por el transporte.

BREEAM

Para el ámbito de la utilización de materiales regionales, BREEAM no contempla ningún requisito para su valoración.

LEED

Incrementar la demanda de materiales y potenciar el uso de productos que se extraigan y fabriquen en la región. De esta forma, se apoya el uso de recursos autóctonos y se reducen los impactos medioambientales causados por el transporte.

Tabla 3.19. Puntuación y criterios exigidos por LEED. Materiales Regionales

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se demuestra que se han usado materiales o productos para el edificio que se hayan extraído, recolectado, recuperado o fabricado en un radio de 800 km de la parcela del edificio para un mínimo del 10% de los materiales.
2 puntos	Si se demuestra que se han usado materiales o productos para el edificio que se hayan extraído, recolectado, recuperado o fabricado en un radio de 800 km de la parcela del edificio para un mínimo del 20% de los materiales.

VERDE

Tiene como objetivo, reducir la cantidad de energía no renovable utilizada en el transporte de los materiales de la construcción, incentivando que se usen materiales locales.

Se deben considerar los siguientes elementos: cubiertas, forjados completos incluido pavimento, fachadas y particiones interiores incluyendo acabados.

3. Sistemas de Certificación y Estudio Comparativo

Tabla 3.20. Puntuación y criterios exigidos por VERDE. Materiales Regionales

Puntuación	Criterio
Práctica habitual	Edificio que emplea un 30% en peso de materiales de procedencia local. Se consideran locales cuando se han fabricado en un radio de 200 km desde el emplazamiento del proyecto. Distancia media de procedencia de los materiales de construcción no local: 500 km
Mejor práctica	Principal medio de transporte: Camión pesado Edificio que emplea un 100% de materiales locales.

En la Tabla 3.21 se muestra una comparativa de las tres normativas en cuanto al apartado de materiales regionales.

Tabla 3.21. Resumen de criterios para Materiales Regionales

USO DE MATERIALES REGIONALES			
Características	LEED	BREEAM	VERDE
Incluye materiales extraídos	Sí	-	No
Incluye materiales recolectados	Sí	-	No
Incluye materiales recuperados	Sí	-	No
Incluye materiales fabricados	Sí	-	Sí
Radio permitido para ser material regional	800 km	-	200 km
Incluye material eléctrico, fontanería u otro material especial	No	-	No
Incluye material no permanentemente instalado	No	-	No
Incluye materiales de las cubiertas	Sí(*)	-	Sí
Incluye materiales de los forjados	Sí(*)	-	Sí
Incluye materiales de los pavimentos	Sí(*)	-	Sí
Incluye materiales de las fachadas	Sí(*)	-	Sí
Incluye materiales de los acabados	Sí(*)	-	Sí
Incluye materiales particiones interiores	Sí(*)	-	Sí

(*) Siempre que cumpla el resto de requisitos del crédito

3.2.2.5 Uso de Compuestos Orgánicos

Los Compuestos Orgánicos Volátiles comúnmente llamados COVs son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental. La mayoría de estos compuestos, contribuyen a la generación de smog fotoquímico, al efecto invernadero y además, a la contaminación del aire y también afectan al bienestar de los ocupantes del edificio. Tienen propiedades volátiles, liposolubles, tóxicas e inflamables pero sin embargo, son muy buenos disolventes y muy eficaces para la disolución de pinturas, y para el desengrase de materiales.

Existen muchos productos de construcción que contienen compuestos nocivos para la calidad del aire interior. Los COVs pueden provenir de diferentes fuentes pero los materiales susceptibles de contener estos compuestos en los acabados de un edificio son: adhesivos y sellantes, pinturas, barnices, compuestos de madera y compuestos de fibras vegetales.

Por lo general, los efectos sobre la salud por exposición a COVs son irritantes y cancerígenos. Alrededor del 80% de los COVs que se encuentran habitualmente en el aire interior son irritantes de membranas mucosas y ojos. Con estos valores, se observa la importancia de seleccionar materiales de acabado que presenten en su constitución, concentraciones de COVs lo más bajas posible.

Para conseguir estos niveles de COVs lo más bajos posibles se deben seleccionar materiales con bajas emisiones, disponer de una buena ventilación y tener un adecuado proceso de purga del edificio antes de la ocupación entre otras posibles medidas.

BREEAM

Tiene como objetivo fomentar un ambiente interno saludable a partir del uso de revestimientos y accesorios internos que contengan bajos niveles de COVs.

Este crédito no incluye mobiliario ni accesorios como mesas o estanterías. Se deben considerar los principales acabados internos y los accesorios que están integrados en los edificios.

Tabla 3.22. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Compuestos Orgánicos

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se demuestra que al menos cinco de las siete categorías de productos de la tabla 5.29 cumplen con los estándares sobre COV y que las pinturas y barnices utilizados cumplen con los requisitos especificados.
2 puntos (nivel ejemplar)	Si se cumplen los criterios para la obtención del punto anterior y además se demuestra todas las categorías de los productos de la tabla 5.29 cumplen con los estándares sobre COV.

LEED

Disminuir la cantidad de contaminantes del aire interior que tienen mal olor, son irritantes y que pueden perjudicar el bienestar de los instaladores y ocupantes.

La certificación LEED divide el apartado de materiales de baja emisión en cuatro bloques: adhesivos y sellantes, pinturas y recubrimientos, sistemas de suelos y maderas compuestas y fibras agrícolas. A continuación se especifican los requisitos exigidos para cada grupo.

Tabla 3.23. Puntuación y criterios exigidos por LEED. Compuestos Orgánicos

Puntuación	Criterio
1 punto	Si para adhesivos y sellantes, la totalidad del contenido de COV de los materiales cumple con los requisitos que se especifican.
1 punto	Si para pinturas y recubrimientos, la totalidad del contenido de COV de los materiales cumple con los requisitos que se especifican.
1 punto	Si los sistemas de suelos cumplen los requisitos de alguna de las dos opciones especificadas a continuación.

- Opción A

Los elementos de suelos instalados en el interior del edificio deben cumplir con los requerimientos de los productos y los test requeridos por el Departamento de Servicios Sanitarios de California.

- Opción B

Todos los suelos que se utilicen deben cumplir los requisitos especificados en los siguientes puntos:

1. Los acabados de suelos de hormigón, madera, bambú y corcho como sellantes y tintes deben cumplir la Norma 1113 del SCAQMD.
2. Los adhesivos y lechada para baldosas deben cumplir la Norma 1168 del SCAQMD.
3. Los suelos de superficie dura (se incluye vinilo, linóleo, bases de paredes, suelos laminados, de madera, de cerámica o de goma) deben tener Certificación FloorScore. Este punto se puede sustituir por el cumplimiento del punto 4.
4. El 100% de los suelos que no son moqueta y que no tienen un acabado final deben tener el certificado FloorScore y deben constituir como mínimo un 25% de toda la superficie de suelo acabado. Este punto se puede sustituir por el cumplimiento del punto 3.

Tabla 3.24. Puntuación adicional y criterios exigidos por LEED. Compuestos Orgánicos

Puntuación	Criterio
1 punto	Si las maderas compuestas y fibras agrícolas cumplen los requisitos especificados.

Ni los productos de maderas compuestas y de fibras agrícolas usados en el interior del edificio ni los adhesivos para laminados utilizados para fabricar in situ y que se aplican en taller para ensamblar maderas compuestas y fibras agrícolas, deben contener resinas con urea-formaldehído añadido.

VERDE

Pretende promover y premiar el uso de materiales de acabado que no pongan en riesgo la salud de los ocupantes y eliminar antes de la ocupación, los contaminantes emitidos por los materiales de terminaciones interiores para reducir los problemas de calidad del aire interior.

En la Tabla 3.25 se muestra una comparativa de las tres normativas en cuanto al apartado de compuestos orgánicos.

Tabla 3.25. Resumen de Criterios para Compuestos Orgánicos

USO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLATILES (COVs)			
Características	LEED	BREEAM	VERDE
Incluye requisitos de emisiones para pinturas	Sí	Sí	Sí
Incluye requisitos de emisiones para adhesivos	Sí	Sí	Sí
Incluye requisitos de emisiones para recubrimientos	Sí	Sí	Sí
Incluye requisitos de emisiones para revestimientos de suelos	Sí	Sí	Sí
Incluye requisitos de emisiones para revestimientos de paredes	Sí	Sí	Sí
Incluye requisitos de emisiones para maderas compuestas	Sí	Sí	Sí
Se aplica a muebles del edificio	Sí	No	Sí(*)
Se aplica a los principales acabados interiores	Sí	Sí	Sí
Se valora una correcta ventilación del edificio	No	No	Sí

(*) Solo aplica para el mobiliario fijo

3.2.3 Tercer Nivel de Análisis. Residuos de Construcción

En este apartado se agrupan por bloques los créditos de las tres certificaciones que tratan sobre los residuos de la construcción: Gestión de residuos y Almacenamiento de

Residuos. Cada bloque incluye los créditos relacionados los cuales se han sintetizado y estructurado de forma clara y sencilla para así facilitar la consulta de información.

GESTIÓN DE RESIDUOS

Mediante una buena gestión de los residuos en la construcción sostenible, se reduce la contaminación del aire, del agua de los ríos y del mar, la producción de CO₂ y la producción de desechos sólidos entre otros muchos beneficios. Aparte de los beneficios medioambientales, gestionar de forma correcta los residuos de la construcción puede aportar beneficios económicos reciclando metales, hormigón, asfalto o cartón entre otros.

BREEAM

Quiere promover la eficiencia de los recursos a partir de una gestión efectiva y apropiada de los residuos de la obra.

Tabla 3.26. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Gestión de Residuos

Puntuación	Criterio
1 punto	Si se demuestra que se ha realizado para la fase de proyecto, un estudio de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición.
2 puntos	Si se cumple el punto uno y los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización son como mínimo un 60% en peso de los Residuo de Construcción y Demolición (RCD) totales generados en la obra.
3 puntos	Si se cumple el punto dos y los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización son como mínimo un 80% en peso de los RCD totales generado en la obra.
Nivel ejemplar (4 puntos)	Si se cumple el punto tres y el 95% de los residuos identificados en el Estudio de Gestión de Residuos (EGR) se hayan tratado con criterios de reutilización, reciclaje o valorización consiguiendo eliminar la fracción de residuos con destino a vertedero.

Obtención de 1 punto

- En la fase de redacción del proyecto se debe disponer de un EGR para regular la gestión y producción de los residuos de construcción y demolición.
- En la fase previa a la ejecución se debe pasar de un EGR a un Plan de Gestión de Residuos (PGR) definiendo para cada flujo de residuo identificado (según Lista Europea de Residuos) el tratamiento adecuado, y con unos objetivos de valorización específicos.
- Se deben cumplir las siguientes especificaciones:

- Evaluar posibles alternativas para la prevenir y minimizar la generación de residuos.
- Usar técnicas o materiales que disminuyan/eliminen los flujos comunes de residuos.
- Tener en cuenta como mínimo tres grupos clave de residuos en la fase de diseño.
- Identificar alternativas y/o mercados para materiales reciclados o valorizados para que se pueda cuantificar el beneficio ambiental derivado.
- Hacer un seguimiento con el PGR durante la construcción y plasmar las conclusiones.

Obtención de 2 puntos

- a) Haber conseguido el punto número uno.
- b) Los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización deben ser como mínimo un 60% (en peso o volumen) del RCD total generado en obra (no se cuentan los residuos peligrosos). El objetivo debe estar registrado y justificado como parte de la implementación del EGR y cuando la obra se complete.

Obtención de 3 puntos

- a) Haber conseguido el punto número dos.
- b) Los objetivos de reutilización, reciclado u otra forma de valorización deben ser como mínimo un 80% (en peso de volumen) del RCD total generado en obra de al menos las fracciones de residuos identificadas en la normativa vigente (no se cuentan los residuos peligrosos). Se debe proceder a la segregación selectiva de estos residuos en origen, para cualquier tipo de obra e independientemente de los volúmenes producidos.
- c) La fracción destinada a su eliminación a partir de su depósito en vertedero deberá ser como máximo un 20% en peso o volumen, del EGR.

Nivel ejemplar

- a) Se tiene que haber conseguido el punto número tres.
- b) Que el 95% de los residuos identificados en el EGR (los peligrosos no) hayan sido tratados con criterios de reutilización, reciclaje, valorización consiguiendo eliminar la fracción de residuos con destino al vertedero.

LEED

Desviar los residuos de la obra a vertederos e incineradoras, los materiales reciclables recuperados hacia el proceso de fabricación y los reutilizables al lugar apropiado.

Tabla 3.27. Puntuación y criterios exigidos por LEED. Gestión de Residuos

Puntuación	Criterio
1 punto	Si el porcentaje de materiales reciclados y/o recuperados es como mínimo del 50%.
2 puntos	Si el porcentaje de materiales reciclados y/o recuperados es como mínimo del 75%.

Se deberá considerar el reciclaje de cartón, metal, ladrillos, baldosas, hormigón, plástico, madera cepillada, vidrio, particiones de yeso-cartón, moquetas y aislamientos.

VERDE

Reducir residuos que se generan durante la obra del edificio usando elementos prefabricados e industriales o empleando procesos de obra.

Tabla 3.28. Puntuación y criterios exigidos por VERDE. Gestión de Residuos

Puntuación	Criterio
práctica habitual	Reducción del 0% de los residuos de la construcción
Mejor práctica	Reducción del 80% de los residuos de la construcción

Se debe calcular el volumen de residuos generados en la construcción del edificio en los elementos a evaluar.

Para este apartado se deben tener en cuenta los residuos que provienen de los materiales empleados en: cubiertas, forjados completos (incluido el pavimento), fachada y particiones interiores (incluidos acabados) y también los que se obtienen de durante la fase de construcción del edificio pero no se consideran los residuos obtenidos durante la demolición ni desmantelamiento del edificio.

En la Tabla 3.29 se muestra una comparativa de las tres normativas en cuanto al apartado de gestión de los residuos.

Tabla 3.29. Resumen de criterios para Gestión de Residuos

GESTIÓN DE RESIDUOS			
Características	LEED	BREEAM	VERDE
Se tienen en cuenta los residuos de materiales que vayan a ser recuperados	Sí	No	No
Se tienen en cuenta los residuos de materiales que vayan a ser reciclados	Sí	Sí	Sí
Utiliza la Lista Europea de Residuos o el Catálogo Europeo de Residuos (CER) como referencia para los residuos de construcción para el reciclaje	No	Sí	Sí
Se incluyen materiales peligrosos	No	No	No
Se tienen en cuenta los residuos de las excavaciones, limpieza y desbroces de terrenos	Sí	No	No
Necesario desarrollar un Plan de Gestión de Residuos de la Construcción	Sí	Sí	Sí
Necesario desarrollar un Estudio de Gestión de Residuos de la Construcción	Sí	No	No

ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS

El objetivo principal de un desarrollo sostenible es minimizar las alteraciones al medio por tanto, si se generan residuos se debe buscar que los efectos de esto sean los menos desfavorable para el medio. Desviando los residuos del vertedero se consigue que los residuos vuelvan (como materias primas) a generar un nuevo elemento consumible.

En las certificaciones medioambientales se promueve y se valora la existencia de contenedores o depósitos para la separación, almacenamiento temporal y reciclaje de residuos para garantizar la separación de residuos comunes como el plástico, papel, vidrio o residuos orgánicos para su traslado a plantas para el reciclaje. De esta forma, se promueve la cultura sostenible de la reutilización y el reciclaje.

BREEAM

Fomentar el tener instalaciones específicas para el depósito de los flujos de residuos reciclables o valorizables del edificio. De esta forma se consigue desviar estos residuos del vertedero o de la incineración.

Tabla 3.30. Puntuación y criterios exigidos por BREEAM. Almacenamiento de Residuos

Puntuación	Criterio
1 punto	Cuando se demuestre que se ha instalado en el edificio un depósito específico que sirva para los residuos específicos que se generan en la actividad del edificio (para las oficinas, normalmente los flujos de residuos serán papel y embalaje).

Para que se cumpla este requisito se deberá cumplir:

1. La zona de depósito de residuos debe cumplir:

- Estar claramente etiquetados para su recogida selectiva.
- Estar situados a menos de 20 metros de la entrada del edificio. Si no es posible, se podrán considerar alternativas que sean adecuadas para los ocupantes del edificio y los vehículos de recogida.
- El emplazamiento debe ser adecuado para el acceso de vehículos de forma que se facilite la recogida.

2. El tamaño del espacio asignado se debe adecuar a las necesidades del edificio y al volumen de residuos probable que se generarán.

LEED

Facilitar la reducción de residuos generados por los ocupantes del edificio que son transportados y depositados en vertederos.

Tabla 3.31. Puntuación y criterios exigidos por LEED. Almacenamiento de Residuos

Puntuación	Criterio
No puntúa-Obligatoria	Es obligatorio proporcionar al edificio de una zona de acceso fácil para la recogida y almacenamiento de materiales para su reciclaje.

Proveer al edificio de un área fácilmente accesible para la recogida y almacenamiento de materiales para su reciclaje. Estos materiales deben cumplir los siguientes requisitos:

- Como mínimo deben incluirse papel, cartón corrugado, vidrio, plástico y metales.
- No se pueden incluir materiales tóxicos.

VERDE

Incentivar a que existan lugares tanto en el interior como en el exterior del edificio para la separación, almacenamiento temporal y reciclaje de residuos.

- Garantizar que los residuos sólidos urbanos, orgánicos e inorgánicos sean recogidos, separados y reciclados.

- Utilizar residuos naturales para la generación de compost y el abonado de zonas verdes. Los residuos orgánicos se reciclan en plantas de biogás para la generación de energía eléctrica.
- Separar los residuos de plástico, papel y cartón, vidrio y pilas, etc. para y trasladarlos a plantas de reciclado.

Tabla 3.32. Puntuación y criterios exigidos por VERDE. Almacenamiento de Residuos

Puntuación	Criterio
Práctica habitual	Un 0% de aumento de los residuos reciclados.
Mejor práctica	Un 90% de aumento de los residuos reciclados.

En la Tabla 3.33 se muestra una comparativa de las tres normativas en cuanto al apartado de almacenamiento de los residuos.

Tabla 3.33. Resumen de criterios para Almacenamiento de Residuos

ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS				
Características	LEED	BREEAM	VERDE	MIVES
Instalar depósitos para los residuos que se generan durante la actividad del edificio	Sí	Sí	Sí(*)	
Se regula el tamaño del área de reciclaje	No	No	Sí	
Se incluyen materiales tóxicos ni peligrosos	No	No	No	
Se valoran prácticas de compostaje de residuos	Sí	Sí	Sí	
Valora la instalación de puntos de recogida de residuos individuales	Sí	Sí	No	
Valora la instalación del área de reciclaje en una zona fácilmente accesible para su recogida y almacenamiento.	Sí	Sí	Sí	

(*) Se requiere uno por cada planta del edificio

3.3. CONCLUSIONES

Una vez realizada la comparación de las herramientas disponibles, este apartado tiene como objetivo realizar un análisis y una comparación de los métodos y herramientas que acabamos de ver para la evaluación y certificación de la sostenibilidad en proyectos urbanos. Todo esto nos va a permitir valorar así los diferentes aspectos que cada una de ellas analiza en relación con el resto de certificaciones.

Como se ha dicho con anterioridad, desde el punto de vista de la sostenibilidad, analizando el edificio desde la redacción del proyecto, durante toda su vida útil y hasta su demolición, las estructuras de trabajo difieren notablemente entre unas y otras tanto en la manera de introducir los datos como en la manera en que se entregan,

trabajando muchas de ellas con una sencilla tabla excel mientras otras trabajan con plataformas más sofisticadas.

Entre todos los países, impera la necesidad de adaptación internacional de todas las certificaciones y de ahí que los grandes esfuerzos de los comités de los sistemas de certificación, se centren en la adaptación, tanto normativa como social, a diferentes realidades con las que pueden encontrarse durante su expansión territorial.

Debido a las diferencias abismales que pueden existir entre los diferentes países en cuanto a la relevancia de las condiciones ambientales, parece razonable pensar que los criterios de ponderación puedan cambiar de un país a otro, pudiendo adaptarse a las condiciones locales.

Para el análisis de las certificaciones se ha tomado la certificación para la evaluación de edificios de nueva construcción destinados a un uso para oficinas. Se ha estudiado este caso ya que, los certificados tienen una estructura muy diferente entre ellos y éste es el punto en común que permite que se realice la comparativa. Los créditos de las cuatro certificaciones se han agrupado dentro de las áreas de residuos y materiales.

Una vez analizada toda la información encontrada sobre las certificaciones y después de realizar un análisis comparativo entre ellas, por lo que se refiere a los aspectos generales de las certificaciones cabe destacar los siguientes resultados:

- Tanto BREEAM como VERDE se basan en la figura de unos asesores formados que son los que se encargan de aplicar los criterios de certificación. LEED en cambio, no requiere un asesor especializado para las certificaciones aunque concede un punto adicional si en el proceso intervienen profesionales acreditados.
- A causa de las grandes diferencias que puede haber entre los países en cuanto a la importancia de los elementos ambientales, es muy importante que los criterios de ponderación se adapten a esto y se tengan en cuenta las condiciones ambientales de cada país y su legislación. La certificación LEED es rígida en este aspecto ya que tiene poca adaptación a las condiciones locales mientras que BREEAM se ha adaptado con BREEAM ES y la certificación del GBC para España es VERDE.
- Los objetivos establecidos en BREEAM muchas veces están asociados a soluciones más específicas mientras que en LEED, es más habitual dejar al criterio de los diseñadores elaborar la mejor forma de cumplir los objetivos y por tanto por ese hecho, se podría considerar una certificación menos restrictiva.

- No todos los sistemas de certificación logran reflejar la gama completa de criterios de sostenibilidad y según la forma en que cada sistema se define a sí mismo, se puede concluir que:
 - BREEAM se enfoca en el desempeño ambiental de los edificios
 - LEED tiene como objetivo la reducción del impacto ecológico (especialmente energético) de los edificios
 - VERDE se centra en el desarrollo ecológico del edificio y sus

En cuanto a los aspectos más específicos sobre materiales y residuos, se ha podido observar que a pesar de que por lo general se tienen en cuenta los mismos conceptos y se buscan los mismos objetivos, cada certificación lo enfoca y aplica de una forma muy diferente. Este hecho hace la comparación detallada de las tres una tarea difícil en la que en muchos casos, la comparativa no tiene sentido y no aporta ningún valor añadido.

Después del estudio de los créditos de materiales y residuos, a continuación se citan los resultados más relevantes que se han obtenido:

- En el área de la calidad del aire interior, LEED da mucha importancia a estos créditos exigiendo criterios más estrictos y específicos para los materiales con contenidos en COVs si se comparan con los de BREEAM o VERDE.
- La certificación VERDE evalúa los impactos, la energía incorporada a los materiales y las emisiones de CO₂, BREEAM utiliza etiquetas ambientales y herramientas de ACV para los impactos ambientales del total de los materiales utilizados mientras que LEED, realiza distinción entre los requisitos para maderas certificadas, materiales reciclados, materiales reutilizados y generalmente, valora el uso de estos según su coste respecto al total del coste de los materiales de la obra.
- LEED y VERDE valoran e impulsan la utilización de materiales regionales para minimizar así el impacto en el transporte, BREEAM no hace ninguna referencia al respecto. Al ser LEED una normativa americana y no haber hecho variaciones por países o zonas, el radio que permite para considerar materiales regionales es cuatro veces superior al de la certificación VERDE española.
- En cuanto a las utilización de maderas que favorezcan una gestión forestal medioambiental responsable, LEED y BREEAM valoran la utilización de maderas que estén certificadas y cuyo aprovisionamiento haya sido responsable. Para su justificación se requiere la disposición de certificaciones reconocidas. VERDE por el contrario, no especifica ningún requisito especial para el uso de maderas y no requiere de ninguna certificación de madera específica.

- LEED contempla aspectos que BREEAM o VERDE no hacen como por ejemplo el uso de materiales rápidamente renovables. BREEAM es la única de las tres certificaciones que promueve la protección de las partes vulnerables del edificio.
- Los requerimientos identificados para las tres certificaciones en materia de residuos valoran la previsión de la gestión de los residuos y las instalaciones de almacenaje.
- LEED exige como requisito obligatorio instalar una zona de almacenamiento y recogida de reciclables. Para BREEAM y VERDE también se especifican requisitos de recogida y almacenaje pero para estas certificaciones no son de obligatorio cumplimiento.
- BREEAM también valora la clasificación de residuos para compostaje, la utilización de áridos reciclados para la construcción y la elección de los materiales del suelo por parte del usuario final para evitar cambios.

Cada certificado se divide en varios créditos que abarcan diferentes temáticas.

3.4. SISTEMA MIVES

MIVES (Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles) es una metodología de toma de decisión multi-criterio que evalúa cada una de las alternativas que pueden resolver un problema genérico definido, a través de un índice de valor. El método MIVES tiene sus propias particularidades frente a otros métodos de valoración de la sostenibilidad. No se centra únicamente en costos o datos de productos (Kumaran 2001), sino que analiza requerimientos funcionales, de seguridad, etc.

Figura 3.10. Dimensiones del método MIVES

La Figura 3.10. muestras las 3 dimensiones del método: componentes, tiempo y requerimientos, y su interacción para formar el sistema.

El método MIVES consta de los siguientes pasos:

- Definir el problema a resolver y las decisiones a tomar;
- Producir un diagrama básico del modelo de decisión, estableciendo todos los aspectos que serán parte de la evaluación en la forma de un árbol de requisitos que pueden incluir variables cualitativas y cuantitativas;
- Establecer las funciones matemáticas que permiten convertir las variables cualitativas y cuantitativas, con sus distintas unidades y escalas, en un conjunto de variables con las mismas unidades y escalas;
- Definir la importancia o el peso relativo de cada uno de los aspectos que han de ser tenido en cuenta en la evaluación;
- Definir las diversas alternativas de diseño que se podrían utilizar para resolver el problema anteriormente identificado;
- Evaluar y valorar esas alternativas utilizando el modelo creado anteriormente; y tomar las decisiones correctas y elegir la alternativa más adecuada. En algunos casos podría ser algún tipo de solapamiento entre estos pasos.

En la etapa A de MIVES se identifica el problema planteado. En la etapa B de MIVES hay que describir un árbol de requisitos, esta consiste en un diagrama jerárquico (Figura 3.11) en el que las diversas características del producto o los procesos que han de evaluarse se definen de una manera organizada, normalmente en tres niveles: requisitos (R_x), criterios (C_x) e indicadores (I_x). En el nivel final, los requisitos específicos en evaluación están definidos y los niveles anteriores (criterios e indicadores) se incluyen con el fin de eliminar la segregación en los requisitos, lo que permite, por una parte, tener una visión global del problema, la organización de las ideas y facilitar la comprensión del modelo para cualquier actor involucrado en el proceso de decisión. Por otro lado, el árbol es útil para llevar a cabo el análisis matemático posterior.

Figura 3.11. Árbol de toma de decisiones de MIVES
(Fuente: MIVES)

Una vez finalizado, los elementos matemáticos de la teoría de la decisión multi-criterio en general se utilizan para formalizar una metodología para convertir los diferentes criterios de magnitudes y unidades en una, no dimensional, unidad común que se llama valor (etapa C de MIVES). En este sentido, hay que hacer notar que este método representa ambas variables cualitativas y cuantitativas relacionadas con los indicadores.

En cualquier problema de decisión multi-criterio, el tomador de decisiones tiene que elegir entre un grupo de alternativas, siendo discreta o continua.

$$V(Px) = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i / \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i(P_i, x) \quad (1)$$

En la Ecuación 1, $V(Px)$ mide el grado de sostenibilidad (valor) para la alternativa x que se evalúa, con respecto a los diversos criterios $Px = (P1, X; P2, X; \dots; PN, x)$ que se consideran ; α_i y β_i son los pesos de los requerimientos y criterios a los que cada

requerimiento i pertenece; γ_i son los pesos de los diferentes indicadores; $V_i(P_i, x)$ son las funciones de valor que se utilizan para medir el grado de sostenibilidad para la alternativa x con respecto a un criterio dado i ; y, por último, N es el número total de criterios que se tienen en cuenta en la evaluación. Los pesos α_i , β_i y γ_i son factores que representan la preferencia, respectivamente, de cierto indicador (γ_i), criterio (β_i), y el requerimiento (α_i) contra los demás.

Las funciones V_i deben cumplir ciertos requisitos. Su principal objetivo es homogeneizar los criterios de unidades, pero también es muy recomendable para delimitar los valores que estas funciones pueden generar. De esta manera, todos los criterios tienen una sola escala de evaluación, normalmente entre 0 y 1. Estos son valores que representan el mínimo y el máximo grado de sostenibilidad, respectivamente. Ellos hacen posible sopesar las funciones V_i por pesos α_i , β_i y γ_i . También hace que sea más fácil obtener estos pesos (α_i , β_i y γ_i), ya que será necesario establecer la prioridad relativa de ciertos requerimientos, criterios, o indicador con respecto a otros, independientemente de que algunos pueden presentar diferentes escalas de cuantificación.

Una vez que las funciones de valor se han definido, es necesario calcular los pesos α_i , β_i , γ_i y para cada rama del árbol requisitos (fase D de MIVES). Con este fin, se utilizan valores numéricos establecidos por expertos en el campo. En primer lugar, se calculan los pesos de cada requerimiento (α_i). Luego, dentro de cada requerimiento, los pesos de β_i se calculan los criterios, y por último, lo mismo se hace para cada criterio para obtener los pesos del indicador γ_i . A veces los árboles son excesivamente complejos, o se producen discrepancias entre los expertos, o, simplemente, es deseable llevar a cabo un proceso organizado para evitar dificultades en el establecimiento de esos pesos. En estas situaciones, se puede utilizar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Después, para compensar los posibles sesgos subjetivos debido a la utilización de etiquetas semánticas en AHP, se realiza un análisis y se revisa si es apropiado introducir modificadores de los pesos resultantes.

Las diversas alternativas x se definen en la siguiente etapa (etapa E). Después de eso, estas alternativas se evalúan (etapa F), y el índice de sostenibilidad asociado a cada uno de ellos se calcula utilizando la ecuación 1. Por último (en la etapa G), los diseñadores eligen la alternativa que mejor se adapte a todas las necesidades existentes. Esto no significa necesariamente que van a elegir la alternativa con el más alto índice de sostenibilidad, porque puede haber otra alternativa que tiene una velocidad suficientemente alta y que cumple mejor con otros requisitos, como los funcionales. Sin embargo, con más integrales en modelos futuros, la alternativa con el índice de sostenibilidad más alta debe ser la seleccionada.

La definición de la función de valor requiere medir preferencias, o el grado de satisfacción producido por una cierta opción alternativa para una variable de medición (indicador). Cada variable de medición se puede dar en diferentes unidades; Por lo

tanto, es necesario estandarizar en unidades de valor o satisfacción, que es básicamente lo que hace la función de valor. La satisfacción de las tasas en el método propuesto en una escala de 0 a 1, donde 0 refleja la satisfacción mínima ($P_{\min}$) y 1 refleja la satisfacción máxima ($P_{\max}$).

Para determinar el valor de satisfacción para un indicador, el modelo MIVES describe un procedimiento que consiste en las cuatro etapas siguientes:

1. Definición de la tendencia (aumento o disminución) de la función de valor.
2. Definición de los puntos correspondientes a la mínima ($P_{\min}$, el valor 0) y máxima ($P_{\max}$, valor 1) satisfacción.
3. Definición de la forma de las funciones de valor (lineal, cóncava, convexa, en forma de S).
4. Definición de la expresión matemática de la función de valor.

Figura 3.12. Funciones de valor posibles en el método MIVES

Fuente: Artículo FIB Meeting (Cologne)

Una descripción de cada una de estas etapas se presenta a continuación.

Etapla 1: Definición de la tendencia de la función de valor (Aumentar / Disminuir).

Figura 3.13. Tendencia de la función de valor en el método MIVES

Etapla 2: Definición de los puntos de mínima (Pmin) y la máxima satisfacción (Pmax).

Los puntos de máxima y mínima satisfacción definen los límites de la función de valor sobre el eje x: $P_{\min}$ (punto de satisfacción mínimo) y $P_{\max}$ (punto de máxima satisfacción). Estos dos puntos tienen un valor de satisfacción de 0 ($P_{\min}$) y 1 ($P_{\max}$), respectivamente. Estos límites se corresponden con los valores de satisfacción y no necesariamente con los valores mínimos y máximos de las variables de medición, que pueden tener (y, en general, tienen) una gama más amplia.

Estos puntos se establecen por lo general en función de tres criterios: las normas y reglamentos existentes, la experiencia con proyectos anteriores y el valor producido por las diferentes alternativas con respecto al indicador. Una descripción de cada uno de ellos sigue.

- *Las reglas y regulaciones.* Las variables de medición están reguladas por las normas existentes y, por tanto, se limitan a los valores dados, o para los valores mínimos y máximos incluidos dentro del intervalo definido por ellos. Los límites que se definen de acuerdo a este criterio son bastante inflexibles, ya que por lo general se deben cumplir. Como ejemplo, podemos considerar el tiempo mínimo de resistencia al fuego de una estructura de acuerdo con el tipo y dimensiones de la estructura. En este caso la satisfacción mínimo se encuentra en el punto de tiempo mínimo de resistencia al fuego establecido por las normas correspondientes y no se puede cambiar. En la mayoría de los casos, sólo se define un límite de (mínimo o máximo) (por ejemplo, resistencia mínima, el contenido máximo). A veces, sin embargo, pueden existir dos límites (mínimo y máximo) (por ejemplo, en el caso de la temperatura).
- *La experiencia con proyectos anteriores.* Cuando la información sobre variables de medición no es proporcionado por las normas y reglamentos, estos valores pueden ser determinados por la experiencia, a partir de datos históricos, a

partir de datos encontrados en la literatura, o de los datos obtenidos de los proyectos anteriores. El rango de valores es ligeramente más flexible que la hora de cumplir con las normas y reglamentos.

- *El valor producido por las diferentes alternativas con respecto a un indicador.* En este caso, los límites de la función de valor son proporcionados por los valores mínimos y máximos de las distintas alternativas con respecto a un indicador. En consecuencia, si aparece una nueva alternativa, los límites de la función y el valor correspondiente de los indicadores pueden cambiar.

En el caso de tener alternativas que generan valores para las variables que están fuera de los límites establecidos, pueden no tenerse en cuenta si los valores mínimos o máximos no pueden ser superados (por ejemplo, si corresponden a los límites reglamentarios) o, alternatively, el valor del límite superado (0 ó 1) se puede asignar a ellos. La elección de una opción sobre otra depende claramente de la variable considerada.

Etapas 3: Definición de la forma función de valor (lineal, cóncava, convexa, en forma de S)

Una curva cóncava se utiliza cuando, a partir de una condición mínima, la satisfacción aumenta rápidamente al principio en relación con el indicador. En este caso, los pequeños cambios en torno al punto que genera satisfacción mínima son altamente valorado. Este tipo de relación se elige cuando es más importante para alejarse del punto de satisfacción mínima de acercarse al punto de máxima satisfacción. También se utiliza cuando la mayoría de las alternativas están cerca del punto de satisfacción mínima. En este caso la discriminación entre las alternativas es mejor y el incentivo para la mejora superior.

Figura 3.14. Función cóncava

Una función convexa es apropiado cuando no hay casi ningún aumento en la satisfacción de pequeños cambios en torno al punto que genera la satisfacción mínima.

Figura 3.15. Función convexa

En contraste con el caso anterior, este tipo de relación se selecciona cuando es más importante para acercarse al punto de máxima satisfacción que a alejarse desde el punto de satisfacción mínimo. Este tipo de función se utiliza a menudo para los indicadores económicos o ambientales ya que el objetivo es asegurar que las alternativas se encuentran lo más cerca del punto de máxima satisfacción posible. También se utiliza cuando la mayoría de las alternativas están cerca del punto de máxima satisfacción. En este caso, como en la anterior, la discriminación de las alternativas es mejor y el incentivo para la mejora superior.

Una función lineal refleja un aumento constante de la satisfacción producida por las alternativas. Existe una relación proporcional en toda la gama. Esta función es la opción por defecto cuando no hay criterios específicos pueden ser definidos.

Figura 3.16. Función lineal

Una función en forma de S es una combinación de la parte cóncava y funciones convexas. Un aumento significativo en la satisfacción se detecta en valores centrales, mientras que la satisfacción cambia poco cuando nos acercamos al mínimo o al máximo. Este tipo de relación puede ser elegido cuando la mayoría de las alternativas se concentran en un rango medio entre los puntos de la satisfacción mínima y máxima. En este caso, como en los casos de curvas cóncavas y convexas, la discriminación de las alternativas es mejor y el incentivo para la mejora superior.

Figura 3.17. Función en S

Se puede observar que la forma de la función depende de los valores que los parámetros A_i , m_i N_i y toman en cada caso. La interpretación de estos parámetros hace que sea más fácil de entender y usar. Esto es simplemente una guía general, los parámetros pueden variar de acuerdo a las preferencias del decisor. La forma final del valor de la función i cuando los valores específicos para A_i , se introducen A_i , n_i y m_i siempre deben ser revisados para asegurar que coincida con la relación deseada.

MIVES utiliza la Ecuación 2 como la base para definir las funciones de valor individual V_i .

$$V_i = K_i \cdot \left[1 - e^{-m_i \cdot (|P_{i,x} - P_{i,min}| / n_i)^{A_i}} \right] \quad (2)$$

En la Ecuación 2, K_i es variable y es un factor que asegura que la función de valor se mantendrá dentro de la gama de $[0; 1]$, y que la mejor respuesta se asocia con un valor igual a la unidad. De esta manera tenemos que K_i :

$$K_i = \frac{1}{1 - e^{-m_i \cdot (|P_{i,max} - P_{i,min}| / n_i)^{A_i}}}$$

Increasing function			
Function	n_i	m_i	A_i
Linear	$n_i \approx P_{i,min}$	≈ 0.0	≈ 1.0
Convex	$P_{i,min} + \frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{2} < n_i < P_{i,min}$	< 0.5	> 1.0
Concave	$P_{i,min} < n_i < P_{i,min} + \frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{2}$	> 0.5	< 1.0
S-shaped	$P_{i,min} + \frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{5} < n_i < P_{i,min} + \left(\frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{2}\right)\frac{4}{5}$	$0.2 - 0.8$	> 1.0
Decreasing function			
Function	n_i	m_i	A_i
Linear	$n_i \approx P_{i,min}$	$\approx A_0$	≈ 1.0
Convex	$P_{i,max} + \frac{P_{i,min} - P_{i,max}}{2} < n_i < P_{i,max}$	< 0.5	> 1.0
Concave	$P_{i,max} < n_i < P_{i,max} + \frac{P_{i,min} - P_{i,max}}{2}$	> 0.5	< 1.0
S-shaped	$P_{i,max} + \frac{P_{i,min} - P_{i,max}}{5} < n_i < P_{i,max} + \left(\frac{P_{i,min} - P_{i,max}}{2}\right)\frac{4}{5}$	$0.2 - 0.8$	> 1.0

Figura 3.18. Variación de parámetros para las diferentes funciones MIVES

Una de las características más importantes de la metodología MIVES y que la diferencia de muchas otras, es que el planteamiento de todo el modelo de valoración es anterior a la creación y valoración de las alternativas. De esta forma, las decisiones se toman al inicio, cuando se definen los aspectos que se tendrán en cuenta y cómo serán valorados. La ventaja de este planteamiento es que la toma de decisión se realiza sin que exista alguna influencia de las valoraciones de las alternativas evitando que se produzca cualquier tipo de subjetividad frente alguna de ellas.

Esta certificación incluye un programa informático desarrollado a partir de proyectos de investigación españoles públicos y privados. Entre los que han dispuesto de ayudas públicas se debe destacar los proyectos MIVES I a IV financiados por el gobierno español a través de sus planes nacionales de apoyo a la investigación científica y técnica, para la valoración de alternativas en una toma de decisión multi-criterio.

El programa informático consta de 3 módulos y de un entorno web. Los 3 módulos son: módulo programador, módulo usuario y módulo reporte.

Figura 3.19. Módulos de la certificación MIVES

4 DESARROLLO DE UN MODELO PARA EL ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS FERROVIARIAS

4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se propone el modelo desarrollado de sostenibilidad para estructuras ferroviarias y más concretamente para puentes ferroviarias, basándonos en la metodología y la fórmula aplicadas en el método MIVES y las certificaciones de sostenibilidad existentes que se han visto en los capítulos anteriores. Para ello se ha desarrollado una herramienta matemática que, basándose en el análisis multi-criterio del método MIVES desarrolla una función de valor para la evaluación de una serie de requerimientos y criterios englobados en los 3 ejes del desarrollo sostenible, económico, medioambiental y social.

La metodología se basa en un modelo que analiza los requerimientos, los componentes y el ciclo de vida lo que permite incorporar las diferentes necesidades del proyecto desde diversas perspectivas sostenibles. De la intersección de estos tres ejes se construye el árbol de requerimientos.

El análisis multi-criterio es ante todo una herramienta vinculada a la toma de decisiones, por lo que se emplea a menudo como apoyo en el proceso de planificación y en las posibles evaluaciones que pueden realizarse en este contexto. Sirve sobre todo, para comparar diferentes alternativas o diversas medidas de un programa. Finalmente, la principal ventaja del análisis multi-criterio es su utilidad para simplificar situaciones complejas. Efectivamente, se ha comprobado que, más allá de determinados criterios, la mayoría de los decisores no son capaces de integrar la totalidad de la información en su valoración. Descomponiendo y estructurando el estudio, el análisis multi-criterio permite avanzar paso a paso hacia la búsqueda de una solución objetiva y razonada.

El objetivo básico de la función de valor es transformar la importancia de los atributos o variables (reflejada en un número) a una escala común entre ellos. Por ejemplo, se trata de

poder comparar variables del tipo: tiempo, coste, temperatura, indicadores cuantificados por atributos, etc. De esta forma, se podrá realizar una suma ponderada de las diferentes valoraciones de cada uno de los indicadores. La función de valor permite pasar de una cuantificación de una variable o atributo a una variable no dimensional comprendida entre 0 y 1.

Para la fase de valoración de los indicadores, se plantean diferentes funciones de valor para cada uno de ellos. Estas funciones de valor, que varían entre 0 y 1 en el eje de ordenadas, representan estado de valoración nula o valoración máxima (saturación), respectivamente, para cada uno de los indicadores. En el eje de las abscisas se encuentra la variable del indicador, que en el caso de ser un atributo puede convertirse en una variable mediante una tabla de puntuación. La función de valor usada se define mediante cinco parámetros que, al variarlos, permite obtener todo tipo de formas: forma de S, cóncavas, convexas, o lineales. Los parámetros que definen el tipo de función son: α_i , β_i , γ_i , V_i y N. (ec. (1) para funciones crecientes).

$$V(P_x) = L \cdot \prod_{i=1}^N \alpha_i / \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i(P_i, x) \quad (1)$$

Para definir los 16 indicadores va a ser necesario establecer y caracterizar una serie de variables que son las que deberán cuantificar los técnicos cuando quieran conocer el índice de priorización de una actuación. Se pretende que la descripción de las variables sea suficientemente detallada como para que la cuantificación que puedan realizar distintos técnicos de una misma actuación no registre diferencias significativas.

Figura 4.1. Árbol de toma de decisión de una estructura ferroviaria

Una vez definidos todos sus componentes, el árbol debe ser siempre el mismo. Este se adapta a las preferencias y necesidades del decisor, modificando los pesos que se asignan a los elementos que lo conforman, tal y como se ha visto para el método MIVES. Esta versatilidad genera que sea una herramienta de gran utilidad, al poder ser utilizada tanto por entidades privadas como por instituciones públicas, unas y otras con intereses distintos. La asignación de los pesos, eso sí, debe realizarse antes de determinar cuáles van a ser los casos de estudio, para no favorecer la arbitrariedad.

El presente capítulo se divide en tres grandes apartados, uno dedicado a cada uno de los requerimientos:

- Requerimiento Económico
- Requerimiento Medio ambiental
- Requerimiento Social

Los tres apartados presentan una estructura muy similar. Después de contextualizar cada requerimiento mediante su rama del árbol, se define un criterio, y se pasan a describir los indicadores que de éste se derivan. Finalizada esta tarea se pasa al siguiente criterio del mismo requerimiento repitiéndose el proceso.

La definición y caracterización de los indicadores se hace en todos los casos a través de los cuatro apartados siguientes:

- **Objetivo:** detalla cual es la finalidad que persigue cada uno de los indicadores.
- **Estrategia:** explicar por qué se ha escogido ese indicador, contextualizándolo en la decisión.
- **Forma de medir:** define las variables utilizadas para el cálculo del indicador, presenta las tablas que permiten cuantificar las variables que se miden a partir de atributos y establece las expresiones que permiten calcular la puntuación del indicador.
- **Función de valor:** presenta la función de valor escogida, con su expresión, y el por qué de tal elección. Todas las funciones se basan en la ecuación (1), surgida del modelo MIVES.

4.2. REQUERIMIENTO ECONÓMICO R.1

Este requerimiento se divide en dos criterios, Coste de Ejecución y Costes de Explotación del puente, cuyo objetivo es valorar los costes económicos que se derivan del gasto realizado y compararlo con los otros actuaciones.

Tabla 4.1. Rama del requerimiento económico

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
R1. Económico	C1. Costes de ejecución	I1. Costes de la obra
		I2. Costes por no calidad. ISO 9001
	C2. Costes de explotación	I3. Costes de servicio, mantenimiento y desmantelamiento
		I4. Resiliencia frente a eventos no previstos

4.2.1. Costes de Ejecución. C1

1.1. Coste total de la obra

Objetivo

Se ha considerado la inversión inicial de construcción, el presupuesto total de la obra, incluyendo los costes directos e indirectos. Los costes de construcción se definen en base al consumo de materiales y mano de obra de la obra.

Estrategia

Los costes iniciales de construcción, así como los de mantenimiento y desmantelamiento que veremos más adelante, varían con el tipo de puente que se quiere construir.

Forma de medir

La unidad considerada para su análisis de este indicador son miles €/ m² de tablero de puente. De manera orientativa, se establece la siguiente gráfica que fija los valores económicos en la construcción de un puente dependiendo de sus materiales.

Figura 4.2. Costes de construcción de un puente dependiendo de los materiales utilizados
(Fuente: Ministerio de Fomento)

En este indicador, según lo establecido hasta el momento, dos partidas económicas iguales de dos puentes diferentes obtendrían la misma valoración. Siendo irrelevantes las

características del puente y de su entorno, factores que ya se tienen en cuenta en los otros dos requerimientos.

Función de valor

La función de valor disminuye con el aumento del presupuesto de la obra y se ha considerado una función “S” que se muestra en la Figura 4.2., con el punto de mínima satisfacción situado en (12 ; 0) y el de máxima satisfacción en (0 ; 1).

Figura 4.3. Función de valor del indicador I1 Costes Directos

I2. Costes por no calidad. ISO 9001

Objetivo

Valorar positivamente aquellas empresas contratistas que cuentan con el sello de calidad ISO 9001 ya que tienen unos protocolos de actuación determinados y establecidos que favorecen el desarrollo de la obra.

Estrategia

Esta norma internacional promueve la adopción de un enfoque basado en procesos que mejora la eficacia de un sistema de gestión de la calidad de la empresa y al estar basada a su vez en un ciclo de mejora continua, garantiza la calidad del servicio y los productos de la

empresa. Es por ello que se considera un indicador a tener en cuenta tanto para la empresa principal como para todas las subcontratas de la empresa principal.

Forma de medir

Se propone medir este indicador mediante una variable que considera el número total de subcontratas, junto con la contrata principal, que cuentan en su empresa el sello de ISO 9001 (NTS).

Tabla 4.2. Variables del indicador NTS

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Número Total de Subcontratas (NTS)	$1 < e < 10$	1
	$11 < e < 20$	2
	$21 < e < 30$	3
	$31 < e < 40$	4
	$41 < e < 50$	5

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta el número de empresas con el sello ISO 9001 mayor será la valoración de la empresa y por tanto mayor será su puntuación. En este caso, se utiliza la función “S” que se muestra en la figura 4.3., con el punto de mínima satisfacción situado en (1 ; 0) y el de máxima satisfacción en (15 ; 1).

Figura 4.4. Función de valor del indicador I2 Costes por no calidad

Toda función “S” creciente tiene en su arranque una parte cóncava, delimitada en este caso por un punto de inflexión en abscisas bajo, situado en la puntuación de 3. El tramo convexo de la función se alarga en abscisas desde los 10 hasta los 20 puntos. Se asigna un valor muy cercano a 1 a toda empresa que sobrepase los 10 puntos.

4.2.2. Costes de Explotación. C2

I3. Costes de servicio, mantenimiento y desmantelamiento de la instalación

Objetivo

Con este indicador de Costes de Servicio, Mantenimiento y Desmantelamiento de la instalación se quiere valorar todos los costes asociados a la vida útil del puente tras su construcción. Este indicador recoge el conjunto de los gastos en los que debe incurrir el gestor para asegurar el óptimo mantenimiento de sus instalaciones, con el objetivo de evitar consecuencias indirectas en la población y el medio, y para garantizar la obtención/generación del producto o servicio en torno al cual gira su negocio. A esto además se le añade una estimación de los gastos de desmantelamiento del puente una vez finalizada su vida útil.

Se va a medir este indicador de costes mediante la variable **Costes tras la Construcción (CTC)** que a su vez se divide en dos variables, el Coste de Servicio y Mantenimiento (CSM) y el Coste de Desmantelamiento de la Instalación (CDI).

Estrategia

Toda la red de ferrocarril españolas se encuentran bajo un régimen de control exhaustivo, implantado para prevenir problemas estructurales o de infraestructura que pueden aparecer con los años. Por ello se genera un gasto en vigilancia y mantenimiento que debe sufragar el gestor que las explota. En el caso que aparezca alguna anomalía, y siempre que esta sea detectada, normalmente se acentúa la vigilancia, incrementado el coste anual de esta partida.

Además, en algunos casos se hacen pequeñas reparaciones de mantenimiento orientadas, por un lado, a corregir los defectos menores que el daño ha ocasionado y, por el otro, a evitar males mayores en la estructura, infraestructura y equipos de comunicación de vía.

Forma de medir

La unidad considerada para su análisis son miles €/m² de tablero de puente, teniendo en cuenta, como se acaba de ver, que se descompone en 2 variables:

- El Coste de Servicio y Mantenimiento (CSM) incluye los costes necesarios para planificación y adjudicación de la capacidad, y los de gestión del tráfico junto con los costes de personal, materiales, repuestos y contrataciones externas dedicados a garantizar un adecuado estado de funcionamiento tanto de la propia estructura del puente como de todos los sistemas que constituyen la infraestructura: plataforma, vía, electrificación, señalización, sistemas de comunicaciones, elementos de supervisión y equipos de control y mando del tráfico.
- El coste de Desmantelamiento de la Instalación (CDI) se ha estimado valorando un porcentaje del coste de construcción del puente, al carecer de estos datos.

Estas dos variables compondrían el indicador:

$$CTC = CSM + CDI$$

El Coste de Servicio y Mantenimiento (CSM) de la infraestructura es fundamentalmente el coste asociado al personal encargado de estas tareas y, en mucha menor medida, las de los equipos que utilizan en su trabajo. El telemando de todas las instalaciones que gobiernan el tráfico y un alto grado de automatización de las mismas permite concentrar los recursos dedicados a esta tarea, obteniendo importantes economías, de manera que el coste total de servicio de las líneas es muy poco significativo, en comparación con el coste de mantenimiento y desmantelamiento de las mismas.

Una parte relevante de los costes de mantenimiento es fija, pues depende de programas rutinarios que se realizan de forma periódica e independientemente del volumen de tráfico, con el fin de mantener los estándares prefijados de nivel de servicio y seguridad. La plataforma y la vía, fundamentalmente, sufren también las inclemencias del tiempo. Sólo una pequeña parte de los costes es variable con el nivel y características del tráfico producido. Esta parte variable se concentra en la vía prácticamente en su totalidad. Se estima que el 50% de los costes de mantenimiento son costes laborales.

En general, el mantenimiento de las infraestructuras y vías representa entre un 50 y un 67% de los costes totales de mantenimiento (tanto en alta velocidad como convencional), mientras que los costes de señalización varían entre un 10 y un 35% del total en alta velocidad y entre un 15 y un 45% en las líneas convencionales. Los costes de electrificación y otros mantienen unas participaciones más pequeñas, aunque similares en ambos tipos de vías.

Según los datos facilitados por el Ministerio de Fomento en 2010, el coste de mantenimiento de un puente ferroviario puede estimarse entre 30.000 y 35.000 euros por kilómetro y año, por lo que se ha tomado 33.000 euros/Km/año como promedio. A esto además hay que sumarle los costes de servicio y mantenimiento de la propia estructura del puente, que dependiendo del diseño del sistema constructivo y de los materiales que lo conformen varía, pero no de manera sustancial.

En España se consideran tres tipos de inspecciones a realizar en la gestión y mantenimiento de puentes según especificaciones de la Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado, 2012. Las primeras se denominan inspecciones básicas o rutinarias y se realizan por personal no especializado de forma visual con el objetivo de detectar de forma temprana posibles daños o deterioros graves. Un segundo tipo de inspección son las conocidas como inspecciones principales que se ejecutan por personal especializado bajo supervisión de un ingeniero de forma visual. En ellas se valoran de forma minuciosa todos los elementos del puente y sirviéndose, si es necesario, de medios de acceso como pasarelas de inspección de puentes, camión grúa con canastillas, barca, etc. Por último se consideran las inspecciones especiales llevadas a cabo por personal técnico cualificado que incluyen la realización, además del examen visual, de ensayos de caracterización y mediciones complementarias. Estas inspecciones surgen de la consecuencia de daños detectados en las inspecciones principales o por situaciones singulares como impactos de vehículos, daños por riadas o cualquier otro desastre natural, etc.

Tabla 4.3. Costes del sistema de mantenimiento de un puente de hormigón

Tabla 4.4. Costes del sistema de mantenimiento de un puente mixto

Tabla 4.5. Costes del sistema de mantenimiento de un puente metálico

TRABAJOS PUENTES METÁLICO	UNIDAD	COSTE UNITARIO	AÑO DE INICIO	AÑO DE FINALIZACIÓN	FRECUENCIA
Inspección básica cada 24 meses	ud	1.200,00	2	100	2
Inspección principal cada 5 años	ud	3.150,00	5	100	5
Pintado periódico	m2	25,00	10	90	10

Por lo que se calcularán los costes de servicio y mantenimiento en función de dichos costes unitarios y de las unidades de los diferentes puentes a estudiar.

El Coste de Desmantelamiento de la Instalación (CDI) se ha calculado en función de los costes de construcción de cada uno de los puentes y del análisis del ciclo de vida de los mismos, valorando el diseño del sistema constructivo.

Tabla 4.6. Porcentajes aplicables a cada tipo de puente en el desmantelamiento

VARIABLE	ATRIBUTO	%
% Coste de desmantelamiento	Metálico	2
	Hormigón	5
	Mixto	4

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es decreciente porque a medida que se incrementan los gastos disminuye la puntuación del indicador. En este caso se utiliza la función cóncava que se muestra en la figura 4.4., con el punto de máxima satisfacción situado en (200 ; 1) y el de mínima satisfacción en (700 ; 0). Se escogió una función cóncava porque se pretende dar la mayor relevancia posible a aquellas actuaciones que con un gasto anual menor reducen un mayor daño, pero no se ha considerado el punto de mínima satisfacción en 0, ya que en este indicador solo se ha contado con las características de los materiales utilizados para su construcción, teniendo gran peso también el diseño del puente, factor que no se ha tenido en cuenta por su complejidad de análisis.

Figura 4.3. Gráfica de la función de valor del indicador I3 Costes de mantenimiento y desmantelamiento

14. Resiliencia frente a eventos no previstos

Objetivo

Este indicador trata de evaluar los costes económicos que supone la aparición de un daño grave en el elemento estructural que se está analizando, que imposibilitaría su utilización.

Estrategia

Se ha basado la clasificación de este indicador de Resiliencia frente a eventos no previstos los tipos de apoyo que tenga el puente en sus tramos (uno o más), los que dependerán de la luz a vencer, el estado de carga y otros factores. Así tenemos la siguiente clasificación:

- a. Puentes isostáticos
- b. Puentes continuos
- c. Puentes en arco
- d. Pórticos
- e. Puentes colgantes y atirantados

Forma de medir

Para poder obtener el valor de este indicador se ha determinado la variable Tipo de Puente (TDP), que los clasifica en cinco grupos:

a) Puentes Isostáticos.

Son aquellos donde se aplican las condiciones de equilibrio (FH, FV, M) para calcular las solicitaciones internas y externas. No van anclados.

Esto ofrece unas ventajas como son la simplicidad de cálculo estructural o la mejor adaptación a suelos de mala calidad, mientras que como desventajas podemos destacar su gran peso propio, que salvan luces considerablemente menores o un comportamiento no tan adecuado ante eventos sísmicos.

b) Puentes Continuos o hiperestáticos.

Son aquellos donde para determinar las solicitaciones internas y externas se deben aplicar métodos de estructuras hiperestáticas. Diseños más elaborados y más complejos. Aptos en suelos de buena capacidad portante. Aparecen anclados de forma permanente en las pilas.

Las ventajas ofrecidas por este tipo de construcciones son un comportamiento estructural más efectivo, la posibilidad de salvar luces considerablemente grandes o una disminución del peso propio en la sección central de las luces. (Secciones no uniformes). Mayor seguridad ante fallas de un elemento portante por la colaboración de los elementos

adyacentes, mayor esbeltez y mayor elegancia de formas y un mejor comportamiento y seguridad ante las acciones sísmicas (mayor amortiguación dinámica).

Las desventajas más destacadas de este tipo de puentes son: Procedimiento de diseño más laborioso, métodos de construcción más sofisticados, influencia destructiva de los asentamientos diferenciales, pueden presentar problemas ante descensos diferenciales de los apoyos. (por asentamientos desiguales en las fundaciones) o dilatación por temperatura en luces muy grandes.

c) Puentes en arco. Aptos en suelos rocosos y muy estables. Las secciones trabajan a compresión.

d) Pórticos: Superestructura e infraestructura unidas rígidamente en los nodos. No van apoyados en sus extremos. Pueden ser de acero, hormigón armado, pretensado. Aptos para paso a dos niveles.

e) Puentes colgantes y atirantados.

- Colgantes. El tablero se sostiene por medio de tirantes verticales los cuales a su vez están unidos a los cables principales. Los cables principales tienen forma de catenaria y están apoyados en torres altas y atirantadas en los extremos por medio de macizos de anclajes (sometidos a tensión).
- Atirantados: Los cables tienen la misma función que los puentes colgantes. Anclados en puntos de apoyo en la losa de calzada.

Tabla 4.7. Puntuación asignada a los atributos de la variable TDP

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Tipo de Puente (TDP)	Puente isostático	1
	Puente continuo	2
	Puente en arco	3
	Pórtico	4
	Puentes colgantes y atirantados	5

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque cuanto mayor puntuación haya obtenido el puente, más rentable resultaran las actuaciones a realizar en caso de resiliencia frente a eventos no previstos. En este caso se utiliza la función cóncava que se muestra en la figura 4.5., con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (5 ; 1).

Figura 4.6. Función de la valor del indicador I4 Resiliencia frente a eventos no previstos

4.3. REQUERIMIENTOS MEDIOAMBIENTALES. R2.

Evalúa tanto el impacto negativo que el puente puede ocasionar en el medio natural como los beneficios indirectos que puede aportar. Los proyectos de construcción de un puente tienen, por lo general, gran repercusión (positiva y/o negativa) en el medio que les rodea y es necesario cuantificar dichos impactos. Este requerimiento está compuesto por cinco criterios, que a su vez se ramifican en forma de indicadores que permiten evaluar las repercusiones de la actuación, sean positivas o negativas, sobre el medio natural.

Tabla 4.9. Rama del requerimiento medio ambiental

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
Medio ambiental	Consumo de materiales	Recursos naturales
		Agua incorporada
		Recursos reciclados
	Emisiones	Emisiones de CO ₂ en todo el proceso
	Residuos	Residuos totales. Obra + mantenimiento + desmantelamiento
	Energía	Energía total. Incorporada materiales + obra + mantenimiento + desmantelamiento
	Gestión Ambiental	Valor ecológico del emplazamiento
		Grado de sensibilidad a normativa ambiental. ISO 14001

4.3.1. Consumo de Materiales. C3

I5. Recursos naturales

Objetivo

Sin duda el aspecto más relevante en la gran Obra Pública reside en el consumo de recursos naturales manifestado en terraplenes y desmontes de volúmenes cuantiosos. El objetivo de este indicador es dejar constancia de la importancia de los recursos naturales y valorar la utilización del mayor porcentaje de materiales reciclados para la fabricación de los materiales principales, como son el hormigón y el acero.

Estrategia

Un recurso natural es aquel elemento o bien de la naturaleza que la sociedad, con su tecnología, es capaz de transformar para su propio beneficio. Debemos tener presente que el aprovechamiento de un determinado recurso natural no debe afectar al equilibrio ecológico que lo sostiene y que es responsable de su existencia, de ahí la importancia de utilizar los menores recursos naturales posibles en las obras.

Forma de medir

La forma de medir este indicador se ha determinado mediante la variable **Materias Primas Principales (MPP)** que a su vez se divide en la suma de tres variables: Materias Primas procedentes de Canteras y Graveras (MCG), Materiales Primas del Hormigón (MPH) y Materias Primas del Acero (MPA).

$$\text{MPP} = \text{MCG} + \text{MPH} + \text{MPA}$$

- La variable Materias Primas procedentes de Canteras y Graveras (MCG) tiene en cuenta el material procedente de las canteras y las graveras de la obra.
- La variable Materias Primas del Hormigón (MPH) cuenta con las materias primas utilizadas para la fabricación del hormigón descontando aquellos materiales reciclados, que ya son valorados en el indicador I7. Recursos Reciclados.
- La variable Materias Primas del Acero (MPA) cuenta con las materias primas utilizadas para la fabricación del acero descontando aquellos materiales reciclados, que ya son valorados en el indicador I7. Recursos Reciclados y el agua reciclada utilizada para la fabricación del acero que ya esta considera en el indicador I6. Agua.

La variable **Materias Primas procedentes de Canteras y Graveras (MCG)** se va a medir en m^3 de material.

La Variable **Materias primas del Hormigón (MPH)** se va a medir según el porcentaje calculado en la Figura 4.10. Composición del hormigón convencional y del hormigón reciclado, señalado en el indicador I7. Recursos Reciclados, donde se ve que el porcentaje de material reciclado incluido en el hormigón es muy escaso y solo llega al 22%, con lo que se establece el 78% de materias primas empleadas para el total del hormigón utilizado en la obra.

La variable **Materias Primas del Acero (MPA)** se va a medir según el porcentaje calculado en la Figura 4.14. Coeficientes de emisiones de energía y CO_2 para la fabricación del acero desarrollada en el indicador I7. Recursos Reciclados, donde se ve que el porcentaje de material reciclado incluido en el acero es más alto, variando en Europa del 35%-59%, por lo que se establece el 53% de materias primas empleadas para el total de acero utilizado en obra.

Para realizar las conversiones del volumen obtenido en obra al peso para el cálculo de los diferentes valores se han utilizados las siguientes densidades de los materiales:

$$\rho \text{ hormigón} = 2.500 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho \text{ acero} = 7.850 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho \text{ CO}_2 = 1,6 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho \text{ zahorra} = 1.600 \text{ Kg/m}^3$$

Función de valor

La función de valor de este indicador será decreciente, con una curva en S donde se penalice los mayores pesos de recursos naturales utilizados, ya que a mayor volumen de materia prima utilizada peor valorado estará el indicador.

Figura 4.7. Función de valor del Indicador I5 Recursos Naturales

I6. Consumo de Agua

Objetivo

Debido a la escasez y la importancia del agua en el planeta, con este indicador se ha querido valorar el gasto de agua completo en el ciclo de vida del puente, por lo que se han valorado todas las etapas del mismo.

Teniendo en cuenta los materiales utilizados para la fabricación de un puente ferroviario, el consumo principal de agua no se produce en el desarrollo de la obra, ni mucho menos en su puesta en servicio o desmantelamiento, el gran consumo de agua se produce en la fabricación de los materiales.

Estrategia

La optimización de la gestión del agua en las obras de construcción pasa necesariamente por una perspectiva global e integral del problema. A la escasez de agua añadimos la contaminación inherente a los procesos constructivos presente en el agua de vertido, y nos damos cuenta de que la solución pasa por el intento de una gestión integral, procurando ciclos o circuitos cerrados en lo posible, y adoptando una serie de precauciones o buenas prácticas tendentes al mejor resultado ambiental.

Forma de medir

Este indicador de Agua se va a medir mediante la variable Agua utilizada durante la Vida Útil del Puente (AVU) que a su vez engloba el agua utilizada durante la fabricación de los materiales, en la fase de construcción y mantenimiento y durante el desmantelamiento del mismo:

- Agua incluida en la fabricación de los materiales más representativos: hormigón y acero (AIM).
 - Hormigón (AIH)
 - Acero (AIA)
- Agua utilizada en las obras de construcción y el mantenimiento (AIC).
- Agua utilizada para el desmantelamiento de la instalación (AID).

Con todo esto el indicador quedaría de la siguiente manera:

$$AVU = AIM + AIC + AID = (AIH + AIA) + AIC + AID$$

Donde

$$AIM = AIH + AIA$$

Para la **variable de Agua Incluida en la fabricación de los Materiales (AIM)** se han utilizado los estudios existentes sobre los consumos de agua en la fabricación de los dos materiales de mayor peso, como son el hormigón y el acero:

Según la Tabla 2.31. Perfil ambiental del hormigón (Fundamentals of Metallurgy de Seshadri Seetharaman, 2003) se calcula que el agua consumida para la fabricación del hormigón es de 80ng por kg de producto, que es el parámetro a utilizar para los cálculos de consumo de agua en el hormigón.

Según la Tabla 2.40. Perfil ambiental del acero (Fundamentals of Metallurgy de Seshadri Seetharaman, 2003) se calcula que el agua consumida para la fabricación del acero es de 150.000 litros por cada tonelada de producto, de los cuales se recupera aproximadamente el 96% del agua, evaporándose el agua restante. Dado que el 96% se va a tratar como material reciclado, en esta variable solo se tiene en consideración el 4% evaporada en la fabricación de 1 tonelada de acero, es decir 6.000 litros de agua por tonelada de acero.

Por cada tonelada de bloque de acero fabricado se generan: 145 kg de escoria, 230 kg de escoria granulada, aproximadamente 150.000 litros de agua residual y alrededor de 2 toneladas de emisiones gaseosas (incluyendo CO₂, óxidos sulfurosos y óxidos de nitrógeno) (Lawson, B.; 2003).

En esta variable **Agua Utilizada durante las Obras de Construcción y Mantenimiento (AIC)**, se ha considerado que las emisiones al agua en las obras de construcción suelen estar provocadas por las tareas de limpieza, riego de caminos para el transporte de materiales o curado de estructuras. Debido a la complicación existente para poder valorar el consumo de agua en obra una vez finalizada la misma, se ha realizado una estimación en base a los meses de duración de la obra:

Tabla 4.10. Puntuación de la variable AIC

VARIABLE	INTERVALO	I CONSUMIDOS
Agua Utilizada durante la Obra y el Mantenimiento (AIC)	> 3 años	115.080,00
	2 año < t < 3 año	82.200,00
	1 año < t < 2 año	49.320,00
	6 meses < t < 1año	24.660,00
	< 6 meses	16.440,00

Por último, para la variable **Agua utilizada para el desmantelamiento de la instalación (AID)** se ha procedido de la misma manera, teniendo en cuenta el tipo de puente existente. Así, el mayor consumo de agua se realizará en el desmantelamiento de los puentes de hormigón, debido al agua utilizada para el riego de la zona cimentación, seguido de los puentes mixtos y finalmente los puentes metálicos, debido a la menor cimentación de dichos puentes.

Tabla 4.11. Puntuación de la variable AID

VARIABLE	ATRIBUTO	I CONSUMIDOS
Agua utilizada Desmantelamiento de la Instalación (AID)	Hormigón	12.000
	Mixto	7.000
	Metálico	3.000

Función de valor

Para este indicador se ha utilizado un función en S, decreciente, que discrimine claramente los extremos, para favorecer el menor consumo de agua durante el ciclo de vida del puente.

Como se ha podido observar durante el desarrollo del indicador, el peso del mismo lo lleva el consumo de agua para la fabricación del acero, siendo los demás inapreciables.

Figura 4.9 Factor de forma del indicador I6 Consumo de agua

17. Recursos reciclados

Objetivo

Este indicador deja constancia de la importancia de la utilización de materiales reciclados, tanto en la fabricación de los materiales para la construcción del puente, como del reciclado dentro de la propia obra de las excavaciones del tajo.

El EHE en su edición de 2008 ya deja constancia de manera específica, en el anejo nº15, la utilización de áridos reciclados en fabricación de hormigones, pudiendo utilizarse hasta el 20% en peso en la fabricación de hormigones estructurales y hasta el 100% en hormigones no estructurales.

En el acero el uso de materiales reciclado para su fabricación está más avanzado, como ya hemos podido ver en el capítulo 2, llegando a porcentajes más elevados de materiales reciclados en su fabricación.

Es importante también destacar el agua reciclada tanto en la obra como en la fabricación de los materiales de obra.

Estrategia

Es importante estudiar las posibilidades de cada material constructivo para mejorar su impacto ambiental a través del reciclaje. Especialmente teniendo en cuenta la limitación

de oportunidades para depositar los residuos y la creciente necesidad de preservar nuestros recursos naturales.

Forma de medir

Se quiere medir este indicador mediante la variable Recursos Totales Reciclados (RTR) teniendo en cuenta que esta variable contiene a su vez la suma de las siguientes variables que tienen en cuenta lo visto anteriormente para la fabricación de los principales materiales, hormigón y acero, añadiendo además el reciclado del agua y los materiales aprovechados durante el desmantelamiento de la instalación.

- Porcentaje de Hormigón Reciclado por kg de hormigón utilizado (PHR). La composición o textura del hormigón permite que este sea re-molido con relativa facilidad y preparado para su aplicación en áreas similares. Para fabricar este hormigón reciclado se utilizarán escombros procedentes de hormigón estructural, triturado y procesado en una planta de reciclaje, y convertidos en un nuevo producto granulado reciclado.
- Porcentaje de Acero Reciclado por kg de acero utilizado (PAR). El acero, al ser un material de alta intensidad energética, tiene un alto potencial para ser reciclado. El acero, se puede reciclar técnicamente un número indefinido de veces, casi sin degradación en la calidad. Aún así, la oxidación reduce la cantidad de material no oxidado. Mientras que prácticamente el 100% de los desechos de acero podrían ser re-introducidos en la industria, el porcentaje de acero reciclado se estima entre el 35-49%.
- Porcentaje de Agua Reciclada en los materiales y la Obra (PAO).
- Porcentaje de Material Reutilizado tras el desmantelamiento de la instalación (PMD). La demolición y desmantelamiento se han convertido en operaciones fundamentales y muy frecuentes ligadas al auge de la obra civil y al desarrollo urbano e industrial.

$$RTR = PHR + PAR + PAO + PMD$$

Para la variable **Porcentaje de Hormigón Reciclado (PHR)**, se ha tenido en cuenta lo descrito anteriormente en el indicador I6. Recursos Naturales y en la Tabla 4.10. Composición del hormigón convencional y del hormigón reciclado, con lo que el material reciclado utilizado en el hormigón se estima en un 22% del total de hormigón utilizado.

Tabla 4.12. Composición del hormigón convencional y del hormigón reciclado

Para la variable **Porcentaje de Acero Reciclado (PAR)**, se ha tenido en cuenta lo descrito anteriormente en el indicador I6. Recursos Naturales y en la Figura 4.14. Coeficientes de emisiones de energía y CO₂ para la fabricación del acero, con lo que el material reciclado utilizado en el acero se estima en un 47% del total de acero utilizado.

Considerando la relativa facilidad con la que el acero puede ser reciclado y las ventajas obtenidas cuando se utiliza acero reciclado (requiere cuatro veces más energía producir acero de mineral virgen que reciclarlo [Green Network, 1999]). Las propiedades metálicas del acero son ventajosas ya que permiten que la separación del acero sea físicamente viable tanto en flujos de desecho como en plantas de construcción o demolición usando imanes para separar el metal del resto de residuos. La naturaleza magnética de los metales férricos facilita la separación y manejo durante el reciclado.

Tabla 4.13. Composición del acero

Además, la escoria generada en el proceso de producción del acero, también puede ser reciclada, y se usa actualmente como sustituto de cemento o áridos en la construcción de carreteras y muros. Esta utilización es enormemente beneficiosa debido, por un lado, a la significativa reducción en la emisión de dióxido de carbono que de otra forma sería generado debido a la calcinación del mineral calcáreo, y por otro lado, a la reducción de escoria residual. Se estima que la creación de una tonelada de escoria (durante la producción de 3,5 toneladas de metal fundido) ahorra entre 3 y 5 GJ de energía y puede

evitar la cocción de 1000 kg de calcárea, que tiene el potencial de generar entre 900 y 1200 kg de dióxido de carbono.

Según el Informe de 2013 sobre el Reciclaje del Acero de la Industria Española, el 75% del acero fabricado en España es reciclado, donde por cada tonelada de acero que recicla, la industria siderúrgica española ahorra alrededor de una tonelada y media de mineral de hierro, un 85% de agua, un 80% de energía y un 95% de carbón.

La variable **Porcentaje de Agua Reciclada en los materiales y la Obra (PAO)** va a contabilizar tanto el agua reciclada en la fabricación del acero, que ya hemos determinado en el indicador I6. Agua en un 96%, es decir 144.000 l por tonelada de acero fabricado, como el agua recogida en obra para su reutilización.

Por último, la **variable Porcentaje de Material Reutilizado tras el desmantelamiento de la instalación (PMD)**, se ha puntuado según el porcentaje de materiales reciclados en el desmantelamiento, que nos dará a su vez las toneladas recicladas.

Tabla 4.14. Porcentaje de reciclado de los materiales tras el desmantelamiento

VARIABLE	INTERVALO
Porcentaje de Materiales recuperados en el Desmantelamiento (PRD)	$r < 20\%$
	$20\% < r < 40\%$
	$40\% < r < 60\%$
	$60\% < r < 80\%$
	$80\% < r < 100\%$

Función de valor

Se trata de una función de valor en S creciente, donde la puntuación mayor se obtiene en el punto (250; 1) y la menor puntuación menor en (50; 0).

Figura 4.13. Función de valor para el indicador I7 Recursos Reciclados

4.3.2. Emisiones

I8. Emisiones de CO₂

Objetivo

Teniendo en cuenta la importancia actual de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y el impacto negativo de este en el medioambiente, es importante contar con un indicador que pueda penalizar las obras cuanto mayores sean sus emisiones de CO₂ y gases contaminantes a la atmósfera, favoreciendo los procesos de fabricación más "limpios" y los recorridos en el transporte de materiales, tanto de materias primas como del producto terminado, menores.

Para la realización de este estudio no se han tenido en cuenta las emisiones de CO₂ de los procesos de la obra, ya que se ha considerado que su peso no es trascendental en comparación con los procesos de fabricación, transporte del material y su desmantelamiento una vez finalizada la vida útil del puente.

Estrategia

A pesar del Protocolo de Kyoto, las emisiones de dióxido de carbono siguen aumentando. En 2008, los países «menos desarrollados» representan más del 50% de las emisiones mundiales, pero en parte debido la producción de bienes para los países ricos. Si bien representan el 80% de la población mundial, sólo contribuyeron con el 20% de las

emisiones desde 1751 a 2007. La tasa de emisiones de CO₂ en el aire aumento de 280 a 383 ppm durante este mismo período. El contenido de CO₂ nunca ha sido tan elevado desde hace 2,1 millones años.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, las emisiones de CO₂ aumentarán el 130% de aquí a 2050. La inversión necesaria para reducir a la mitad las emisiones y desarrollar una "revolución internacional de las tecnologías energéticas" se elevará a 45.000 millones de dólares de aquí a 2050, por lo que hay que empezar a actuar de manera inminente y en todos los sectores.

Forma de medir

La variable considerada para el análisis de este indicador de Emisiones de CO₂ es **CO₂ equivalente (ECO)** son las toneladas equivalentes de CO₂ por m² de tablero de puente. Para ello se han estudiado las emisiones de CO₂ tanto en la fabricación de los materiales que componen el puente como en el transporte de la materia prima y del producto y en el desmantelamiento de la instalación. No se ha tenido en cuenta las emisiones de CO₂ durante el periodo de obra por considerarse mínimas en relación a los valores contemplados. Este indicador se descompone en tres variables:

- Emisiones de CO₂ en la fabricación y transporte del hormigón (ECH).
- Emisiones de CO₂ en la fabricación y transporte del acero (ECA).
- Emisiones de CO₂ en el transporte de los residuos de obra a vertedero (ECV)
- Emisiones de CO₂ en el desmantelamiento de la instalación (ECD)

Así el indicador sería la suma de las cuatro variables consideradas:

$$ECO = ECH + ECA + ECV + ECD$$

Las emisiones de CO₂ en la fabricación y transporte del hormigón (ECH) se ha elaborado la Tabla 4.13 a partir de la Tabla de Inventory of Carbon and Energie (ICE) de Prof. Geoff Hammond & Craig Jones de 2011, indicando los porcentajes de emisiones más relevantes (CO₂, NO_x y metales pesados) que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón. Los datos porcentuales referentes al cemento contemplan la obtención de materias primas, su transporte y la producción del cemento.

Tabla 4.13. Porcentaje de emisiones por material en el ciclo de vida del hormigón

HORMIGÓN	EMISIONES DE CO ₂	EMISIONES DE NO _x	EMISIONES DE METALES PESADOS
Cemento	83%	71%	88%
Árido	1%	1%	< 1%
Transporte de materias primas	3%	8%	1%
Producción del hormigón	8%	5%	10%
Transporte del producto	5%	15%	< 1%
Total	100%	100%	100%

Si estos porcentajes se aplican a las diferentes resistencias del hormigón, obtendremos las siguientes emisiones en Kg de carbono equivalente.

Tabla 4.14. Emisiones de CO₂ según el tipo de hormigón

HORMIGÓN	Kg Carbono CO ₂ e/Kg
Hormigón general	0,107
16/20 MPa	0,100
20/25 MPa	0,107
25/30 MPa	0,113
28/35 MPa	0,120
32/40 MPa	0,132
40/50 MPa	0,151

Las emisiones de CO₂ en la fabricación y transporte del acero (ECA) suponen un porcentaje alto de las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera. Por cada tonelada de acero producido se emiten aproximadamente dos toneladas de CO₂. En la reducción del mineral de hierro en los altos hornos es donde más energía se consume y donde más CO₂ se emite. El porcentaje de las emisiones atribuible a la fabricación de acero supera así el 4 % de las emisiones globales de CO₂ (como ejemplo comparativo, el tráfico aéreo mundial produce solamente el 2 %).

En la siguiente tabla, elaborada por Inventory of Carbon and Energie (ICE) de Prof. Geoff Hammond & Craig Jones de 2011 (Figura 4.15.), se pueden obtener las emisiones de CO₂ y el gasto de energía en la fabricación del acero, a lo que, al igual que en hormigón, habría que añadir las emitidas por el transporte de los materiales.

4. Metodología de la Tesis

Tabla 4.15. Porcentaje de emisiones por material en el ciclo de vida del acero

Tabla 4.16. Coeficientes de emisiones de energía y CO₂ para la fabricación del acero

Selected Embodied Energy & Carbon Coefficients and Associated Data													
Material	Embodied Energy – MJ/Kg					Embodied Carbon – Kg CO2e/Kg					Boundaries	Best EE Range – MJ/Kg	
	UK Typical – EU 59% Recy.	R.O.W. Typical – 35.5%	World Typical – 39% Recy.	Primary (100% hypothetical al virgin)	Secondary	UK Typical – EU 59% Recy.	R.O.W. Typical – 35.5%	World Typical – 39% Recy.	Primary (100% hypothetical al virgin)	Secondary		Low EE	High EE
General Steel	20.1	26.2	25.3	35.4	9.40	1.46	2.03	1.95	2.89	0.47	Cradle to Gate	(+/- 30%)	
Bar & rod	17.4	22.3	21.6	29.2	8.8	1.40	1.95	1.86	2.77	0.45			
Coil (Sheet)	18.8	24.4	23.5	32.8	NTMR	1.38	1.92	1.85	2.74	NTMR			
Coil (Sheet) – Galvanised	22.6	29.5	28.5	40.0	NTMR	1.54	2.12	2.03	3.01	NTMR			
Engineering steel	-	-	-	-	13.1	-	-	-	-	0.72			
Pipe	19.8	25.8	24.9	34.7	NTMR	1.45	2.01	1.94	2.87	NTMR			
Plate	25.1	33.2	32.0	45.4	NTMR	1.66	2.31	2.21	3.27	NTMR			
Section	21.5	28.1	27.1	38.0	10.0	1.53	2.12	2.03	3.03	0.47			
Wire	36 (?)					3.02 (?)							
Stainless	56.7					6.15 CO2 only					Cradle to Gate	11	82

De donde podemos concluir que por cada kg de producto de acero general se emiten 1,46 kg de CO₂, 3 kg de NO_x y 0.037 kg de metales pesados. En el caso de las barras de acero estas emisiones de CO₂ disminuirían quedándose en 1,40 kg.

Las emisiones de CO₂ en el transporte de residuos de obra a Vertedero (ECV) se van a calcular en base a los m³ de material transportado a vertedero, considerando un camión

tolva de 20 m³ y una potencia de: 283 KW 1.900 rpm. Obteniendo los datos de emisiones de CO₂ de las propias marcas comerciales, se llega a unas emisiones de 539 g CO₂/km.

Las emisiones de CO₂ en el Desmantelamiento de la instalación (ECD), al ser un dato de difícil obtención se ha considerado como la suma de las emisiones de CO₂ del transporte más un porcentaje del 5% de las emisiones de CO₂ de la preparación de los materiales.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es decreciente porque a medida que aumenta la puntuación más contaminante es el conjunto. En este caso se utiliza la función convexa que se muestra en la figura 4.15. con el punto de mínima satisfacción situado en (90; 0) y el de máxima satisfacción en (20; 1).

Se ha escogido esta función porque permite dar relevancia a las estructuras menos contaminantes y con menores emisiones a la atmósfera. Además, es una función altamente discriminante entre las puntuaciones peor valoradas.

Figura 4.15. Función de valor del indicador I8 Emisiones de CO₂.

4.3.3. Residuos. C5

I9. Residuos de obra, mantenimiento y desmantelamiento

Objetivo

La composición de los residuos de construcción y demolición (RCD), varía en función del tipo de infraestructuras de que se trate y refleja en sus componentes mayoritarios, el tipo y distribución porcentual de las materias primas que utiliza el sector, si bien hay que tener en cuenta que éstas pueden variar de un país a otro en función de la disponibilidad de los mismos y los hábitos constructivos.

Con este indicador se quiere valorar todos los residuos generados durante el ciclo de vida del puente, incluyendo así la fase de mantenimiento y desmantelamiento de la instalación.

Los materiales minoritarios dependen en cambio, de un número de factores mucho más amplio como pueden ser el clima del lugar, el poder adquisitivo de la población, los usos dados al edificio o infraestructura etc. En este estudio no se han tenido en cuenta este tipo de materiales.

Estrategia

España genera anualmente 38,5 millones de toneladas de residuos de la construcción (Cemex, 2006). Se estima que la contribución del hormigón a los residuos de construcción y demolición es del 53% en volumen y del 67% en peso (Wilson, A.; 2003).

La generación de residuos de construcción y demolición está íntimamente ligada a la actividad del sector de la construcción, como consecuencia de la demolición de edificaciones e infraestructuras que han quedado obsoletas, así como de la construcción de otras nuevas.

El auge experimentado en este sector, ha implicado la generación de importantes cantidades de RCD, los cuáles, debido a la falta de planificación para una adecuada gestión final de los mismos, se han ido depositando en vertederos, en muchas ocasiones, de forma incontrolada.

Al realizar estos depósitos de residuos de construcción y demolición, no sólo se está perdiendo o desaprovechando energía y material potencialmente reutilizable, reciclable o valorizable, sino que además, se afecta de manera muy negativa al entorno.

Forma de medir

Para medir este indicador se va a utilizar la variable **Residuos Totales Asociados (RTA)** que a su vez vendrá compuesto por la suma de las variables de cada fase de la obra, es decir, en la fabricación, el mantenimiento y el desmantelamiento de la instalación. Así:

- Residuos Generados durante la fabricación de los materiales más representativos: hormigón y acero (RGM).
 - Hormigón (RGH).
 - Acero (RGA).
- Residuos Generados durante las obras de construcción y el mantenimiento (RGC).
- Residuos Generados durante el Desmantelamiento de la instalación (RGD).

Con todo este desglose el indicador quedaría de la siguiente manera:

$$RTA = RGM + RGC + RGD = (RGH + RGA) + RGC + RGD$$

La variable **Residuos Generados durante la fabricación del Hormigón (RGH)**, se calcula entorno al 1% del hormigón generado, según las bases de datos de la empresa CEMEX.

Para los **Residuos Generados durante la fabricación del Acero (RGA)**, consultando de nuevo la Figura 2.40. Perfil medioambiental del acero, se puede ver que de la fabricación del acero obtenemos 375 kg/T de producto de escorias, que aunque en el indicador I7. Recursos Reciclados se indica que también puede ser reciclada en un alto porcentaje, al carecer de dichos datos se ha considerado que se lleva íntegramente a vertedero.

La variable **Residuos Generados durante la fase de Obra y Mantenimiento (RGC)**, valora los residuos más significativos que se puedan generar durante la fase de obra y el mantenimiento del puente. Los trabajos de mantenimiento pueden tener cierta repercusión (positiva y/o negativa), aunque su trascendencia es incomparable a la de la fase de construcción. Aun así, se ha tenido en cuenta en este requerimiento los residuos generados durante el mantenimiento a lo largo de la vida útil del puente.

El criterio de puntuación para los residuos generados durante la construcción de la infraestructura han sido las toneladas de material llevadas a vertedero, mientras que para el mantenimiento del puente durante su vida útil, al carecer de datos objetivos para dicho análisis se ha considerado un porcentaje del 1% de los residuos generados durante las obras.

La variable **Residuos Generados durante el Desmantelamiento (RGD)** si lleva asociado la generación de un gran volumen de residuos, parte de los cuales se reciclan y se reutilizan. Dado que en es un dato de difícil obtención para un puente en servicio, se ha calculado, al igual que el porcentaje de materiales reciclados, según unas horquillas de porcentajes que nos dará a su vez las toneladas que se llevan a vertedero.

Tabla 4.16. Porcentaje de generación de residuos en la fase de desmantelamiento

VARIABLE	INTERVALO
Residuos Generados durante el Desmantelamiento (RGD)	$r < 20\%$
	$20\% < r < 40\%$
	$40\% < r < 60\%$
	$60\% < r < 80\%$
	$80\% < r < 100\%$

Función de valor

La función de valor elegida es en S decreciente y con ella se quiere penalizar la generación de residuos, ya que actualmente la mayor parte de los residuos de construcción pueden ser reciclados. Tiene su valor máximo en (20; 1) y su valor mínimo en (100; 0).

Figura 4.16. Función de valor del indicador I9 Residuos

4.3.4. Energía. C6

I10. Energía incorporada a los materiales, de obra, de mantenimiento y desmantelamiento.

Objetivo

Todo proceso constructivo tiene un consumo de energía, dicho consumo es inherente y necesario para poder desarrollar la actividad constructiva en todo tipo de infraestructura, desde la fabricación de los materiales hasta la puesta en obra de la instalación.

Para poder cerrar el ciclo de vida del puente, se le suman además la energía consumida durante el mantenimiento de la instalación y la consumida durante el desmantelamiento de la misma.

Estrategia

Reducir el consumo energético durante el proceso de fabricación de los materiales y durante las obras y hacerlos más sostenibles ha de ser una prioridad en el momento de proyectar. El consumo de energía de la construcción es un factor de análisis dentro del análisis del ciclo de vida de los materiales y las construcciones, que debe estar englobado dentro de un estudio de impacto medioambiental que reúna factores como idoneidad de los materiales, capacidad de reciclaje o reutilización, adecuación a las características intrínsecas del lugar, disponibilidad de materiales autóctonos, etc.

Forma de medir

La forma de medir que se va a utilizar para este indicador es muy similar a la utilizada para el indicador I6. Agua, en el que se ha tenido en cuenta el consumo de agua de todo el ciclo de vida del puente, desde la fabricación de los materiales hasta el desmantelamiento del mismo. Así se medirá mediante la variable Energía durante el Ciclo de Vida (ECV) que está compuesto por:

- Energía consumida durante la fabricación de los materiales más representativos: hormigón y acero (EIM).
 - Hormigón (EIH). Los materiales denominados tradicionales, son los que menor consumo energético presentan por unidad de masa. No obstante su uso masivo supone una proporción considerable con respecto al gasto energético total.
 - Acero (EIA). Los materiales cuya fabricación y puesta en obra supone un mayor consumo energético por unidad de masa son los metálicos que necesitan grandes aportes de energía en su manufacturación.
- Energía utilizada en las obras de construcción y el mantenimiento (EIC).
- Energía utilizada para el desmantelamiento de la instalación (EID).

Con todo esto el indicador quedaría de la siguiente manera:

$$ECV = EIM + EIC + EID = (EIH + EIA) + EIC + EID$$

La variable **Energía Consumida en la fabricación del Hormigón (EIH)** tiene en cuenta los datos facilitados en la tabla 4.7. Perfil ambiental del hormigón anteriormente vista.

Figura 4.17. Consumo energético del hormigón convencional y reciclado

Como se puede ver en la gráfica anterior, el consumo energético del hormigón reciclado es tres veces mayor que el hormigón convencional, pero para este estudio y dado que se carecen de datos para conocer el porcentaje de hormigón reciclado utilizado en la obra, se han tenido en cuenta las diferentes resistencias que se ven en las tablas siguientes sacadas de partir de la tabla de Inventory of Carbon and Energie (ICE) de Prof. Geoff Hammond & Craig Jones de 2011.

Tabla 4.17. Porcentaje de consumo energético del hormigón

HORMIGÓN	FUEL FOSIL Y ELECTRICIDAD
Cemento	69%
Árido	3%
Transporte de materias primas	5%
Producción del hormigón	16%
Transporte del producto	7%
Total	100%

Tabla 4.18. Consumo energético del hormigón según su resistencia

HORMIGÓN	ENERGÍA - MJ/Kg
Hormigón general	0,75
16/20 Mpa	0,70
20/25 MPa	0,74
25/30 MPa	0,78
28/35 MPa	0,82
32/40 MPa	0,88
40/50 MPa	1,00

La variable **Energía Consumida en la fabricación del Acero (EIA)** tiene en cuenta lo descrito en la Figura 4.14. Coeficientes de emisiones de energía y CO₂ para la fabricación del acero, que se ha visto anteriormente.

La variable **Energía utilizada en las obras de Construcción y el mantenimiento (EIC)**, se han calculado como un porcentaje de la energía utilizada para la fabricación del material más significativo de las obras, así se ha estimado un consumo de un 2,5% de la energía para esta variable.

Al igual que en la variable anterior, la variable **Energía utilizada para el desmantelamiento de la instalación (EID)** se ha calculado en base al porcentaje de la energía utilizada durante la fabricación de los materiales, al carecer de datos objetivos de proyecto para poder valorar dicha variable.

Basándose en los datos obtenidos del desmantelamiento de las torres eólicas, se ha considerado un 1,5% de la energía de fabricación de los materiales.

Función de valor

La función que se ha utilizado para medir ese indicador es una función convexa decreciente.

Figura 4.18. Función de valor del indicador I10 Energía Total

4.3.5. Gestión Ambiental. C7

I11. Valor ecológico del emplazamiento

Objetivo

Con este indicador se pretende llevar a cabo una identificación de espacios donde se puede situar el puente para poder aplicar medidas correctoras para el aumento de la calidad del entorno y de sus vecinos tras las distintas fases de montaje y explotación.

Por ello, se considera fundamental el desarrollo de un proyecto de ordenación paisajística y sobre todo un tratamiento paisajístico. Este tratamiento, que en ningún caso eliminará la influencia negativa sobre la calidad paisajística, podría reducir la magnitud del impacto, y, por lo tanto, debe incluirse en las medidas de mejora al respecto.

Estrategia

El indicador Valor Ecológico del Emplazamiento se analiza mediante la variable Valor Ecológico del Emplazamiento (VEE) y se basa en la ley 42,2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad para clasificar y puntuar, según puede verse en la Tabla 4.19, los distintos tipos de espacios naturales. Aunque el texto no es del todo claro, de su interpretación se puede extraer la importancia relativa de unas tipologías respecto a las otras.

Forma de medir

Este indicador de Valor Ecológico del Emplazamiento (VEE) se va a medir teniendo en cuenta la tipología de espacio natural que nos podemos encontrar. Así tenemos:

Tabla 4.19. Puntuación asignada a los atributos de la variable VEE

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Valor Ecológico del Emplazamiento (VEE)	Parque	1
	Reserva natural	2
	Paisaje protegido	3
	Espacio no protegido	4
	Paisaje urbano	5

Paisaje urbano: Es el paisaje propio de núcleos urbanos o ciudades, el área habitada o urbanizada.

Espacios no protegidos: Los espacios no protegidos son aquellas áreas terrestres o marinas que no tienen reconocidos valores naturales destacables y no están sujetos, por lo tanto, a un régimen jurídico especial para su protección

Paisajes Protegidos: partes del territorio que las Administraciones competentes, a través del planeamiento aplicable, por sus valores naturales, estéticos y culturales, y de acuerdo con el Convenio del paisaje del Consejo de Europa, consideren merecedores de una protección especial.

Reservas Naturales: espacios naturales cuya finalidad es la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos que, por su rareza, fragilidad, importancia o singularidad merecen una valoración especial.

Parques: áreas naturales que en razón a la belleza de sus paisajes, la representatividad de sus ecosistemas o la singularidad de su flora, de su fauna o de su diversidad geológica, incluidas sus formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, educativos y científicos cuya conservación merece una atención preferente.

En algunos casos los técnicos pueden tener problemas para puntuar esta variable. La legislación española es particular y, tal y como explica Tolón y Lastra (2008), las Comunidades Autónomas, sin un criterio común, han creado figuras de protección que pueden crear cierta confusión.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación menos problemas se pueden causar en el medio, y por tanto más aconsejable es realizar la actuación en dicho emplazamiento. En este caso se utiliza la función "S" que se muestra en la figura 4.19, con el punto de mínima satisfacción situado en (0; 0) y el de máxima satisfacción en (5; 1). Se ha escogido esta función para restar importancia a las puntuaciones extremas.

Figura 4.19. Función de valor del indicador I11 Valor Ecológico del Emplazamiento

I12. Grado de sensibilidad a normativa ambiental. Normativa ISO 14001

Objetivo

Con este indicador lo que se quiere es valorar positivamente aquellas empresas contratistas que cuentan con el sello medioambiental ISO 14001 ya que las empresas cumplen con unos estándares internacionales de gestión ambiental de acuerdo a una norma UNE-EN que favorecen el desarrollo de la obra, sistematizando de manera sencilla los aspectos ambientales que se generan en cada una de las actividades de la obra.

Estrategia

Esta norma internacional promueve la adopción de un enfoque basado en procesos que mejora la eficacia de un sistema de gestión ambiental de la empresa y al estar basada a su vez en un ciclo de mejora continua, garantiza la calidad del servicio y los productos de la empresa. Es por ello que se considera un indicador a tener en cuenta tanto para la empresa principal como para todas las subcontratas de la empresa principal.

Forma de medir

Se propone medir este indicador de Grado de Sensibilización a Normativa (GSN) mediante una variable que considera el número total de subcontratas, junto con la contrata principal, que cuentan en su empresa el sello de ISO 14001.

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Grado de Sensibilización a Normativa (GSN)	$1 < e < 10$	1
	$11 < e < 20$	2
	$21 < e < 30$	3
	$31 < e < 40$	4
	$41 < e < 50$	5

Tabla 4.20. Puntuación de la variable de la variable GSN

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta el número de empresas con el sello ISO 9001 mayor será la valoración de la empresa y por tanto mayor será su puntuación. En este caso, se utiliza la función “S” que se muestra en la figura 4.20., con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (50 ; 1).

Figura 4.20. Función de valor del indicador I12 Calidad Medioambiental ISO 14001

4.4. REQUERIMIENTOS SOCIALES. R3

Es el encargado de valorar los efectos que el puente puede generar en las personas, de forma directa o indirecta. Los perjuicios pueden ser de carácter físico, moral, material o empresarial. La salud y el bienestar de las personas están por encima de cualquier otra consideración, de ahí que sea un elemento fundamental de la decisión. De este requerimiento se desprenden dos criterios, Sensibilidad frente a la Comunidad Local, que a su vez se divide en tres indicadores y Resiliencia, del que solo forma parte un indicador.

Tabla 4.22. Rama del requerimiento social

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
Social	Sensibilidad frente a la Comunidad Local	Información y consulta pública
		Contratación y formación del personal local
		Afectación a terceros
	Resiliencia	Resiliencia. Impacto social de la paralización

4.4.1 Sensibilidad Frente a la Comunidad Local. C8

I13. Información y consulta pública

Objetivo

El objetivo del indicador de Información y Consulta Pública es que a la hora de ubicar y realizar la construcción de una infraestructura, que afectará de una forma u otra a la población colindante, se tengan también en cuenta aquellas actuaciones que pueden causar un malestar (psicológico, que no físico) entre la población y que no serían consideradas en un análisis puramente técnico. De esta manera se pretende implicar a la Comunidad en todo el desarrollo del proyecto, incluyendo su punto de vista y sus decisiones siempre que sea posible. Asegurando que se establezca un mecanismo de atención de quejas que permita atender y canalizar las diferentes inquietudes, preocupaciones y/o solicitudes de información, que puedan surgir, en un momento dado, por parte de las comunidades cercanas al proyecto o de las autoridades locales.

Estrategia

En las últimas décadas, a medida que el sistema democrático se ha ido consolidando, el peso político, social y económico de los ciudadanos ha crecido de forma exponencial. Este cambio ha suscitado la necesidad de introducir a los sujetos pasivos (la población) en el centro de atención, como elementos claves, en los análisis estratégicos.

Forma de medir

Se propone medir este indicador mediante una variable que indique el nivel de información transmitido, la implicación de la comunidad en el proyecto y en la toma de decisiones (ITC).

Tabla 4.23. Puntuación de la variable ITC

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Información Transmitida a la Comunidad (ITC)	Publicación en el BOE	1
	Encuestas a la población local	2
	Consulta pública	3
	Estudiado las respuesta de la consulta pública	4
	Incorporación al proyecto alguna de las propuestas locales	5

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la implicación de la comunidad mayor será la satisfacción final de la actuación. En este caso se utiliza la función cóncava que se muestra en la figura 4.20., con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (5 ; 1).

Figura 4.20. Función de valor del indicador I11 Información Pública

I14. Contratación y formación del personal local

Objetivo

Este objetivo quiere proporcionar desarrollo y empleo en las comunidades vecinas promoviendo el empleo local, mejorando la capacidad de ocupación de los trabajadores de las zonas afectadas por las obras.

Estrategia

Informar de manera clara la política de contratación de mano de obra, indicando el número de puestos de trabajo requeridos y los requisitos mínimos cumpliendo con los requisitos de reclutamiento y con las políticas generales sobre trabajo, divulgando de las preferencias en la contratación de mano de obra local, acreditando además al inicio de las obras los cursos de formación a impartir que complementará la formación del personal.

Forma de medir

Este indicador se medirá mediante la suma de dos variables, una que contabilice el porcentaje de **Número de Personal Local (NPL)** contratado en relación con el personal total de la obra y la otra que contabilice el **Número de Cursos Impartidos (NCI)** al personal antes o durante el periodo de obra. Así llegamos a:

$$I14 = NPL + NCI$$

Tabla 4.24. Puntuación de la variable NPL del indicador I14

VARIABLE	ATRIBUTO	PUNTUACIÓN
Número de Personas Locales (NPL)	< 10%	1
	10% < p < 30%	2
	30% < p < 60%	3
	60% < p < 90%	4
	90% < p < 100%	5

Tabla 4.25. Puntuación de la variable NCI del indicador I14

VARIABLE	ATRIBUTO	PUNTUACIÓN
Número de Cursos Impartidos (NCI)	1 < c < 5	1
	5 < c < 10	2
	10 < c < 15	3
	15 < c < 20	4
	> 20	5

Factor de forma

Se ha establecido una factor de forma una función creciente muy similar a la función lineal, teniendo el valor mínimo en (0 ; 0) y el máximo en (10 ; 1).

Figura 4.21. Factor de forma de la función de valor I14 Contratación Local

I15. Afectación a terceros

Objetivo

Con este indicador se quieren reconocer los impactos a terceros y las afecciones que va a suponer a los vecinos y a la comunidad del entorno la construcción del puente ferroviario y que acciones correctoras se han tomado al respecto para poder mitigar dichos impactos. Estas afecciones son muy amplias y abarcan varias fases de la vida útil del puente. Así, tenemos que diferenciar entre la fase de construcción y la fase de servicio.

Estrategia

Con esta identificación de los impactos durante toda la vida útil del puente se quieren aplicar medidas correctoras para el aumento de la calidad del entorno y de sus vecinos tras las distintas fases de montaje, explotación y durante el desmantelamiento.

Forma de medir

Se propone medir este indicador de Afectación a Terceros con la variable Mitigación de Impactos (MIT) mediante dos variables que tienen en cuenta tanto el proceso constructivo (APC) como la puesta en servicio del puente (APS).

Dentro del proceso constructivo que tiene un peso de un 20% del indicador, se considera:

- **Tiempo de construcción del puente (TCP)**, que lleva ligado las molestias provocadas a los vecinos debido a la duración en el proceso constructivo.
- **Mitigación de impactos durante la construcción: acústico, visual y en la calidad del aire (MIC)**.

Dentro de la puesta en servicio que tiene un peso del 60% del indicador, se considera:

- **Mitigación de impactos durante la puesta en servicio (MIS)**. Analizando las medidas tomadas para la mitigación del posible ruido o impacto visual una vez finalizadas las obras.
- **Conectividad permitida por el puente (CPP)** en el tránsito de personas.

Dentro del proceso de desmantelamiento que tiene un peso del 10% del indicador, se considera:

- **Duración del proceso de desmantelamiento (DPD)**. Esta variable se va a medir por el tipo de puente que se haya construido y sus características constructivas.

Así, el indicador quedará:

$$\text{MIT} = 0,30 \times \text{APC} + 0,6 \times \text{APS} + 0,10 \times \text{DPD}$$

donde,

$$\text{APC} = \text{TCP} + \text{MIC}$$

$$\text{APS} = \text{MIS} + \text{CPP}$$

Para la **variable tiempo de Construcción del Puente (TCP)** se ha tenido en consideración el tiempo que han durado las obras de construcción y en el cual los vecinos se han podido ver afectados por las mismas.

Tabla 4.26. Puntuación de la variables TCP del indicador I15

VARIABLE	ATRIBUTO	PUNTUACIÓN
Tiempo de Construcción del puente (DPD)	> 3 años	1
	2 año < t < 3 año	2
	1 año < t < 2 año	3
	6 meses < t < 1año	4
	< 6 meses	5

La variable de Mitigación de Impactos durante la construcción (IDC) clasifica en tres los grandes tipos de impactos que los vecinos pueden llegar a tener durante el desarrollo de las obras y analiza las acciones correctoras que se han tomado para la mitigación de los mismos: Contaminación acústica, contaminación visual y calidad del aire.

Se entiende como contaminación por ruido cualquier emisión de sonido que afecta adversamente la salud y seguridad de los seres humanos, la propiedad ó disfrute de la misma.

Se puede decir que hay un tipo de contaminación que entra por los ojos denominada contaminación visual. Por tanto, la contaminación visual es el cambio o desequilibrio en el paisaje percibido por la vista, ya sea natural o artificial, que afecta las condiciones de vida y las funciones vitales de los seres vivientes.

Los impactos más importantes sobre la calidad del aire asociados con la fase de construcción se relacionan principalmente con la emisión de polvo a partir de las áreas desprovistas de vegetación y los movimientos de tierra, así como las emisiones gaseosas de los equipos de construcción y de los camiones que transportan materiales y/o desechos. También existe el riesgo de partículas de polvo en suspensión producto de las actividades de excavación, movimiento de tierra, hincado de pilotes y colocación de torres, entre otros.

Todos estos impactos forman parte de la variables que quedaría:

4. Metodología de la Tesis

Tabla 4.27. Puntuación de la variable MIC del indicador I15

VARIABLE	ATRUBUTO	CARACTERÍSTICAS	SI LO CUMPLE al 50%	SI LO CUMPLE al 100%
Mitigación de impactos durante la Construcción (MIC)	Mitigación Acústica	Monitoreo mensual del nivel de ruido en las zonas cercanas a los vecinos	1	2
		Limitar el tiempo de exposición del personal que se ve afectado por actividades consideradas ruidosas	1	2
		Colocación de pantallas antiruido donde se pueda molestar a los vecinos	1	2
		Asegurar que los equipos estacionarios productores de ruido se sitúan lejos de receptores sensibles	1	2
	Calidad del aire	Monitoreo mensual de la calidad del aire en 3 puntos de la obra	1	2
		Mantener húmedas las áreas de trabajo para el paso de vehículos	1	2
		Regular la velocidad dentro del área de trabajo	1	2
		Revisar que los camiones utilicen lonas para el	1	2
		Implementar con barreras vegetales si se presenta un desmejoramiento de la calidad del aire	1	2
	Mitigación visual	Cerrar la zona de obra de modo que impacte lo menos posible a los vecinos	1	2

La variable de Mitigación de Impactos durante la puesta en servicio (MIS), al igual que la variable que se ha estudiado anteriormente, va a valorar las acciones correctoras que se han aplicado en el desarrollo de la obra para integrar el puente en su entorno y no causar malestar entre la comunidad vecina.

Tabla 4.28. Puntuación de la variable MIS del indicador I15

VARIABLE	ATRUBUTO	CARACTERÍSTICAS	SI LO CUMPLE al 50%	SI LO CUMPLE al 100%
Mitigación de impactos durante la Puesta en Servicio (MIS)	Mitigación Acústica	Colocación de pantallas antiruido donde el uso del puente pueda molestar a los vecinos	1	2
	Mitigación visual	Respetar el paisaje existente implementando la vegetación y la ordenación del paisaje	1	2

La variable Conectividad permitida por el Puente (CPP) para el paso de personas analiza si la ubicación del puente ha influido en la actividad diaria de los vecinos una vez finalizados los trabajos.

Tabla 4.29. Puntuación de la variable CPC del indicador I15

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Conectividad Permitida por el Puente (CPC)	Corta vías de comunicación existente anteriormente	1
	Interfiere de manera parcial en la actividad diaria de la población	2
	No interfiere en la actividad diaria de la población	3

La variable de Duración del Desmantelamiento (DPD) al no contar con datos verídicos sobre el tiempo de desmantelamiento, se ha calculado basándose en el tipo de material utilizado para la construcción del mismo. Así, podemos diferenciar tres tipos de puentes: Metálico, Mixto y de Hormigón.

Los puentes metálicos están conformados por elementos longitudinales de sección transversal limitada, que resisten las cargas por la acción de flexión. La acción de las cargas es transversal a la longitud del elemento (acción de viga); se presentan en la sección transversal, simultáneamente, esfuerzos de tensión y compresión, complementados con los de corte, generalmente pequeños; la transmisión de fuerzas a flexión es mucho menos eficiente que la transmisión axial. Las vigas se pueden unir rígidamente con elementos verticales a través de los nudos, con la mejora en la capacidad de carga, la disminución de las deflexiones y un aumento en la capacidad de resistir fuerzas horizontales, como las de viento o sismo, conformando los pórticos.

Características de las puentes metálicos:

- Uniformidad - Las propiedades del acero no cambian considerablemente con el tiempo.
- Alta resistencia - La alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será poco el peso de las estructuras, esto es de gran importancia en puentes de grandes vanos.
- Durabilidad - Las estructuras durarán de forma definitiva si tienen un adecuado mantenimiento.
- Ductilidad - La naturaleza dúctil permite fluir localmente evitando fallas prematuras.
- Tenacidad - Poseen resistencia y ductilidad, siendo la propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades.
- Elasticidad - Se acerca más a la hipótesis de diseño debido que sigue la ley de Hooke.
- Coste de recuperación - Se los puede reutilizar como chatarra.

Los puentes mixtos, en términos de ingeniería civil, es un puente formado por acero y hormigón sin mezclarse como se da en el hormigón armado y en el pretensado. Se caracteriza por coger lo mejor de cada material, mientras el hormigón resiste la compresión, las barras de acero resisten la tracción.

Los puentes de hormigón pueden ser de dos tipos, hormigón armado, que consiste en la utilización de hormigón reforzado con barras o mallas de acero, llamadas armaduras. También se puede armar con fibras plásticas, de vidrio o de acero o combinaciones de barras de acero con fibras dependiendo de los requerimientos a los que estará sometido, o de hormigón pretensado a la tecnología de construcción de elementos estructurales de hormigón sometidos intencionadamente a esfuerzos de compresión previos a su puesta en servicio. Dichos esfuerzos se consiguen mediante barras, alambres o cables de alambres de acero que son tensados y anclados al hormigón. El objetivo es el aumento de la resistencia a tracción del hormigón, introduciendo un esfuerzo de compresión interno que contrarreste en parte el esfuerzo de tracción que producen las cargas de servicio en el elemento estructural.

Según lo visto en la teoría de puentes del capítulo 2, por norma general, los puentes metálicos son los que menor tiempo de desmontaje conllevan debido a que necesitan menor cimentación y la estructura solo se ensambla in situ, seguido de los puentes mixtos y de los de hormigón como los más desfavorables debido a que el diseño de los elementos estructurales es más complejo y por los tiempos de picado del hormigón.

Así, llegamos al siguiente cuadro de valoración:

Tabla 4.30. Puntuación de las variables DPD del indicador I15.

VARIABLE	ATRIBUTO	PUNTUACIÓN
Duración de desmantelamiento del puente (DPD)	Hormigón	1
	Mixto	2
	Metálico	3

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque cuanto mayor puntuación haya obtenido el puente más acciones ha tomado la empresa constructora para mitigar los impactos negativos a la comunidad de vecinos. En este caso se utiliza la función en S muy poco pronunciada que se muestra en la figura 4.22., con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (12 ; 1).

Figura 4.22. Factor de forma de la función de valor del indicador I15 Afecciones a Terceros

4.4.2. Resiliencia. C9

I16. Impacto social de la paralización

Objetivo

Este indicador evalúa la afectación física que puede padecer la población humana como consecuencia directa de la aparición de un daño grave en el elemento estructural que se está analizando. En este indicador se considera todo tipo de persona que pueda tener relación con la estructura, desde el vecino al excursionista, pasando incluso por los trabajadores de la empresa responsable de la explotación que se encargan de realizar las tareas de vigilancia, mantenimiento y conservación de la estructura.

Estrategia

La población humana es un grupo de personas que ocupan un área geográfica determinada, en este caso, el área geográfica colindante a la estructura y los núcleos urbanos que une. El sustantivo grupo y el verbo ocupar son esenciales para la concepción del indicador.

Un grupo de personas puede estar compuesto por un número diverso de integrantes. Cuanto mayor es el número que forma una población más delicada es la situación, al ser mayor el número de posibles afectados como consecuencia de la manifestación de un daño. Por otro lado, existen diversas maneras de ocupar un territorio. Cuanto más tiempo

pasa una persona en la estructura o cerca de ella, más fácil es que el daño pueda causarle algún tipo de perjuicio.

Por tanto, la vulnerabilidad de la población es mayor cuanto más grande es el número de personas que la forman y cuanto más tiempo pasan éstas en los alrededores de la estructura.

Forma de medición

Se propone medir este indicador mediante seis variables que tienen en cuenta:

- **El Número de Personas Afectadas (NPA)** cuantifica la población que, ocupando el espacio colindante al elemento estructural, puede verse afectada por el daño detectado en la estructura.
- **El Alcance Territorial de la Interrupción (ATI)** divide las infraestructuras afectadas en cinco grupos, tal y como se puede ver en la tabla 4.X. A mayor alcance, menor puntuación se asigna a la variable. En el caso de que un mismo daño pueda afectar a infraestructuras clasificadas con distintos alcances, la puntuación que se debe considerar es la mayor posible.
- **El Tiempo de Interrupción del Servicio (TIS)**, ante la imposibilidad de definir cantidades exactas de tiempo, establece unos intervalos numéricos para determinar de forma aproximada la duración de la afectación. Tal y como se muestra en la tabla 4.X, cuanto más dura la interrupción menor es la puntuación asociada a esta variable.
- **El Riesgo de Acciones Sísmicas (RAS)**. Si bien, esta variable ya está incluida en el estudio previo a cualquier proyecto de construcción civil, hoy en día, debido al incremento de la temperatura mundial con respecto a la era preindustrial, se están dando cambios bruscos en el clima no contemplados en dichos cálculos que se valoran con esta variable en función de la infraestructura montada (Conferencia de Clima de París (COP21)).
- **El Riesgo por Avenidas Torrenciales (RAT)**, se ha considerado, al igual que la variable anterior el incremento de la temperatura global. Desde 1961 hasta 2003 la temperatura global del océano ha subido 0,1 °C desde la superficie hasta una profundidad de 700 m y se estima un aumento de 1°C en el 2100. Según varios modelos climáticos mundiales (NASA GMAO, NOAA NCEP) fenómenos como El Niño producirán fenómenos meteorológicos extremos que hoy en día no se tiene en cuenta en la redacción de proyectos.
- **El Riesgo por Acciones Terroristas (VAT)**,

Todas ellas sería el sumatorio del Impacto Social de la Paralización:

$$I16 = NPA + ATI + TIS + RAS + RAT + VAT$$

El Número de Personas Afectadas (NPA) divide la población en cinco intervalos en función de la cantidad de personas que pueden resultar damnificadas, tal y como se puede ver en la tabla 4.32. Cada grupo tiene asociada una puntuación, cuanto mayor es el número de posibles afectados menor es la puntuación que se le asigna a la variable.

Tabla 4.32. Puntuación de la variable NPA del indicador I16

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Número de Personas Afectadas (NPA)	$n^{\circ} > 10.000$	1
	$5.000 < n^{\circ} < 10.000$	2
	$2.000 < n^{\circ} < 5.000$	3
	$500 < n^{\circ} < 2.000$	4
	$0h < n^{\circ} < 500$	5

La variable Alcance Territorial de la Interrupción (ATI) divide las infraestructuras afectadas en cinco grupos, tal y como se puede ver en la tabla 4.33. A mayor alcance, más puntuación se asigna a la variable. En el caso de que un mismo daño pueda afectar a infraestructuras clasificadas con distintos alcances, la puntuación que se debe considerar es la mayor posible.

Tabla 4.33. Puntuación de la variable ATI del indicador I16

VARIABLE	ATRIBUTO	AFECTADOS POTENCIALES	PUNTUACIÓN
Alcance Territorial de la Interrupción (ATI)	Internacional	afectados > 2 millón	1
	Nacional	1 millón > afectados > 2 millón	2
	Regional	500.000 > afectados > 1 millón	3
	Comarcal	100.000 > afectados > 500.000	4
	Local	10.000 > afectados > 100.000	5

Internacional: La infraestructura afectada comunica nuestro país con algún país vecino.

Nacional: La infraestructura afectada sirve a una parte importante del país (a diferentes comunidades autónomas). Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las líneas de trenes de alta velocidad.

Regional: La infraestructura afectada se utiliza para prestar servicio a un espacio significativo de una comunidad autónoma o una de sus grandes ciudades. Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las líneas de ferrocarril de vía ancha.

Comarcal: La infraestructura afectada sirve a una parte significativa de la población de una comarca o a su capital. Se clasifican aquí, por ejemplo, las líneas de ferrocarril de vía estrecha o las líneas Regionales.

Local: La infraestructura afectada sirve a una pequeña comunidad que puede, por norma general, encontrar alternativas al servicio. Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las líneas de Cercanías.

La variable Tiempo de Interrupción del Servicio (TIS) que valora el tiempo que el servicio esta interrumpido.

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Tiempo de Interrupción del Servicio (TIS)	Indefinido (> 5días)	1
	$3d < t < 5d$	2
	$1d < t < 3d$	3
	$12h < t < 24h$	4
	$0h < t < 12h$	5

Tabla 4.34. Puntuación de la variable TIS del indicador I16

Para la **variable por Riesgo de Acciones Sísmicas (RAS)**, se ha aplicado la Norma de Construcción Sismorresistente, NCSP-07, aprobada en el Real Decreto 637/2007 de 18 de mayo. Esta Norma tiene como objeto proporcionar los criterios que han de seguirse dentro del territorio español para la consideración de la acción sísmica en la realización de todos los proyectos de de carretera y de ferrocarril. Según la norma, no será necesaria la consideración de acciones sísmicas cuando la aceleración sísmica horizontal básica (a_b) del emplazamiento o la aceleración sísmica horizontal de cálculo (a_c) sean inferiores a 0.04 g, siendo g la aceleración de la gravedad.

Se define en el apartado 3.4 de la Norma por medio del Mapa Sísmico y en el anejo 1 de la norma se detalla por municipios los valores de la aceleración sísmica básica iguales o superiores a 0.04 g. De esta forma se fija, para cada zona del territorio español, el valor de la aceleración sísmica básica a_b .

Se incluye a continuación el mapa de peligrosidad sísmica recogido en la NCSP-07 (Figura 4.23.).

Figura 4.23. Peligrosidad sísmica en España

Según lo anteriormente expuesto tendríamos la siguiente puntuación:

Tabla 4.35. Puntuación de la variable RAS del indicador I16

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Riesgo de Acciones Sísmicas (RAS)	$i > VIII$	1
	$i = VIII$	2
	$i = VII$	3
	$i = VI$	4
	$i < VI$	5

Para la **variable por Riesgo de Avenidas Torrenciales (RAT)**, se ha tenido en cuenta el mapa de precipitaciones medias en España (Figura 4.24.), junto con los puntos más expuestos de la península a sufrir grandes avenidas y gota fría debido a sus bajas precipitaciones y a sus altas temperaturas (Figura 4.25.).

Figura 4.24. Precipitaciones medias anuales en España
Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España

Figura 4.25. Precipitaciones torrenciales medias en España

Así, teniendo en cuenta ambos mapas, y la puntuación de dicha variable quedaría:

Tabla 4.36. Puntuación de la variable RAT del indicador I16

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Riesgo de Avenidas Torrenciales (RAT)	$50 < p < 70$	1
	$30 < p < 50$	2
	$10 < p < 30$	3
	$2 < p < 10$	4
	$0,2 < p < 2$	5

Los recursos generados para la prevención y atención a desastres por parte del Gobierno son generalmente sumas de dinero significativamente altas. Estos recursos se asignan con la intención de reparar daños ocasionados por cambios climáticos y comportamiento no esperado de la naturaleza.

La Variable por Acciones Terroristas (VAT) tiene en cuenta la perturbación que supone para la población que una vía de conexión se vea afectada por una acción terrorista cuando un artefacto explosivo interfiere en la tranquilidad de la sociedad, afectando intencionalmente a toda la población. Una consecuencia de mucha atención es la parte económica, pues el movimiento de las personas a sus lugares de trabajo, estudio y vivienda ya no se encuentra a su alcance y, por tanto, se consigue generar molestia, inseguridad y desconfianza de la población con respecto a la acción reparadora del sector social del Gobierno.

Se ha clasificado esta variable teniendo en cuenta, el tipo de tren que circula por la vía, los núcleos de población que une el puente ferroviario y si existe medio de transporte alternativo para la comunidad de vecinos. Así tenemos:

Tabla 4.37. Puntuación de la variable VAT del indicador I16

VARIABLE	INTERVALO	PUNTUACIÓN
Riesgo de Acciones Terroristas (VAT)	Regionales	1
	Largo Recorrido	2
	AVE	3
	Cercanías	4

Cercanías: Las líneas de cercanías están en los grandes núcleos urbanos y siempre existe transporte alternativo.

AVE: Las ciudades comunicadas por la alta velocidad, tendrían como medio de transporte alternativo el avión.

Larga Distancia: Los trenes de larga distancia unen núcleos de población de tamaño medio que por norma general tienen como transporte alternativo el autobús.

Regionales: Los trenes de regionales suelen unir núcleos de población de menor tamaño, que paran en muchos pueblos y cuyo transporte público alternativo se hace más difícil.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación menos necesario es el puente para el desarrollo cotidiano. En este caso se utiliza la función en S que se muestra en la figura 4.26, con el punto de mínima satisfacción situado en (5; 0) y el de máxima satisfacción en (30; 1).

Se ha escogido esta función porque permite dar relevancia a la falta de cualquier servicio, por pequeña que sea la región afectada y por poco que dure la interrupción.

Figura 4.26. Función de valor del indicador I16 Resiliencia

En este indicador, según lo establecido hasta el momento, dos puentes con la misma puntuación obtendrían la misma valoración. Siendo irrelevantes las características del puente y de su entorno, factores que ya se tienen en cuenta en los otros dos requerimientos.

4.5 PESOS DEL ÁRBOL DE REQUERIMIENTOS

Tras analizar cada uno de los requerimientos del árbol de toma de decisiones, en la Figura 4.38. se representa el árbol de toma de decisión con los pesos asignados a cada uno de los indicadores, criterios y requerimientos. La asignación de pesos se ha realizado en orden descendente, es decir, primero se ha determinado el peso de los requerimientos, después el de los criterios y finalmente el de los diferentes indicadores. Para determinar el peso de los tres requerimientos se ha consultado a técnicos en la materia y diversos expertos para obtener unos resultados lo más objetivos posibles:

$$\Sigma \lambda_{R_x} \times (\lambda_{C_x} \times \lambda_{I_x})$$

Figura 4.38. Pesos del árbol de toma de decisiones

5 APLICACIÓN A ESTRUCTURAS EXISTENTES. PUENTES FERROVIARIOS

El principal objetivo de este capítulo es contrastar la validez y efectividad de la metodología diseñada en el capítulo anterior mediante su aplicación en dos estructuras reales, de características técnicas y de servicio diferentes. De esta manera se pretende demostrar, también, la versatilidad de la herramienta porque al tener estas dos estructuras unos tráficos que difieren ligeramente, los árboles del modelo de decisión, a pesar de tener la misma estructura y los mismos pesos, van a indicar áreas diferentes.

A fin de demostrar de forma práctica todo lo expresado en el capítulo anterior se han elegido dos casos de estudio de puentes ferroviarios ya construidos. Se han tomado dos tipos de construcciones, un puente mixto y un puente de hormigón.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO. PROYECTO DE ALTA VELOCIDAD. PUENTE DE HORMIGÓN SOBRE LA M-40 EN MADRID.

Figura 5.1 Foto del puente en su paso por la M-40

5.1.1 Descripción del proyecto

El Proyecto contempla el diseño de las obras de 8,73 Km de línea de Alta Velocidad, la cual incluye como elementos significativos los viaductos de Abroñigal (149 m), Santa Catalina (429 m) y sobre la M-40 (649 m), que es el viaducto sobre el que se ha realizado el estudio. El estudio de este viaducto se ha realizado sobre el proyecto inicial, habiendo pequeñas variaciones de forma con respecto a lo finalmente ejecutado.

El Proyecto incluye además todas las actuaciones destinadas a posibilitar su construcción, integración medioambiental y posterior mantenimiento de sus características funcionales. El trazado discurre por el Término Municipal de Madrid, con una dirección norte-sur, de forma paralela al corredor ferroviario formado por las líneas de cercanías C3 y C4 y por las líneas de alta velocidad Madrid-Sevilla y Madrid-Barcelona. Los últimos 140 m del tramo discurren por el Término Municipal de Getafe.

Figura 5.2. Fotografía del viaducto

Geológicamente los 8,73 kilómetros del trazado discurren de norte a sur en materiales de la Cuenca Terciaria del Tajo: arenas y arcillas, y margas yesíferas, yesos y calizas.

El trazado comienza en el P.K. 100+000, discuriendo sobre la plataformas existente de la línea de cercanías C4 durante 2,65 km., para a continuación salir de la misma y

situarse paralela al corredor ferroviario de salida sur de Madrid, hasta el límite de los términos municipales de Madrid y Getafe.

La plataforma ferroviaria en la nueva Línea de Alta Velocidad dispone de una anchura de 14 m.

El trazado en alzado viene condicionado por el cruce con las numerosas infraestructuras existentes, manteniendo el perfil longitudinal de la línea de cercanías C4 en el tramo en el que se ocupa la plataforma existente, y siguiendo la cota del trazado de la Línea Madrid-Sevilla a continuación, mientras éste se sitúa paralelo a la misma. Así cuenta con 3 viaductos:

Viaducto de Abroñigal.

Este es el primero de ellos, de 149 m de longitud, con dos tramos, el primero de ellos con una sección de losa aligerada de hormigón, y el segundo tramo diseñado como arco metálico con tablero inferior.

Viaducto de Santa Catalina.

Viaducto de 429 m de longitud, con tres partes diferenciadas. La primera formada por tres vanos con tablero de vigas artesas prefabricadas, la segunda zona formada por una estructura en pérgola, con vigas en doble T, y una tercera zona donde nuevamente se disponen vigas artesas prefabricadas.

Figura 5.3. Situación del viaducto sobre la M-40

Viaducto sobre la M-40

Viaducto de 649 m de longitud, con el que se cruza el nudo supersur de la M-40 y las futuras vías de servicio de la M-40. Presenta una sección en cajón de hormigón, cuya primera zona se ejecutará mediante el empuje del tablero, y la segunda parte mediante cimbra autoportante.

El Viaducto sobre la M-40 está formado por trece (13) vanos con luces de $36,85 + 53,60 + 67,00 + 3 \times 60,30 + 67,00 + 53,75 + 4 \times 40 + 30$ m y por tanto una longitud total de 649,1 m, que se extiende desde el p.k. 104+498,383 hasta el 105+147,483. Esta longitud permite salvar todo el nudo supersur de la M-40 con los 5 primeros vanos, utilizando el resto de los vanos para cruzar sobre el camino de la antigua carretera de Villaverde a Vallecas, sobre las futuras calzadas de servicio de la M-40 y sobre la vía de contorno que une Villaverde con Vallecas. El vano de 67 m se ha adoptado por ser el necesario para cruzar sobre los ramales existentes y futuros del nudo supersur de la M-40, con el mínimo número de apoyos, para reducir al máximo la interferencia durante las obras.

Figura 5.4. Sección del centro del vano

La solución consiste en un cajón de canto constante de 4,5 m, de hormigón pretensado y almas y tablas de espesor variable. Se plantean almas inclinadas con pendiente 1/10.

En el vano entre las pilas P-8 y P-9, el canto varía linealmente entre esos 4,50 m y 3,0 m en los últimos vanos.

Constructivamente presenta dos partes claramente distintas:

- Desde el estribo 1 hasta rebasar los viales actualmente en servicio de la M-40 la construcción se resuelve mediante empuje. Las condiciones de trazado lo permiten, al tratarse de un tramo recto hasta el PK 104+797,004, situado aproximadamente 10 m más allá de la pila 5. Por otra parte, es posible ubicar un parque de empuje en el estribo 1, que cuenta con acceso y espacio suficiente.
- A partir de este punto, se puede resolver la construcción directamente cimbrada al terreno, al tratarse de alturas pequeñas de pila (menos de 10 m), y no existir afecciones actualmente. El único punto más delicado es el paso sobre el ferrocarril, donde localmente se ubicaría una cimbra porticada.

Figura 5.5. Refuerzos de pretensado en tramos cimbrados

El empuje se llevaría a cabo con una nariz de lanzamiento en punta. Dado que el peso de las soluciones de hormigón no permite grandes velocidades de empuje, no es posible salvar el paso sobre las carreteras y autovías en una noche: Por tanto, se deberán estudiar, de acuerdo con las Administraciones afectadas, los momentos en que se puede llevar a cabo el empuje y los que debe detenerse, de acuerdo a las medidas de seguridad oportunas en las vías de circulación.

Las pilas están condicionadas por un lado por el ancho necesario para ubicar los apoyos en cabeza y por el otro por respetar los gálibos frente a los viales inferiores.

Figura 5.6. Alzado de pila 1

La pila P-2 se sitúa al norte del ramal de salida desde la M-40 dirección sur hacia la A-4 dirección Madrid, a una distancia entre el eje de la pila y el borde de arcén de 1,78 m,

si bien la excavación de la zapata a pesar de utilizarse para su ejecución una pantalla de micropilotes afecta al carril derecho del ramal.

Figura 5.7. Sección por pilas

La pila P-3 se sitúa entre el tronco de la M-40 dirección sur y el ramal de conexión de la A-4 con la M-40. Al igual que la pila P2, la pila se sitúa fuera de las calzadas actuales, pero la excavación de la zapata afecta al carril izquierdo del ramal de conexión de la A-4 con la M-40.

La pila P5, a pesar de estar más alejada que las anteriores del ramal de conexión de la A-4 con la M-40, afecta puntualmente con su excavación al arcén del carril derecho del ramal, estando el resto de pilas del viaducto P-6 a P-12 fuera de la plataforma del nudo de la M-40, por lo que pueden ejecutarse sin interferir en la circulación viaria por este nudo de carreteras.

Figura 5.8. Planta de la pila 5 del viaducto sobre la M-40

Por lo que respecta al gálibo vertical, el viaducto mantiene una distancia vertical entre cota inferior de la estructura y cota de la calzada de los ramales de la M-40 de 7,97 m en su zona más restrictiva, por lo que la distancia es suficiente para el paso de vehículos.

El perfil longitudinal del trazado en la zona del viaducto presenta una pendiente ascendente del 1.8% hasta el vano 6, y un nuevo acuerdo parabólico desde el PK 104+817.

En planta el trazado de la primera parte del viaducto es recto, desde el estribo E-1 hasta el vano 6, situado aproximadamente 15 m más allá de la pila 5. Desde este punto se desarrolla una clotoide que desemboca en un tramo circular de radio 2500m.

La sección transversal está formada por un cajón con 2 almas verticales con 4,00 de voladizo a cada lado, un ancho inferior de 6,00m y un ancho total superior de 14,00. El canto varía, en los 7 primeros vanos es de 4,50 para salvar las luces de hasta 67,00m y en cambio en los vanos restantes se reduce hasta los 3,00m para permitir un gálibo definitivo sobre la línea de tren que pasa de 6,50m.

Las pilas son octogonales de 3,50x3,50. La geometría viene dada para reducir la afeción a los ramales y las vías sobre las que pasa.

Los estribos son cerrados, siendo el estribo fijo el E1 y el móvil el E2. El aparato de dilatación de vía se dispone en el estribo E2, para ello, dicho estribo se proyecta como un cajón cerrado en el cual se puede disponer el aparato de dilatación de vía sobre él y evitar cualquier giro relativo, provocado por asentamientos del terraplén, entre el aparato de dilatación y el tablero.

Figura 5.9. Situación en planta de todas las pilas y los estribos

Las cimentaciones son pilotadas con pilotes de 1.500 a 1.800 m de diámetro.

En construcción el tablero se empuja desde el estribo 1 hasta pasada la pila P5 para reducir la afección a la M-40 y sus ramales de encuentro. Mientras desde pasada la pila P5 hasta el estribo 2 se ejecuta con autocimbra ya que con los condicionantes de trazado (zona en clotoide y acuerdo vertical) y el canto variable el tramo no es empujable.

Para la ejecución de las pilas P2, P3 Y P4 se ejecutan unas pantallas provisionales que evitan el corte de más de un carril de los ramales de la M-40. Mientras en las pilas P10 y P11 se ejecutan otras pantallas provisionales para evitar afecciones a las vías existentes.

La estructura está proyectada para una vida útil de 100 años.

Figura 5.x. Alzado del viaducto

Figura 5.10. Pilas del viaducto

5.1.2 Aplicación del método

Para poder comenzar con la aplicación del método, se ha realizado un estudio del proyecto y de las acciones ejecutadas durante la realización del mismo.

Se ha tenido en cuenta el marco normativo de aplicación, las disposiciones generales del proyecto, así como todas las prescripciones técnicas aplicadas para el desarrollo de la obra.

En concreto, se han estudiado los capítulos para:

- Desarrollo de la vigilancia ambiental.
- La protección de la calidad del agua y el sistema de depuración.
- Afección por ruidos y vibraciones.
- Protección atmosférica.
- Ensayo, estudio y análisis de materiales.
- Aprovechamiento de la estructura existente.
- Terrenos disponibles para la ejecución de las obras.
- La integración ambiental del proyecto.
- Tratamiento y gestión de residuos. Reciclado.

De todo la documentación revisada se sacan los cálculos para cada uno de los requerimientos:

R1. REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS

C1. COSTES DE EJECUCIÓN DE LA OBRA

I1. Costes de la obra.

Los costes totales de ejecución contrata para la construcción del viaducto de la M-40 ascienden a 20.847.156,20 € donde como se puede ver en la gráfica siguiente, el gran peso de la obra recae en la estructura del viaducto:

Figura 5.11. Costes de la construcción del viaducto sobre la M-40.

De esta forma, la puntuación para este primer indicador queda de la siguiente manera:

Figura 5.12. Puntuación de la función de valor para el indicador I1 Costes Totales.

I2. Costes por no calidad. ISO 9001.

Figura 5.13. Puntuación de la función de valor para el indicador I2 Costes por no calidad.

C2. COSTES DE EXPLOTACIÓN DE LA OBRAI3. Costes de servicio, mantenimiento y desmantelamiento.

Este indicador se mide con la variable costes tras la construcción (CTC) que a su vez lo forman dos variables:

$$CTC = CSM + CDI$$

Los costes de servicio y mantenimiento (CSM), que vienen dados por el tipo de puente que se va a construir, en este caso un puente de hormigón lleva asociados los costes de mantenimiento que a continuación se detallan:

COSTE DE SERVICIO Y MANTENIMIENTO (CSM)	Nº INSPECCIONES	IMPORTE UNITARIO (€)	RESULTADOS
Inspección básica cada 24 meses	50	1.000,00	50.000,00
Inspección principal cada 5 años	20	2.500,00	50.000,00
Refuerzo hormigón para pilares	10	59,90*m	10.531,02
Refuerzo hormigón estructural	5	192,24*m2	1.746.692,64
TOTAL			1.857.223,66

Tabla 5.1. Costes de mantenimiento y servicio de un puente de hormigón

Para poder calcular los refuerzos en los pilares a lo largo de su vida útil, hay que calcular la altura de cada uno de ellos, así tenemos:

Nº PILA	ALTURA (m)
1	9,240
2	16,168
3	21,204
4	21,687
5	20,169
6	14,733
7	17,216
8	11,388
9	12,319
10	10,839
11	10,199
12	10,649
TOTAL	175,81

Tabla 5.2. Altura de los pilares del puente

Para la variable del mantenimiento de la estructura, el proyecto propone unos puntos y frecuencias de revisión, que se detallan a continuación y que se corresponden con los parámetros marcados en el capítulo 4:

La estructura se ubicara a la salida de Madrid, en un entorno suburbano en el que coexisten diversas plataformas de transporte terrestre, tanto viario como ferroviario. En cualquier caso, no se esperan dificultades de acceso a la estructura.

En cuanto a la climatología de la zona, la estructura se halla en una zona de clima mediterráneo continentalizado. En el cuadro de materiales de la estructura se especificó un ambiente IIb para los hormigones vistos, propio de exteriores en ausencia de cloruros con una precipitación media anual inferior a 600 mm. Dado que las temperaturas en Madrid son extremas, con riesgo probable de heladas y potencial de nevadas en invierno, no se permitirá el uso de sales fundentes.

Entre las operaciones de mantenimiento previstas que se deberán realizar a lo largo de la vida útil de la estructura, se puede diferenciar entre las inspecciones básicas y las principales.

Las primeras se consideran incluidas dentro de las operaciones ordinarias de conservación de líneas ferroviarias, mientras que las segundas surgen como necesidades específicas debido a daños y/o degradaciones de los elementos

constituyentes de la estructura a causa del paso del tiempo, al propio uso de la estructura, así como por situaciones especiales.

Inspecciones básicas o rutinarias. Se realizan en todos los puentes ferroviarios de nueva construcción o en servicio, de competencia estatal, en los que la luz de alguno de sus vanos sea igual o superior a 6 m (seis metros), independientemente de su tipología o material constructivo. Su objetivo es hacer un seguimiento visual periódico del estado de la estructura para detectar lo antes posible fallos aparentes que podrían degenerar en daños mayores. Se realizarán con una periodicidad bienal y a cargo de personal de vigilancia e inspección general de la línea, con buen conocimiento práctico de las obras y una formación básica en técnicas de inspección de puentes.

Inspecciones principales. Tienen como objetivo la determinación minuciosa, de forma visual, del estado de los deterioros de los elementos. La diferencia fundamental con las anteriores es que se realiza por personal técnico titulado con competencia legal para ello y con experiencia probada en patología estructural. Además, de estas inspecciones se obtiene una marca de condición de cada puente, distinguiéndose entre daños de clase 1 y de clase 2. Los de clase 1 pueden afectar a la seguridad de la estructura y, por tanto, a su capacidad de resistir las cargas para las que fue proyectada. Los de clase 2 pueden afectar a la equipamiento o a la vida útil de la estructura (seguridad estructural a largo plazo). Estas inspecciones se llevan a cabo cada 5 años, y la primera de ellas se efectúa conjuntamente con la prueba de carga previa a la puesta en servicio de la estructura.

Los costes de desmantelamiento de la instalación (CDI), que al tratarse de un puente de hormigón se ha calculado su importe como un 5% del importe de construcción.

$$20.847.156,20 \text{ €} \times 5\% = 1.042.357,81 \text{ €}$$

Sumando las 2 variables y teniendo en cuenta la superficie del viaducto obtenemos un resultado de 319,13 €/m².

Figura 5.14. Puntuación de la función de valor del indicador I3. Costes de mantenimiento y desm.

I4. Resiliencia frente a eventos no previstos.

Este indicador se mide en función del puente a construir, que en nuestro caso se trata de un puente de hormigón isostático. La moderada altura de las pilas permite el tipo de apoyo isostático, transmitiendo la fuerza horizontal del tramo a cada pila, lo que evita la disposición de aparatos de dilatación de vía, por lo que el proyecto obtendría un puntuación de 1 punto.

Figura 5.15. Puntuación de la función de valor del indicador I4 Resiliencia.

R2. REQUERIMIENTOS MEDIO AMBIENTALES

C3. CONSUMO DE MATERIALES

I5. Recursos naturales.

El indicador de recursos naturales se va a medir mediante la variable de materias primas principales (MPP), que consta a su vez de las materias primas obtenidas en cantera y gravera para el proyecto (MCG), así como de las materias primas utilizadas para la fabricación del hormigón (MPH) y el acero de la obra (MPA).

$$MPP = MCG + MPH + MPA$$

Para la variable (MCG) en el proyecto se indica que los préstamos necesarios, una vez comprobado que la cantidad de material procedente de excavación es insuficiente, deben obtenerse de canteras y graveras existentes y con planes de restauración aprobados. Debido a la mala calidad de los terrenos atravesados por la traza se ha decidido que el total de los volúmenes necesarios para los terraplenes ha de provenir de canteras.

Para la obtención de los volúmenes necesarios de balasto, subbalasto, capa de forma y rellenos se ha considerado como más conveniente la utilización de materiales procedentes de canteras existentes en la Comunidad de Madrid, que poseen materiales perfectamente válidos para estos fines.

El volumen procedente de canteras y graveras para esta obra es el que se detalla en la figura siguiente, con lo que resulta un volumen total de áridos utilizado en las obras es de 1.212.536,84 m³.

Tabla 5.3. Volumen de materiales necesarios para la obra

MATERIAL	VOLUMEN (m ³)
Subbalasto	31.026,45
Capa de forma	69.769,67
Zahorra artificial	7.273,20
Suelo Seleccionado	8.186,20
Arena de miga	800,70
Coronación de terraplén	107.234,36
Terraplenes o rellenos	988.246,26
Material a vertedero	507.835,91

Para las 2 variables restantes que formarían el indicador se han sacado del proyecto los datos de las tablas 5.4 y 5.5, que teniendo en cuenta lo expuesto en el capítulo 4 para este indicador, obtendríamos un 78% de materias primas del hormigón y un 53% de materias primas del acero.

Tablas 5.4.y 5.5. M3 de hormigón y KG de acero utilizados para la estructura

TIPO DE HORMIGÓN	VOLUMEN (m ³)
HL-150	242,06
HP-50	8.566,66
HA-30	19.322,07
HA-35	5.498,37
HA-40	881,26
TOTAL	34.510,42

TIPO DE ACERO	Kg
Barras	4.468.235,87
Acero pretensado	401.924,36
TOTAL	4.870.160,23

Con todo lo anteriormente expuesto y teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura de 649 m de longitud por 14 m de ancho llegamos a:

Figura 5.16. Puntuación de la función de valor del indicador I5 Recursos Naturales

I6. Agua Consumida.

Las variables que intervienen en este indicador son el agua consumida durante la vida útil del puente (AVU) que a su vez, como en el resto de los indicadores, es el sumatorio

de los consumos de agua durante la fabricación de las materias primas (AIH) y (AIA), durante la construcción (AIC) y mantenimiento del puente y por último durante su desmantelamiento (AID):

$$AVU = AIH + AIA + AIC + AID$$

Para las dos primeras variables, en este proyecto tenemos:

Tabla 5.6. Resultados de las variables AIH y AIA

MATERIAL	VOLUMEN (M ³)	PESO (t)	Agua consumida (l)
Hormigón total	34.510,42	86.276,05	6.902.084,00
Acero total	--	4.870,16	29.220.961,38
TOTAL			36.123.045,38

El consumo estimado de agua para la construcción y la puesta en servicio de la instalación (AIC) es de 82.200 l, según la tabla 4.10. Puntuación de la variables AIC, para una duración estimada en la construcción del puente de entre 2 años-3 años. La duración de las obras del proyecto completo es mucho más extensa, pero solo se ha considerado la duración de las obras para el viaducto de estudio.

Por último, para el consumo de agua estimado para el desmantelamiento del puente (AID), al tratarse de un puente de hormigón, tenemos un consumo estimado de 12.000l.

Todo ello hace que la puntuación del indicador I6. Consumo de agua para este puente sea de 3,98 miles l/m².

Figura 5.17. Puntuación de la función de valor del indicador I6. Consumo de agua

I7. Recursos Reciclados.

Como en el resto de indicadores estudiados hasta el momento, este indicador se va a dividir en varias variables que comprenden cada una de las partes del ciclo de vida de la instalación, así tenemos el material total reciclado (RTR):

$$\text{RTR} = \text{PHR} + \text{PAR} + \text{PAO} + \text{PMD}$$

Tal y como se ha determinado en el indicador I7 del capítulo 4, en la fabricación del hormigón (PHR) y el acero (PAR) se utiliza un porcentaje elevado de recursos reciclados, que correspondería con el 22% de hormigón y el 47% del acero, por lo que teniendo en cuenta los pesos de dichos materiales para esta obra, tenemos:

Tabla 5.7. Resultado de las variables PHR, PAR y PAO

MATERIAL	VOLUMEN (M ³)	PESO (t)	MATERIAL RECIKLADO
Hormigón total	34.510,42	86.276,05	18.980,73
Acero total	--	4.870,16	2.288,98
Aridos totales	--	--	0,00
TOTAL			21.269,71

Como ya hemos visto en la presentación de esta obra, dada la situación del viaducto y el estudio de materiales que se ha realizado, no se puede aprovechar nada del material obtenido en las excavaciones, por lo que no se cuenta con áridos reciclados (PAO).

Por último, para el desmantelamiento de la instalación, al tratarse de un puente de hormigón se ha estimado un aprovechamiento del 25% del hormigón utilizado, que correspondería a 22.786,55 T de hormigón junto con el acero del armado y el pretensado.

Todo ello nos arroja un resultado de 82,03 T/ m² de puente.

Figura 5.18. Puntuación de la función de valor del indicador I7 Recursos Reciclados

C4. EMISIONES

I8. Emisiones de CO₂.

Este indicador está compuesto por varias variables que son el sumatorio de la variable emisiones de CO₂ totales que es la variable de medición del indicador I8.

$$ECO = ECH + ECA + ECV + ECD$$

Como en el resto de indicadores, las dos primeras variables son las emisiones de CO₂ en la fabricación de los materiales más significativos de la obra, el hormigón (ECH) y el acero (ECA), que para los pesos y los tipos de material de la obra, quedaría:

Tabla 5.8. Emisiones de CO₂ para el hormigón y el acero

TIPO DE HORMIGÓN	VOLUMEN (M ³)	Kg CO2 e
HL-150	242,06	91.378
HP-50	8.566,66	3.233.914
HA-30	19.322,07	5.458.485
HA-35	5.498,37	1.649.511
HA-40	881,26	290.816
TOTAL		10.724.103

TIPO DE ACERO	PESO (Kg)	Kg CO2 e
Barras	4.468.235,87	6.255.530
Acero pretensado	401.924,36	586.810
TOTAL		6.842.340

El transporte de estos materiales a obra y de las materias primas de los materiales hasta las fábricas nos daría un resultado:

5. Aplicación a Estructuras Existentes. Puentes Ferroviarios

Tablas 5.9. Producción de CO₂ del hormigón y el acero en el transporte

HORMIGÓN	%	T DE CO ₂
Cemento	83%	111.262,573
Árido	1%	1.340,513
Transporte de materias primas	3%	4.021,539
Producción del hormigón	8%	10.724,103
Transporte del producto	5%	6.702,565
Total	100%	134.051,292

ACERO	%	T DE CO ₂
Transporte de materias primas	4%	304,104
Producción del acero	90%	6.842,340
Transporte del producto	6%	456,156
Total	100%	7.602,600

Las distancia de trasporte hasta las fabricas del material o hasta obra, se ha calculado según porcentajes debido a las dificultades para hallar la procedencia de los materiales ya fabricados, pero para tener unos cálculos más exactos se deberían tener en cuenta las distancias a las canteras, graveras y a las fábricas de material.

Las canteras inventariadas se encuentran al sureste de la Comunidad de Madrid, en los alrededores de las poblaciones de Valdilecha y Morata de Tajuña. Las distancias a la obra están entre 20 y 40 km, por lo que se ha tomado una distancia media de 32,5 km del viaducto.

Tabla 5.10. Distancias de obra a las canteras y graveras

EXPLOTACIÓN	APROVECHAMIENTO EN OBRA	SITUACIÓN/ DISTANCIA A LA OBRA
C-1 Cantera Valdilecha	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Valdilecha 36 km
C-2 Cantera HOLCIM	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Valdilecha 37 km
C-3 Cantera El Monte	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Valdilecha 38 km
C-4 Cantera La Almendrilla	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Carabaña 40 km
C-5 Cantera CEMEX	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Valdilecha 38 km
C-6 Cantera MARESA	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Morata de Tajuña 27 km
C-7 Cantera Basalt	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Morata de Tajuña 27 km
C-8 Cantera Calizas Camporeal	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras y estériles para rellenos (cimiento, núcleo y coronación)	Campo Real 28 km

EXPLOTACIÓN	APROVECHAMIENTO EN OBRA	SITUACIÓN/ DISTANCIA A LA OBRA
G-1 Gravera ARIPRESA	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras, suelos seleccionados y subbalasto	Velilla de San Antonio 26 km
G-2 Gravera TRAMSA	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras, suelos seleccionados y subbalasto	Arganda 23 km
G-3 Gravera Soto Pajares	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras, suelos seleccionados y subbalasto	San Martín de la Vega 23 km
G-4 Gravera Román	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras, suelos seleccionados y subbalasto	San Martín de la Vega 22 km
G-5 Gravera MARESA	Capa de forma, cuñas de transición, zahorras, suelos seleccionados y subbalasto	San Martín de la Vega 20 km
Cantera El Aljibe	Balasto	Almonacid de Toledo 80 km

Se han inventariado un total de 5 graveras, todas ellas en el aluvial del río Jarama, al sureste de la ciudad de Madrid, entre 20 y 26 km de distancia a la obra, por lo que se

ha tomado una distancia media de 23 km. Estas explotaciones son de gran tamaño y altas producciones, con reservas más que suficiente para la obra.

En el balance de la compensación de tierras existen una serie de materiales que deberán ser retirados a vertedero, que resulta de 507.835,91 m³.

Se han establecido unas zonas de restauración ambiental (ZRA), anexas a la traza, como las prioritarias para realizar los vertidos. En función de la topografía de cada una y de sus peculiaridades, se estima un balance en torno a los 159.050 m³, por lo que 348.785,91 m³ se llevarán al vertedero de Presera que cuenta con capacidad suficiente y es el más cercano a la traza.

Tras el relleno de los vertederos considerados como prioritarios, el excedente de tierras ha llevado a las áreas degradadas o canteras abandonadas que la Comunidad de Madrid tiene autorizadas, en cumplimiento del Real Decreto 105/2008 de 1 de febrero. De ellas se han seleccionado las siguientes por proximidad a la traza. Considerándose en primer lugar la de Preresas Getafe por su situación con respecto a la obra.

Tabla 5.11. Distancias a vertedero y capacidad de los mismos

VERTEDERO	DISTANCIA A LA TRAZA	CAPACIDAD ESTIMADA
V-1 (ZRA nº 2)	Anexo a la traza P.K. 104+170 a 104+560	66.600 m ³
V-2 (ZRA nº 3)	Anexo a la traza P.K. 104+780 a 105+040	62.750 m ³
V-3 (ZRA nº 4)	Anexo a la traza P.K. 105+050 a 105+280	29.700 m ³
V-4 (PRERESA)	13 Km	1.000.000 m ³
Capacidad Total		1.159.050 m ³

Estimando los 13 km que separan el vertedero de la traza y camiones de 20 m³ solo en camino de ida, tendremos unas emisiones de CO₂ por el desmantelamiento de 7.785,14 T CO₂ equivalente.

Por lo que todo tiene un resultado de 29,90 T CO₂ e/m² de puente.

Figura 5.21. Puntuación de la función de valor del indicador I8 Emisiones de CO₂

C5. RESIDUOS

I9. Residuos totales.

Los residuos del proyecto se van a medir mediante la variable, residuos totales asociados (RTA) que a su vez viene descrito por el sumatorio de los residuos generados durante la fabricación del material de obra, hormigón (RGH) y acero (RGA) y los residuos generados en el proceso constructivo y el mantenimiento (RGC) y el desmantelamiento de la instalación (EID).

$$RTA = RGH + RGA + RGC + RGD$$

Las tres primeras variables vienen dadas en función del volumen de material que hemos utilizado en la obra y los porcentajes anteriormente descritos que no se recuperan.

Así el volumen procedente de desmonte o saneos irá a vertedero en su totalidad, con lo que resulta un volumen total de áridos utilizado en las obras es de (con coeficiente de paso) 507.835,91 m³.

Se han establecido unas zonas de restauración ambiental (ZRA), anexas a la traza, como las prioritarias para realizar los vertidos. En función de la topografía de cada una y de sus peculiaridades, se estima un balance en torno a los 159.050 m³, por lo que

348.785,91 m³ se llevarán al vertedero de Presera que cuenta con capacidad suficiente y es el más cercano a la traza.

Tabla 5.12. Resumen de volúmenes de obra a vertedero

Volumen sobrante de excavación:	507.835,91 m ³
Volumen para Zonas de Restauración Ambiental:	159.050,00 m ³
Volumen sobrante a vertederos V-4 a V-6:	348.785,91 m ³
Peso del material sobrante (dens=1,8 tn/m ³):	627.814,64 tn

El resumen de las tres primeras variables sería:

Tabla 5.13. Resumen de material a vertedero

MATERIAL	M ³	T	RESIDUOS VERTEDERO (T)
Hormigón total	34.510,42	86.276,05	862,76
Acero total	--	4.870,16	1.826,31
Aridos totales	348.785,91	627.814,64	627.814,64
TOTAL			630.503,71

Los residuos generados durante la obra y el mantenimiento, teniendo en cuenta lo desarrollado en el capítulo 4 para este indicador sería de 634.092,79 T, considerando los residuos del mantenimiento como un 1% de los generados durante las obras.

Por último, para el desmantelamiento del viaducto se ha considerado un porcentaje del 75% de generación de residuos del total de hormigón y acero para armadura del viaducto, lo que nos arroja un resultado de 68.359,66 T.

Así este indicador obtendría una puntuación de 77,61 T/ m² de puente.

Figura 5.23. Puntuación de la función de valor del indicador I9 Residuos Totales

C6. ENERGÍA

I10. Energía total.

La energía total se ha medido mediante la variable energía durante el ciclo de vida (ECV) de la que tenemos:

$$ECV = EIH + EIA + EIC + EID$$

El energía para la fabricación del hormigón (EIH):

TIPO DE HORMIGÓN	M ³	MJ	MKwh
HL-150	242,06	605.150,00	168,10
HP-50	8.566,66	21.416.650,00	5.949,07
HA-30	19.322,07	37.678.036,50	10.466,12
HA-35	5.498,37	11.271.658,50	3.131,02
HA-40	881,26	1.938.772,00	538,55
TOTAL		72.910.267,00	20.252,85

Tabla 5.12. Consumo energético del hormigón

El energía para la fabricación del acero (EIA):

TIPO DE ACERO	Kg	MJ	MKwh
Barras	4.468.235,87	77.747.304,14	21.596,47
Acero pretensado	401.924,36	8.078.679,64	2.244,08
TOTAL		85.825.983,77	23.840,55

Tabla 5.13. Consumo energético del acero

Por último, las dos variables referidas al consumo de energía durante las obras, el mantenimiento (EIC) y el desmantelamiento de la instalación (EID), según los parámetros dados en el indicador I10 del capítulo 4 se ha estimado en un 2,5% de la energía consumida para la fabricación de materiales para la primera de las variables y en 1,5% para la segunda, quedando:

	MKwh materiales	MKwh
Obra y mantenimiento	44.093,40	1.102,34
Desmantelam.		661,40

Tabla 5.14. Consumo energético durante las obras y el desmantelamiento

Así la energía total consumida en esta obra es de 45.857,14 MKwh, por lo que se obtiene un resultado de 5,05 MKwh/m².

Figura 5.24. Puntuación de la función de valor para el indicador I10 Energía Total

C7. GESTIÓN AMBIENTAL

I11. Valor ecológico del emplazamiento.

El proyecto ha conseguido en este indicador una puntuación de 4 puntos debido a que su ubicación está en una zona sin protección ambiental rodeada de zonas de restauración ambiental anexas a la traza.

Figura 5.25. Puntuación de la función de valor para el indicador I11 Valor Ecológico del Emplazamiento

I12. Grado de sensibilidad a normativa ambiental. ISO 140001.

Tras una revisión de la documentación facilitada por las empresas solo se ha podido verificar que 9 de ellas tienen el certificado ISO 14001, por lo que ha sido el dato con el que se ha trabajado en este supuesto.

Se carece de la documentación de todas las empresas que han trabajado en esta obra, por lo que esta puntuación es orientativa y podría aumentar si se pudiese hacer un estudio más pormenorizado de cada una de ellas.

Figura 5.26. Puntuación de la función de valor del indicador I12 Calidad medioambiental ISO 14001

C8. PARTICIPACIÓN DE LA COMUNIDAD

I13. Información y Consulta Pública.

El Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General de Ferrocarriles, convocó con fecha 23 de julio de 2005 concurso público para la contratación de Consultoría y Asistencia para la redacción del “Estudio Informativo del Proyecto de implantación de una doble vía entre la estación de Atocha y Torrejón de Velasco para la línea de alta velocidad Madrid - Castilla La Mancha - Comunidad Valenciana - Región de Murcia”

En el BOE del 10 de julio de 2008 se publicó la resolución de la entidad pública empresarial Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, por la que se anunciaba la licitación del contrato de consultoría y asistencia técnica para la redacción del Proyecto

de Plataforma de implantación de una doble vía entre la estación de Atocha y Torrejón de Velasco para el Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid - Castilla La Mancha - Comunidad Valenciana - Región de Murcia. Tramo: C/ Pedro Bosch (Madrid) - Getafe. Este contrato fue adjudicado por Resolución de la Entidad Pública Empresarial Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) a la UTE formada por las empresas Ibérica de Estudios e Ingeniería S.A. (IBERINSA) e IDEAM con fecha 15 de octubre de 2008, firmándose el contrato el 23 de octubre de 2008.

Con fecha 22 de enero de 2009 se produce la Resolución de la Secretaría de Estado de Infraestructuras de la Dirección General de Ferrocarriles por la que se aprueba el expediente de información pública y oficial y definitivamente el “Estudio Informativo del Proyecto de implantación de una doble vía entre la estación de Atocha y Torrejón de Velasco para la línea de alta velocidad Madrid-Castilla La Mancha – Comunidad Valenciana – Región de Murcia”, publicándose en el B.O.E. de 2 de febrero de 2009.

No se ha podido comprobar si se realizó alguna consulta pública, encuestas o algún otro tipo de comunicado a la Comunidad, por lo que se le ha otorgado un punto en este indicador.

Figura 5.27. Puntuación de la función de valor del indicador I13 Información Pública

I14. Contratación y formación del personal local.

Este indicador está formado por la suma de dos variables, Número de Cursos Impartidos (NCI) y Número de Personal Local contratado (NPL).

No se ha podido obtener información sobre la procedencia del personal contratado, por lo que a esta variable se le ha estimado un intervalo de contratación de entre el 10% y el 30%, es decir ha obtenido una puntuación de 2.

Hay constancia de que en la obra se han repartido manuales de buenas prácticas ambientales al comienzo de los trabajos, pero no de cursos ni formación del personal durante el periodo de obra, por lo que se le ha dado la puntuación más baja de la variable, 1 punto.

Figura 5.28. Puntuación de la función de valor del indicador I14 Contratación local

I15. Afecciones a terceros.

Con este indicador se ha intentado medir todas aquellas molestias que se pudieran acusar a la comunidad de vecinos cercana a las obras, antes, durante y tras la ejecución de las mismas.

Figura 5.29. Vista de la zona de paso de la nueva LAV por la M-40

$$\text{MIT} = 0,30 \times (\text{TCP} + \text{MIC}) + 0,6 \times (\text{MIS} + \text{CPP}) + 0,10 \times \text{DPD}$$

El tiempo de construcción del puente (TCP) ha sido de 28 meses, por lo que para esta variable obtiene un puntuación de 2 según el cuadro descrito en el capítulo 4.

Al tratarse de una zona sin edificios cercanos, las molestias ocasionadas han venido más relacionadas con los cortes de tráfico que ha sido necesario realizar en la M-40, que en muchas ocasiones han sido subsanados con pantallas de separación de carriles y cortes nocturnos. Así del proyecto podemos decir:

Para la variables Mitigación de Impactos durante la Construcción (MIC), del proyecto constructivo se han extraído los siguientes puntos para la validación del cuadro para la mitigación de los impactos durante la construcción:

- En relación a la mitigación acústica

- **Limitaciones en la ejecución**

El tráfico de maquinaria, así como las actividades de extracción de materiales y vertido de los mismos en las zonas previstas a estos efectos, generará un incremento de los niveles sonoros del entorno. Así, la circulación de maquinaria habrá de realizarse, lo más alejado posible de las zonas residenciales del área afectada, prefiriéndose itinerarios que sean de carácter marcadamente industrial, comercial o de transporte. Para minimizar las afecciones negativas derivadas del efecto descrito, no se podrán realizar las operaciones de traslado de materiales en las horas normales de reposo, considerando éstas como las comprendidas en el intervalo de 22 a 7 h.

Figura 5.30. Puntos de mitigación acústica del proyecto

- En relación a la mitigación visual

A pesar de que la sección del la LAV no llega a invadir la autovía, para el proceso de construcción de los muros y el montaje de la estructura está previsto cortar el arcén derecho de la calzada de acceso a Madrid ya que durante el proceso de construcción del viaducto será necesario instalar grúas móviles para ayudar a la colocación de las vigas del viaducto. Para ello se procederá a cortar el arcén derecho, para permitir el estacionamiento de dichas grúas durante su construcción.

Además, para la ejecución de la zona de muros anteriores a esta estructura se invade parcialmente el arcén de la autopista con la excavación de las zapatas de los muros, por lo que también se hace necesario el corte del arcén derecho de la autovía en esta zona.

Figura 5.31. Puntos de mitigación visual del proyecto

- En relación a la calidad del aire

<ul style="list-style-type: none"> • Plan de explotación <p>El tráfico de maquinaria, en especial cuando circula sobre caminos sin pavimentar, generará una pérdida en la calidad atmosférica debida a la emisión de polvo y partículas, que afectará fundamentalmente a la población próxima, la fauna y la vegetación, al depositarse sobre sus hojas. Para evitarlo, el Plan de Explotación considerará la ejecución de riegos superficiales de todas las plataformas de los caminos de acceso sin asfaltar (como el Camino del Malecón), tal y como se expone en el apartado “Protección atmosférica” del Anejo 16. Integración Ambiental. Estos riegos se intensificarán en la época estival y se realizarán cuando la Dirección Ambiental de la obra lo estime oportuno.</p>
--

Figura 5.32. Puntos de mitigación de la calidad del aire del proyecto

Por lo que el cuadro resumen quedaría:

Tabla 5.15. Resultados de la variables MIC del indicador I15

VARIABLE	ATRUBUTO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Mitigación de impactos durante la Construcción (MIC)	Mitigación Acústica	Monitoreo mensual del nivel de ruido en las zonas cercanas a los vecinos	0
		Limitar el tiempo de exposición del personal que se ve afectado por actividades consideradas ruidosas	2
		Colocación de pantallas antiruido donde se pueda molestar a los vecinos	1
		Asegurar que los equipos estacionarios productores de ruido se sitúan lejos de receptores sensibles	2
	Calidad del aire	Monitoreo mensual de la calidad del aire en 3 puntos de la obra	0
		Mantener húmedas las áreas de trabajo para el paso de vehículos	1
		Regular la velocidad dentro del área de trabajo	2
		Revisar que los camiones utilicen lonas para el transporte de materiales que emitan polvo	0
		Implementar con barreras vegetales si se presenta un desmejoramiento de la calidad del aire	0
	Mitigación visual	Cerrar la zona de obra de modo que impacte lo menos posible a los vecinos	2
	TOTAL		10

Para la siguiente variable del indicador, Mitigación de impactos durante la puesta en servicio de la instalación (MIS), se ha tenido en cuenta lo descrito en el capítulo III.6

Integración Ambiental, partes I, II, III y IV y el apartado G605 del proyecto, así la puntuación quedaría:

VARIABLE	ATRIBUTO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Mitigación de impactos durante la Puesta en Servicio (MIS)	Mitigación Acústica	Colocación de pantallas antiruido donde el uso del puente pueda molestar a los vecinos	0
	Mitigación visual	Respetar el paisaje existente implementando la vegetación y la ordenación del paisaje	2
	TOTAL		2

Tabla 5.16. Resultados de la variable MIS del indicador I15

Se le ha otorgado la mayor puntuación para la variable conectividad permitida por el puente (CPP), es decir 3 puntos ya que no interfiere en la actividad diaria de la población, ni ha modificado los caminos existentes antes de su construcción.

En la variable para la duración del desmantelamiento (DPD), debido a que se trata de un puente hormigón, ha obtenido 1 punto.

Figura 5.33. Puntuación de la función de valor del indicador I15 Afecciones a terceros

C9. RESILIENCIA

I16. Resiliencia. Impacto social de la paralización.

Tal y como se describía en la metodología del estudio del capítulo 4, se han tenido en cuenta seis variables cuyo sumatorio conforman el indicador I16.

$$I16 = NPA + ATI + TIS + RAS + RAT + VAT$$

Así, el número de personas afectadas en caso de paralización del puente (NPA), al tratarse del acceso a Madrid de los trenes de todo un corredor, el Levante, se le ha dado la puntuación de 1, ya que el tránsito por dicho puente supera las 10.000 personas al día.

El alcance de la interrupción (ATI) sería a nivel nacional, por lo que recibe 2 puntos.

El tiempo de interrupción del servicio (TIS), como es una variable que no podemos determinar hasta que no se producen los hechos, se ha tomado un valor medio del cuadro, entre 3 y 5 días de interrupción, por lo que lo ha obtenido 3 puntos.

El riesgo de acciones sísmicas (RAS), según la situación de Madrid en el mapa de valoración nos indica un nivel VI de peligro que lleva asociada una puntuación de 5 puntos, al ser el menor de los valores posibles, es decir el más favorable.

En este caso resulta $ab / g \leq 0,04$, siendo g la aceleración de la gravedad, por lo que no es necesaria la consideración de acciones sísmicas para el cálculo de las estructuras.

Siendo g la aceleración de la gravedad.

La puntuación de la variable por riesgo de avenidas torrenciales (RAT), según la situación del puente y los mapas indicados en el capítulo 4 sería de 4 puntos.

La puntuación de la variable que mide el riesgo por acciones terroristas (VAT) para este proyecto, al tratarse de una vía de Alta Velocidad, será de 3 puntos.

Con todas las variables, se llega a una puntuación del indicador de 18 puntos.

Figura 5.34. Puntuación de la función de valor del indicador I16 Resiliencia

4.1.3 Análisis de los resultados

Una vez aplicados todos los parámetros y los pesos otorgados a cada uno de los indicadores, según el árbol de toma de decisión que hemos planteado en el capítulo 4, quedaría de la siguiente manera:

Figura 3.35. Resumen de puntuaciones del primer proyecto

5.2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO. PROYECTO DE CERCANÍAS. PUENTE CON ESTRUCTURA MIXTA SOBRE LA CALLE PEDRO BOSCH EN MADRID.

Figura 5.36. Foto del puente sobre la calle Comercio

5.2.1 Descripción del proyecto

Esta estructura tiene como objeto principal dar paso a la nueva plataforma ferroviaria de acceso sur a la futura Estación Pasante sobre la calle Comercio y sobre la línea del ferrocarril de Cercanías C-5.

La estructura consiste en dos celosías metálicas laterales a ambos lados de la plataforma ferroviaria, unidas por vigas metálicas cada 3.50 m sobre las cuales se dispone el tablero de hormigón armado, creando una configuración mixta para estas vigas transversales.

Denominación	Vanos	Tipología
Viaducto sobre la calle Comercio y línea C-5	45.50 + 38.50 + 12.49 (en eje de trazado)	Celosías laterales metálicas con vigas mixtas transversales

Figura 5.37. Tipología del viaducto

La estructura tiene una longitud total entre ejes de apoyos en estribos, medida en el eje de trazado de 96.49 m, localizada entre los puntos kilométricos 100+145.117 y 100+241.607. Los ejes de apoyos están esviados con respecto al eje de trazado, ligeramente, 17.75º, en el estribo E-1 y con un gran esviaje de 56.987º en el estribo E-

2. El hecho del esviaje existente en sus ejes de apoyo, fundamentalmente en el correspondiente al estribo E-2, unido al trazado en curva, hace que cada uno de los bordes de la plataforma tenga una longitud muy diferente: 112.758 m en el caso del eje de la celosía derecha, y 80.358 m en el caso del eje de la celosía izquierda. Debido a esta importante diferencia de longitudes, se ha realizado una distribución de luces diferente en cada una de las celosías, resultando 2 vanos en la celosía izquierda, y tres vanos en la celosía derecha.

De acuerdo con lo indicado anteriormente la distribución de luces resultante para el viaducto es la siguiente:

APOYO	E-1	P-1	P-2	E-2
Eje de celosía izquierda		42.629	37.729	
Eje de trazado		45.500	38.500	12.490
Eje de celosía derecha		48.500	39.305	24.953

Figura 5.38. Distribución de luces

A pesar del esviaje, se ha conseguido que el puente sea 'recto', en su desarrollo, a excepción de en los estribos, ya que el apoyo en las pilas P-1 y P-2 es ortogonal al eje del viaducto.

Figura 5.39. Alzado del viaducto

La estructura principal longitudinal se ha diseñado por encima de la plataforma debido al escaso canto disponible sobre la línea de Cercanías C-5, y se desarrolla como dos celosías laterales de canto variable y diagonales inclinadas tipo Warren con modulación constante de 4.00 m, y por lo tanto ángulo de inclinación variable. Estas celosías tienen una geometría análoga en ambos lados, pero debido a su distinta longitud, en el caso de la celosía derecha, en el tramo entre la pila P-2 y el estribo E-2, esta celosía degenera en una viga correspondiente a la prolongación del cordón inferior de la citada celosía.

Los gálidos mínimos de paso que deja el viaducto sobre la calle Comercio, son mayores de 10.25 m en todos los casos, mientras que sobre la línea C-5 el gálibo sobre la cota

de carril, en el punto más desfavorable, es de 6.31 m. La anchura de las celosías es constante e igual a 1.50 m.

Figura 5.40. Planta del viaducto

El cordón inferior de las celosías, que posteriormente degenera en viga lateral, tiene un canto constante de 2.00 m, aunque en las zonas de unión con el cordón superior se macla con este formando un elemento de canto variable entre 2.00 m y 3.58 m. Este cordón inferior está rigidizado interiormente cada 3.50 m (medidos en el eje de trazado), coincidiendo con las vigas transversales, con diafragmas de tipo marco, así mismo las chapas de almas y alas están rigidizadas longitudinalmente mediante rigidizadores de tipo T. El cordón inferior es visitable mediante los accesos dispuestos en la zona cercana a estribos y a través de los pasos de hombre situados en los diafragmas.

Figura 5.41. Vista aérea del viaducto

El cordón superior tiene un canto constante de 0.80 m, y su cara superior alcanza una altura máxima en la zona del apoyo en pila P-1 de 7.50 m sobre la cara superior del cordón inferior, lo que hace un canto máximo de las celosías de 9.50 m. El cajón correspondiente a este cordón no es visitable, y no ha sido necesario rigidizarlo interiormente.

Las diagonales tiene un canto de 0.50 m, y su inclinación es variable para coincidir con la modulación de 4.00 m prevista entre nudos de la misma, en los ejes de los cordones. Estas diagonales no son visitables, e igualmente que el cordón superior se han diseñado sin rigidización interior.

La sección transversal del viaducto tiene una anchura, entre caras interiores de las celosías, de 14.35 m distribuidos de forma asimétrica con respecto al eje de trazado: 7.00 m entre el eje del trazado y la cara interior de la celosía izquierda; y 7.35 m entre el eje de trazado y la cara interior de la celosías derecha. La anchura de ambas celosías es de 1.50 m, lo que da una anchura total del viaducto de 17.35 m.

La razón de diseñar una plataforma sobre el viaducto mayor que la estricta marcada por la vía de 13.30 m, es doble:

- en el margen derecho de la plataforma es necesario colocar una pantalla antirruido a lo largo del viaducto, por lo que se ha aumentado la anchura de plataforma 70 cm, correspondientes a 25 cm de pantalla antirruido y un pasillo estricto entre la pantalla y la cara interior de la celosía de 45 cm;
- en el margen izquierdo de la plataforma se han aumentado 35 cm para colocar la barandilla correspondiente en el límite, pero fuera de la plataforma ferroviaria.

De esta forma, la plataforma ferroviaria en placa es similar y de dimensiones constantes, tanto en la estructura como en el resto de su desarrollo, sin necesidad de cambiar su sección a la entrada del viaducto. Esta circunstancia tiene efectos positivos adicionales desde el punto de vista del cálculo estructural, ya que sitúa las caras interiores de las celosías a una distancia igual o mayor de 5.00 m del eje de cada vía, lo que exime de considerar en el cálculo las importantes acciones de impacto del vehículo ferroviario descarrilado sobre las celosías.

Figura 5.42. Armado in situ del tablero del puente

La plataforma ferroviaria se materializa en un tablero de hormigón armado de 14.35 m de ancho y 0.35 m de canto constante, con sendos recrecidos a ambos lados de 0.70 m de ancho en el borde derecho, y de 0.35 m de ancho en el borde izquierdo, como se ha indicado anteriormente, para confinar la plataforma ferroviaria en placa, y para colocar la pantalla antirruído y la barandilla. Estos recrecidos tienen una altura de 0.55 m para alinearse con la cota superior del cordón inferior de las celosías.

En el margen derecho de la plataforma, coincidiendo con el lateral exterior de la playa de vías se ha dispuesto una pantalla antirruído de 5 m de altura desde la salida de la plataforma del túnel proveniente de la Estación de Atocha, en una longitud de 350 m, lo que incluye el viaducto. Esta pantalla se proyectado, con un carácter especial, con el objeto de conseguir una máxima integración en el viaducto y en el entorno urbano.

Figura 5.43. Sección transversal del puente

La losa de hormigón se apoya exclusivamente en las vigas metálicas transversales colocadas cada 3.50 m, con las que forma una estructura mixta. Se ha evitado intencionadamente la conexión continua de la losa de hormigón con las celosías laterales para evitar su interacción en el trabajo estructural longitudinal del viaducto, quedando exclusivamente como elemento de soporte local de la plataforma ferroviaria. Las únicas conexiones entre la losa de hormigón del tablero y las celosías longitudinales son a través de una estructura de transmisión de cargas horizontales, fundamentalmente frenado y arranque, situada en la zona de la pila P-1, y de forma muy secundaria, a través de la unión de las almas de las vigas transversales. Con esta disposición se evitan prácticamente los posibles efectos sobre las celosías de los efectos reológicos de la losa, quedando estas celosías longitudinales como elementos puramente metálicos.

El tablero se realizará en acero S355 J2G2W, tipo Corten, autopatinable y autorresistente a la corrosión, en concordancia cromática con su entorno, y para reducir al mínimo su mantenimiento. El interior de los elementos metálicos se protegerá mediante una imprimación de epoxi-aluminio.

La geometría singular y variable de la pila 1 hizo que se tuviera que ejecutar en tres fases de hormigonado, la primera para la fase de arranque de los brazos, la segunda para los propios brazos y la tercera para el tirante de hormigón pretensado que cose sus puntas.

Figura 5.44. Fase de construcción de la pila 1

La pila P-1 sirve de apoyo a ambas celosías del viaducto, habiéndose diseñado con un doble fuste inclinado que se une mediante un tirante en su cota superior. La pila arranca en un pequeño plinto de 0.50 m sobre el encepado de cimentación, y tiene una altura hasta cota de apoyos de 10.11 m. Este diseño tiene su origen en la necesidad de limitar la zona de arranque de la pila para evitar invadir la zona de acera correspondiente a la calle Comercio, y en la necesidad de realizar el apoyo en dos

puntos distantes 15.85 m, para evitar disponer un mamparo en dicho apoyo. El elemento horizontal superior, a modo de tirante, se ha pretensado, para recibir las importantes tracciones a las que se verá sometido. La pila se ha realizado en hormigón blanco, y se ha rematado lateralmente con dos chapas de acero Corten, en concordancia con el acero del tablero.

Figura 5.45. Alzado y perfil de la Pila P-1

La pila 1, compartida por ambas celosías, es de forma triangular hueca, con el vértice en la posición inferior y de espesor ligeramente decreciente en altura. La altura total de la pila, comprendida la basa sobre el encepado, es de 10.61 y su anchura máxima, 18.15 m. El tirante que une los dos vértices superiores (la base del triángulo) también presenta unas dimensiones que decrecen hacia el eje de simetría de la pila, que tiene 2.20 metros de espesor. La pila se cimenta sobre un encepado de 4 pilotes de 2.00 m, esviado respecto del eje de trazado a efectos de que la excavación del mismo afecte lo mínimo posible a las calles colindantes.

La pila 2, exclusiva de la celosía derecha es una pila-pilote de 1.50 metros de diámetro.

Figura 5.46. Sección de la pila 2.

Los estribos son de tipo cerrado con aletas y presentan una geometría muy compleja debido a su esviaje respecto del eje de trazado. Así mismo, el hecho de que el viaducto sea sensiblemente más ancho que la plataforma que contiene hace necesaria una reducción progresiva del ancho del estribo hasta la dimensión estricta de la plataforma. El estribo 1 es el punto fijo ante desplazamientos longitudinales del puente, para lo cual se disponen apoyos tipo Pot en su cara frontal (uno por cada cordón inferior de celosía) y un pretensado de atado compuesto por 4 unidades de 19 cordones de 0,6”.

El proceso constructivo del viaducto se ha diseñado de forma que afecte lo menos posible al viario público, de forma que las molestias sobre la vida ciudadana sea la mínima imprescindible.

Para ello la construcción de los estribos y pilas se realizará siempre desde terrenos ferroviarios con la mínima afección a la calle Comercio y Garganta de los Montes. La ejecución del tablero del viaducto se ha realizado mediante empuje acompasado de la estructura metálica, realizada completamente en una bancada preparada en la zona del estribo E-1, hasta llegar a su posición definitiva, ayudados por una nariz auxiliar de lanzamiento en continuidad de la celosía izquierda. Posteriormente se ha hormigonado la losa del tablero en dos fases sobre la chapa plegada dispuesta, se han terminado los estribos y se han realizado los acabados de la estructura.

Figura 5.47. Lanzamiento del puente para su colocación

En el borde derecho de la plataforma del tablero se ha dispuesto, de acuerdo con la Declaración de Impacto ambiental una pantalla antirruido, acorde con el entorno y con el carácter urbano y singular del viaducto. Esta pantalla no sólo se dispone en el viaducto, sino en 350 m a lo largo de la traza.

Como resumen de las características del puente, tenemos:

VIADUCTOS	
P. K.	100+145.117
Denominación	Viaducto sobre la calle Comercio y línea C-5
Estructura	Hiperestática
Tipología	Celosis laterales metálicas con vigas mixtas transversales
Luces	45.50 + 38.50 + 12.49 (en eje de trazado)
Ancho de tablero	14.35

Figura 5.48. Resumen de las características del puente

Figura 5.49. Hormigonado de la base del puente

5.2.2 Aplicación del método

Para poder comenzar con la aplicación del método, se ha realizado un estudio del proyecto y de las acciones ejecutadas durante la realización del mismo.

Se ha tenido en cuenta el marco normativo de aplicación, las disposiciones general del proyecto, así como todas las prescripciones técnicas aplicadas para el desarrollo de la obra.

En concreto, se han estudiado los capítulos para:

- Presupuesto
- Pliego de prescripciones particulares
- Documentación de obra
- Desarrollo de la vigilancia ambiental.
- La protección de la calidad del agua y el sistema de depuración.
- Afección por ruidos y vibraciones.
- Protección atmosférica.
- Ensayo, estudio y análisis de materiales.
- Aprovechamiento de la estructura existente.
- Terrenos disponibles para la ejecución de las obras.
- Movimiento de tierras.
- La integración ambiental del proyecto.
- Tratamiento y gestión de residuos.

De todo la documentación revisada se sacan los cálculos para cada uno de los requerimientos:

C1. COSTES DE EJECUCIÓN DE LA OBRA

I1. Costes de la obra.

El coste total de la obra, asciende a 12.946.836,80 € ejecución contrata, que se desglosa como se muestra en la figura 5.50., donde se puede observar que el gran peso de la obra es la estructura del puente de estudio.

Figura 5.50. Costes de la obra

Para poder realizar el cálculo por m^2 de puente, tenemos que conocer que el puente tiene una longitud entre estribos de 129,50 ml y el ancho del tablero es de 14,35 ml, por lo que tenemos $1.384,74 \text{ m}^2$ de puente, que resultan $9.349,38 \text{ €/m}^2$.

Por lo que el valor de I1. Coste Total de la Obra queda representado de la siguiente manera en la gráfica de la función de valor del primer indicador.

Figura 5.51. Puntuación de la función de valor del indicador I1 Costes de la obra

I2. Costes por no calidad.

Revisando la documentación entregada por la constructora principal, se observa que sí cuenta con el Certificado de Calidad ISO 9001. Para el resto de las contratas tenemos:

- De las 14 graveras de las que se ha surtido la obra, solo las graveras G3 y G4 cuentan con el Certificado de Calidad ISO 9001.
- Ninguna de las 4 canteras seleccionadas cuentan con el Certificado de Calidad ISO 9.001.
- Del resto de subcontratas de las que se ha podido revisar la documentación, solo 5 cuentan con el Certificado solicitado.

Por lo que hacen un total 8 empresas.

Figura 5.52. Puntuación de la función de valor del indicador I2 Costes por no calidad

C2. COSTES DE EXPLOTACIÓN

I3. Costes de servicio, mantenimiento y desmantelamiento

En la redacción del proyecto se ha tenido en cuenta unos planes de mantenimiento a llevar a cabo a lo largo de la vida útil del puente que prescriben inspecciones principales de las estructuras cada 5 años, indicando los puntos críticos de inspección, y los criterios a emplear en dichas inspecciones.

De acuerdo con la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, las estructuras de hormigón requieren un plan de mantenimiento, con el objeto de que estas mantengan su nivel de prestaciones en valores razonables a lo largo de su vida útil, que para una estructura de estas características acuerdo con las indicaciones de la EHE es de 100 años. La misma vida útil considerada en el proyecto.

Se realizarán cuatro tipos de inspecciones sobre la estructura:

- Inspección principal inicial (Al finalizar las obras).
- Inspecciones rutinarias
- Inspecciones principales. Cada 5 años
- Inspecciones especiales

La primera inspección principal, inspección principal inicial o de "estado 0" será el resultado del control de la estructura construida, y se realizará durante y al final de la construcción de la misma. Esta revisión permite detectar, si existieran, los daños que exhibe la estructura, sus condiciones de funcionalidad, durabilidad y seguridad del usuario; e incluso permite estimar su comportamiento futuro.

A partir de esta inspección principal se seguirán realizando inspecciones principales, en general, cada 5 años. Si en una inspección principal se detectan daños en la estructura que se prevean con una evolución rápida, se reducirá el periodo entre inspecciones principales a 2 años.

Valorado el estado de la estructura y, en su caso, su velocidad de deterioro, por comparación con inspecciones previas, el informe de la inspección indicará si:

- Se mantiene el plan de inspección cada 5 años.
- Se reduce el periodo de inspección a 2 años
- Se requiere un Inspección Especial que de lugar a un proyecto de reparación y/o refuerzo.

Las Inspecciones Especiales se realizarán cuando el estado de la Estructura lo requiera de acuerdo con el resultado de una Inspección Principal. Además de las inspecciones indicadas se realizarán Inspecciones Rutinarias de la estructura al menos anualmente.

Del mismo modo, el proyecto detalla las técnicas y criterios a seguir para cada uno de los puntos a inspeccionar.

Como se puede observar, los puntos y frecuencias a inspeccionar son muy similares a los establecidos en el capítulo 4 para el caso de un puente mixto, por lo que según los valores proporcionados llegamos al siguiente resultado:

Costes tras la Construcción (CTC) = CSM + CDI

Donde los Costes de Servicio y Mantenimiento (CSM) obtenidos en base a los datos y a la vida útil del puente, son:

COSTE DE SERVICIO Y MANTENIMIENTO (CSM)	Nº INSPECCIONES	IMPORTE UNITARIO (€)	RESULTADOS
Inspección básica cada 24 meses	50	1.000,00	50.000,00
Inspección principal cada 5 años	20	2.500,00	50.000,00
Refuerzo hormigón estructural	4	192,24*m2	357.245,36
TOTAL			457.245,36

Tabla 5.17. Resultados para la variables CSM del indicador I3

Donde los Costes de Desmantelamiento de la Instalación (CDI) obtenidos son:

12.946.836, 80 € x 4% = 517.873, 47 €

Llegamos a la puntuación:

Figura 5.53. Puntuación de la función de valor del indicador I3 Costes de Mantenimiento y Desmant.

I4. Resiliencia frente a los eventos no previstos

Según el desarrollo de este indicador en el capítulo 4, se han clasificado los proyectos según el sistema estructural del puente que se va a construir, por lo que en este caso al

tratarse de un puente mixto con 2 pilas de apoyo y anclado a los estribos, se trata de un puente continuo, por lo que obtiene un puntuación de 2 en este indicador.

Figura 5.54. Funtuación de la función de valor del indicador I4 Resiliencia

C3. CONSUMO DE MATERIALES

I5. Recursos Naturales

Tal y como se ha definido el cálculo de este indicar en el capítulo 4, se considera las toneladas de recursos naturales utilizados en base a los m^2 de puente.

Debido a las características de la obra y tratarse de una obra en zona urbana, ha sido difícil aprovechar el material de las excavaciones, por lo que se han utilizado muchas toneladas de recursos naturales y definir una zona de préstamo próxima, por lo que hay que alejarse hasta alcanzar las terrazas cuaternarias de los ríos más próximos, las del Jarama, Manzanares o Henares.

De la redacción del proyecto y el pliego de condiciones particulares podemos extraer:

- Se han estudiado 14 graveras. La distancia a la que se sitúan estas graveras del punto medio de la traza varía entre los 22 km de la gravera G-5 en San Martín de la Vega y los 44 km de la G-4 en Aranjuez. Los materiales de las graveras, dada su gran calidad y la disponibilidad en la mayoría de las graveras de plantas de cribado y clasificación, pueden ser utilizados en cualquiera de las capas de la

plataforma del ferrocarril.. Los materiales extraídos están formados por gravas y arenas que son utilizados mayoritariamente como áridos para hormigones, áridos para zahorras y para todo tipo de mezclas ya que la litología es fundamentalmente silícea, presentando bajos valores de desgaste de Los Ángeles y Micro Deval.

- El subbalasto y capa de forma existente presentan contaminación entre capas, dando granulometrías no adecuadas, porcentajes de materia orgánica y elementos alterables, además de presentar otras desviaciones o valores límites en los ensayos de laboratorio de equivalente de arena, desgaste de los Ángeles, Micro Deval, por lo que se procede a su sustitución.
- En cuanto a las canteras se han estudiado un total de 4, situadas a distancias entre 58.7 y 122 km explotando materiales ígneos, todas ellas con el distintivo ADIF como suministradores de balasto “Tipo 1” con suministro, por lo que cualquiera de estas canteras podrá abastecer los materiales de calidad para las capas de subbalasto, capa de forma, coronación y áridos para mezclas bituminosas.
- En la traza propuesta no existen desmontes como tales por lo que el material proviene de las excavaciones de saneo para apoyo o sustitución de rellenos y de las excavaciones para el paso inferior en cajón. Todas ellas aportan materiales pertenecientes a los rellenos antrópicos realizados con fines constructivos. En su mayoría está constituido por arenas limosas - arcillosas de baja plasticidad, que se clasifican como SM-SC y puntualmente CL, con valores máximos de materia orgánica < 0.5%, valores <1% de sulfatos y sin sales solubles; Los valores de hinchamiento inferiores al 1% y CBR de 9. Los espesores detectados varían de 3 m a 11 m. son fácilmente excavables, sin presentar agua. Con estas características geotécnicas, pueden ser utilizados en el núcleo de los rellenos, pero presentan algunos valores de porcentajes de finos que no permiten su uso como coronación.

De lo expuesto anteriormente, se sacan los siguientes volúmenes procedentes de cantera y/o gravera, que hacen un total de : 21.154,52 m³ que considerando una densidad media de 1.600 Kg/m³ tenemos 33.847,23 Kg.

<u>Reellenos realizados con material procedente de gravera y/o cantera:</u>	
- Terrapienes del túnel provisional, núcleo y cimientos	0,00 m ³
- Terrapienes de la línea de alta velocidad, núcleo y cimientos	7.700,60 m ³
- Terrapienes de la vía de estacionamiento – 2, núcleo y cimientos	0,00 m ³
- Terrapienes en reposición de viales.....	0,00 m ³
- Terrapienes del túnel provisional, coronación.....	186,40 m ³
- Terrapienes de la línea de alta velocidad, coronación.....	7.498,20 m ³
- Terrapienes de la vía de estacionamiento – 2, coronación.....	0,00 m ³
- Suelo seleccionado en reposición de viales.....	991,30 m ³
Total:	16.376,50 m ³
<u>Otros volúmenes:</u>	
- Zahorra artificial en reposición de viales:	548,30 m ³
- Suelocemento:	1.139,10 m ³
- Subbalasto:	276,63 m ³
- Capa de forma:	2.813,99 m ³

Figura 5.55. Volumen de material obtenido en cantera o gravera

Además de los áridos utilizados, tenemos el volumen de hormigón y de kg de acero utilizado en la obra que resultaría:

TIPO DE HORMIGÓN	M ³	Kg
HM-15	1.003,45	2.508.625
HM-20	126,19	315.475
HA-25	134,28	335.700
HA-30	19.169,19	47.922.978
TOTAL		51.082.778

TIPO DE ACERO	Kg
Barras	1.113.909,91
Resto	1.030.403,62
TOTAL	2.144.313,53

Tablas 5.18. y 5.19. Volúmenes de hormigón y acero en obra

Tal y como hemos explicado para este indicador en el capítulo 4, se considera que del hormigón utilizado el 22% es de origen reciclado y del 47% para el acero, por lo que obtendríamos 39.844,57 T de hormigón junto con 1.136,49 T.

Todo ello hace un total de 74.828,28 kg de recursos naturales utilizados en las obras, que dividido por los m² del puente nos daría 54,04 Kg/ m².

Figura 5.56. Puntuación de la función de valor del indicador I5 Recursos Naturales

I6. Consumo de Agua

Aunque en este modelo no se han tenido en cuenta las actuaciones previstas durante la ejecución de las obras para evitar la contaminación de las aguas y del suelo por vertidos accidentales, es un punto de mejora que habrá que tener en cuenta para las futuras líneas de investigación, ya que ambos proyectos estudiados cuentan con una serie de medidas para evitar filtraciones, contaminación de aguas y vertidos en acuíferos cercanos.

Así, de este proyecto cabe destacar:

- Las superficies sobre las que se ubican las instalaciones auxiliares tienen un sistema de drenaje superficial, de modo que los líquidos circulen por gravedad y se pueda recoger en las balsas de decantación cualquier derrame accidental antes de su infiltración en el suelo.
- Se han identificado y cuantificado los efluentes y se han determinado las posibles vías de incorporación de estos a las aguas receptoras, todo ello contemplando la normativa aplicable (Reglamento del Dominio Público Hidráulico y Normas complementarias).
- En la parte inferior del parque de maquinaria se ha situado un área para el cambio de aceites, mantenimiento y lavado de vehículos, maquinaria, limpieza de canaletas de hormigoneras, etc., que consiste en una superficie para

albergar un vehículo o máquina tipo, con un foso que permite la manipulación de la parte inferior del vehículo. Toda la superficie esta revestida de hormigón y cuenta con una cuneta perimetral que recoge los posibles derrames.

- En aquellas zonas en que se utiliza gran volumen de hormigón (muros, viaducto), además de en la planta de hormigón, el Contratista ha ubicado una superficie destinada a la limpieza de canaletas de hormigoneras, consistente en un foso con las longitudes de la propia hormigonera, cuya función es evitar el vertido de hormigón residual a lo largo de los accesos usados para la obra.

Tal y como se ha explicado en el capítulo 4, este indicador consta de la suma de cuatro variables:

$$AVU = AIH + AIA + AIC + AID$$

Las dos primeras variables calculan el agua incluida en la fabricación de los principales materiales de la obra, el hormigón (AIH) y el acero (AIA), que según los cálculos sacados del proyecto y las figuras 4.7. y 4.8. serian:

MATERIAL	M ³	T	Agua consumida (l)
Hormigón total	20.433,11	51.082,78	4.086.622,00
Acero total	--	2.144,31	12.865.881,19
TOTAL			16.952.503,19

Tabla 5.20. Consumos de agua del hormigón y el acero en su fabricación

Las dos siguientes variables, agua utilizada durante las obras de construcción y mantenimiento (AIC) y desmantelamiento de la instalación (AID) se han calculado en base a los cuadros definidos en el capítulo 4, obteniendo un consumo de 49.320 l de agua para la obra y mantenimiento de la instalación, debido a que la duración de las obras es de 15 meses y medio y se encuentra en el intervalo de 1 año-2 año y 7.000 l para el desmantelamiento al tratarse de un puente mixto.

Figura 5.57. Puntuación de la función de valor del indicador I6 Consumo de Agua

I7. Recursos Reciclados.

Este indicador está compuesto por la suma de varias variables:

$$RTR = PHR + PAR + PZR + PAO + PMD$$

Donde las tres primeras variables, como en los indicadores anteriores están referidas al consumo de materiales reciclados presente en los materiales más utilizados en la obra, el hormigón (PHR), el acero (PAR) y los áridos (PZR).

Así según los datos de proyecto y los cálculos realizados en el capítulo 4 tenemos:

MATERIAL	M ³	T	MATERIAL RECIKLADO
Hormigón total	20.433,11	51.082,78	11.238,21
Acero total	--	2.144,31	1.007,83
Aridos totales	--	--	0,00
TOTAL			12.246,04

Tabla 5.21. Toneladas de materia prima reciclada en el material más utilizado

No se han considerado toneladas de material reciclado en los áridos ya que no hay excavación aprovechable, todo se lleva a vertedero y todo el material del terraplén tiene que venir de préstamo.

En relación al agua reciclada durante la ejecución de las obras (PAO), se estudia el agua reciclada en la fabricación del acero, que como se ha visto en el capítulo anterior corresponde a 144.000l por tonelada de acero, lo que hace un total de 308.781,15 l y el agua consumida in situ de la que no tenemos parámetros por lo que se ha valorado a 0.

En los protocolos de actuación de la obra, se han estudiado y tenido en consideración varias actuaciones previstas para la no contaminación de las aguas colindantes creando balsas de decantación, zonas exclusivas para la limpieza de canaletas de hormigoneras, zonas para el almacenamiento de materiales o zonas determinadas para vertidos de aceites, combustibles, cementos y otros sólidos procedentes de las zonas de instalaciones, que en ningún caso serán vertidos a los cursos de agua, pero no se mencionan zonas para la recogida de aguas de decantado, lluvia etc. que después se utilicen para otro tipo de actividades dentro de la obra, por lo que no se ha podido contabilizar.

Por último, para la variable de Porcentaje de Materiales Recuperados tras el Desmantelamiento de la instalación (PMD) al no tener datos fiables sobre el porcentaje de material que se recuperará una vez finalizada la vida útil del puente y desmantelada la instalación, se ha considera un porcentaje del material utilizado en su construcción. Así, se ha considera un 25% de recuperación del hormigón y un 90% de recuperación del acero del puente, obteniéndose 14.700,58 l.

Todo esto hace un total de 335.727,76 l que por m² de tablero nos daría un resultado de 180,66 l/ m² de puente.

Figura 5.58. Puntuación de la función de valor del indicador I7 Recursos Reciclados

C4. EMISIONES

I8. Emisiones de CO₂

Para el cálculo de este indicador se han utilizado a su vez cuatro variables para abarcar todas las fases de la obra, así tenemos:

$$ECO = ECH + ECA + ECV + ECD$$

Para el cálculo de las dos primeras variables de Emisiones de CO₂ en la fabricación y el transporte de los materiales de construcción, el hormigón (ECH) y el acero (ECA), nos remitimos a las figuras 4.7. y 4.8. y se obtienen unos valores de:

TIPO DE HORMIGÓN	M ³	Kg CO2 eq
HM-15	1.003,45	250.863
HM-20	126,19	33.756
HA-25	134,28	37.934
HA-30	19.169,19	5.415.296
TOTAL		5.737.849

TIPO DE ACERO	Kg	Kg CO2 eq
Barras	1.113.909,91	1.559.474
Resto	1.030.403,62	1.504.389
TOTAL		3.063.863

Tablas 5.22. y 5.23. Kg de CO₂ equivalente para la producción de hormigón y acero de la obra

HORMIGÓN	%	T DE CO ₂
Cemento	83%	59.530,182
Árido	1%	717,231
Transporte de materias primas	3%	2.151,693
Producción del hormigón	8%	5.737,849
Transporte del producto	5%	3.586,156
Total	100%	71.723,111

ACERO	%	T DE CO ₂
Transporte de materias primas	4%	136,172
Producción del acero	90%	3.063,863
Transporte del producto	6%	204,258
Total	100%	3.404,292

Tablas 5.24. y 5.25. T de CO₂ equivalente de los materiales de construcción con el transporte y las materias primas

Hay que tener en cuenta la Figura 5.59. en la que se muestran las distancias de los áridos utilizados en esta obra, así como los volúmenes a vertedero de la figura 5.x. obtenemos el CO₂ equivalente generado durante las obras por transporte de materiales de obra.

A continuación se recoge un listado con el nombre, distancia y nomenclatura de las canteras y graveras:

NOMENCLATURA	NOMBRE	DISTANCIA KM
G-1	Gravera Hermanos Porres	35.1
G-2	Gravera del Jarama	37.9
G-3	Gravera El Palomar	40
G-4	Gravera El Puente	44.1
G-5	Gravera Sotopajares	22.1
G-6	Gravera San Martín	25.9
G-7	Gravera Masera	26.7
G-8	Ticosa	32.5
G-9	-	36.7
G-10	Gravera Los Angeles	38.3
G-11	Gravera Ardenca	38.5
G-12	-	38.8
G-13	Gravera Ardisa	39.1
G-14	Gravera Villagrande	40.6
C-1	Cycase, canteras y construcciones s.a.	94.7
C-2	Canteras cuadrado s.l.	122
C-3	Cantera la curva s.l.	58.7
C-4	Benito arnó e hijos s.a.	108

Cantera	Nombre	Distancia al punto medio de la traza (km)
C-1	Aldeavieja Cantera Santana	94.7
C-2	Cantera de Ávila	122
C-3	La Curva	58.7
C-4	El Aljibe	108

Figura 5.59. Canteras y graveras seleccionadas para las obras

Se indica a continuación la procedencia de los materiales necesarios en cada una de las capas de la plataforma de la L.A.V. así como para los viales, para el cálculo posterior de las distancias a las diferentes canteras y graveras y las emisiones de CO₂ correspondientes:

- Materiales para subbalasto

El material a utilizar en la capa de subbalasto, se han elegido las graveras G-5, G-6 y G-7 y la cantera C-3, por ser las más próximas a la traza.

- Materiales para capa de forma y cuña de transición

Para el material de la capa de forma se han utilizado las instalaciones que disponen de planta de cribado y clasificación para poder obtener la granulometría deseada con un contenido en finos inferior al 5%, que son las graveras G-5, G-6 y G-7 y cantera C-3, también por ser las más próximas a la traza.

- Materiales para coronación de terraplén

El material para la coronación de terraplén, con un contenidos en finos máximo inferior al 40% se ha obtenido de las graveras G-5, G-6, G-7 y cantera C-3, por ser las más cercanas a la traza.

- Materiales para núcleo de terraplén

El material para el núcleo de terraplén podrá proceder de la graveras G-5, G-6 y G-7, por ser las más próximas. Los materiales procedentes de la excavación del paso inferior podrían emplearse en el núcleo de los rellenos pero debido a los diferentes ritmos y cronologías de la ejecución, así como por la falta de espacio para su acopio, lo hacen una tarea muy compleja y prácticamente inejecutable.

- Materiales para zahorras, suelo cemento y áridos para hormigones

Estos materiales procederán de las graveras G-5, G-6 y G-7.

- Áridos para mezclas bituminosas del vial

El árido que se ha utilizado en las mezclas bituminosas de las capas base procede de las distintas graveras próximas a la traza con la granulometría definida, las graveras G-5, G-6 y G-7. Para la capa intermedia y de rodadura se ha utilizado los materiales de las canteras, en concreto la C-3, por su proximidad a la traza.

Para cada una de las capas de plataforma:

MATERIAL TIPO	VOLUMEN (m³)
Materiales para núcleo y cimientto de terraplén	7.700,6
Materiales para coronación de terraplén	7.684,6
Materiales para capa de forma	2.814,0
Materiales para subbalasto	276,6
Material para cuñas de transición	1.139,1
Excavación en desmonte	9.824,5
Saneamiento de apoyos	5.502,2
Vertedero	17.625,7

Figura 5.60. Volúmenes de materiales para las capas de la plataforma

Para los viales y el paso inferior:

MATERIAL TIPO	VOLUMEN (m³)
Material para núcleo de terraplén	0,0
Suelo seleccionado para coronación	991,3
Zahorras	548,3
Material para mezclas bituminosas	73,6
Paquete de firme	209,8
Excavación en desmonte	4.999,1 *
Vertedero	5.748,9

Figura 5.61. Volúmenes de material para el paso inferior del puente

Para la variable de Emisiones de CO₂ por el transporte de los residuos a vertedero (ECV) podemos obtener los datos de la Figura 5.x. del siguiente indicador.

En este proyecto se ha utilizado el vertedero de Salmedina por ser el más cercano al ámbito de actuaciones, estar operativo en el momento de las obras y tener sobrada capacidad, además de contar con la autorización otorgada por la Comunidad de Madrid como Gestores de Residuos de Construcción y Demolición y Depósito Controlado de Residuos Inertes de Construcción y Demolición. Su distancia al centro de la traza es de 18 km.

Por lo que obtenemos unas emisiones de 11.339 T de CO₂ equivalente.

Por último, para calcular la última de las variables, las Emisiones de CO₂ por el Desmantelamiento de la instalación (ECD), teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ por el transporte de material acabado a los puntos de reciclaje y el 5% estimado para su desmontaje, llegamos a 3.873 T de CO₂ equivalente.

$$ECO = ECH + ECA + ECV + ECD$$

$$ECO = 71.723 + 3.404 + 11.339 + 3.873 = 86.935 \text{ T}$$

Que por m² de tablero, sería 65,50 T de CO₂ equivalente/m² tablero, tal y como podemos ver en la siguiente Figura.

Figura 5.62. Puntuación de la función de valor del indicador I8 Emisiones

C5. RESIDUOS

I9. Residuos totales

La división en varias variables para una medición más exacta, es la misma que la realizada para los indicadores anteriores:

$$RTA = RGH + RGA + RGC + RGD$$

Las dos primeras variables hacen referencia a los residuos generados en la fabricación del hormigón (RGH) y el acero (RGA), que según todo lo visto hasta el momento correspondería a un 1% del hormigón consumido en obra según datos facilitados por Cedex y 375kg de escoria por tonelada de acero. Así los valores obtenidos para esta variable son:

MATERIAL	M ³	T	RESIDUOS VERTEDERO (T)
Hormigón total	20.433,11	51.082,78	510,83
Acero total	--	2.144,31	804,12
Aridos totales	23.374,67	37.399,47	37.399,47
TOTAL			38.714,42

Tabla 5.26. Toneladas de material a vertedero

La tercera variable (RGC) también se puede ver en la tabla 5.x. donde todo el material procedente de la excavación y de los saneos y mejoras para el apoyo de los nuevos rellenos, se han llevado directamente a vertedero.

Por consiguiente, al no ser aprovechable el material procedente de la excavación se produce un déficit de tierras que se resuelve trayendo material de préstamo.

<u>Volumen a vertedero (esponjado):</u>	
- Volumen no aprovechable de la excavación del túnel provisional: 689,40 x 1,15.....	792,81 m ³
- Volumen no aprovechable de la excavación de la línea de alta velocidad: (7.748,40 + 5.502,20) x 1,15	15.238,19 m ³
- Volumen no aprovechable de la excavación de la vía de estacionamiento – 2: 1.386,70 x 1,15.....	1.594,71 m ³
- Volumen no aprovechable de la excavación de viales: 4.999,10 x 1,15.....	5.748,97 m ³
Total:	23.374,68 m ³

Figura 5.63. Resumen de volúmenes a vertedero esponjados

A esta última variable hay que sumarle el 1% de los residuos de obra, generados durante todo el mantenimiento del puente a lo largo de su puesta en servicio, que resulta 373,99 T.

Por último, para el desmantelamiento de la instalación (RGD), siguiendo el porcentaje calculado para el reciclado de materiales tras el desmantelamiento, los residuos a vertedero quedarían en un 75% para el hormigón y un 10% para el acero, que generarían 38.312,08 T para el hormigón y 214, 43 T de acero.

Teniendo en cuenta los m^2 del puente, obtenemos un valor para este indicador de 41,77 T/ m^2 .

Figura 5.64. Puntuación de la función de valor del indicador I9 Residuos

C6. ENERGIA

I10. Energía total

Las variables incluidas en este indicador son

$$ECV = EIH + EIA + EIC + EID$$

Según los datos del proyecto, se han utilizado los siguientes tipos de hormigón y acero, que en base a las tablas detalladas en el capítulo 4 sobre los consumos de energía en la fabricación de los materiales obtendríamos las dos primeras variables con consumos de energía para la fabricación del hormigón (EIH) y el acero (EIA), resultando:

TIPO DE HORMIGÓN	M ³	MJ	MKwh
HM-15	1.003,45	1.756.037,50	487,79
HM-20	126,19	233.451,50	64,85
HA-25	134,28	261.846,00	72,74
HA-30	19.169,19	37.379.922,45	10.383,31
TOTAL		39.631.257,45	11.008,68

TIPO DE ACERO	Kg	MJ	MKwh
Barras	1.113.909,91	19.382.032,42	5.383,90
Resto	1.030.403,62	20.711.112,80	5.753,09
TOTAL		40.093.145,22	11.136,98

Tablas 5.27. y 5.28. Energía consumida en la fabricación de materiales de la obra

Las otras dos variables restantes, correspondientes a la energía consumida en obra (EIC) y durante el desmantelamiento de la instalación (EID) que al carecer de datos se ha estimado en un 2,5% de la energía consumida para la fabricación de materiales para la primera de las variables y en 1,5% para la segunda, quedando los resultados:

	MKwh materiales	MKwh
Obra y mantenimiento	22.145,67	553,64
Desmantelam.		332,19

Tabla 5.29. Consumo energético de las obras y el desmantelamiento

Que contando con los m² del puente nos quedarían 11.39 MKwh/m².

Con todo ello, la puntuación obtenida para este indicador es la siguiente:

Figura 5.65. Puntuación de la función de valor del indicador I10 Energía Total

C7. GESTIÓN AMBIENTAL

I11. Valor ecológico del emplazamiento

El proyecto tendrá la puntuación más alta en este indicador, al tratarse de una zona urbana, sin ningún valor ecológico, por lo que ha obtenido una puntuación de 5 puntos.

Figura 5.66. Puntuación de la variable del indicador I11Valor Ecológico

I12. Grado de sensibilización a Normativa Ambiental.

De los datos que se han podido obtener del proyecto y de la documentación de obra, tanto la contrata principal como doce de las subcontratas cuentan con el certificado ambiental ISO 14001, con lo que ha obtenido una puntuación de 13 para este indicador.

Se carece de la documentación de todas las empresas que han trabajado en esta obra, por lo que esta puntuación es orientativa y podría aumentar si se pudiese hacer un estudio más pormenorizado de cada una de ellas.

Figura 5.67. Puntuación de la función de valor del indicador I12 Calidad Medioambiental ISO 14001

C8. SENSIBILIDAD FRENTE A LA COMUNIDAD LOCAL

I13. Información previa y consulta pública

Debido a la normativa por la que se rige el Administrador de Infraestructura Ferroviaria (ADIF) como Entidad Pública Empresarial, cualquier proyecto de obra tiene que publicarse en el Boletín Oficial del Estado antes del inicio del mismo.

Con fecha 8 de noviembre de 2006 la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación del Ministerio de Fomento aprobó técnicamente el «Estudio Informativo del Nuevo Complejo Ferroviario de la Estación de Atocha», siendo sometido al trámite de Audiencia e Información Pública entre los meses de noviembre y diciembre de 2006, mediante publicación del anuncio en el B.O.E. de 16 de noviembre de 2006, de acuerdo con lo establecido en la legislación vigente en ese momento: Ley del Sector Ferroviario y su Reglamento de desarrollo y Real Decreto Legislativo 1302/86 de Evaluación de Impacto Ambiental (modificado por Real Decreto Ley 9/2000).

Durante ese proceso se recibieron 19 alegaciones, 6 de Instituciones y Administraciones Públicas, 12 corresponden a asociaciones y grupos políticos y 1 de un particular.

En las alegaciones presentadas durante el proceso se indicaban una serie de aspectos que se recogieron en las conclusiones del Informe de Alegaciones, que fue remitido,

junto con el expediente de información pública y el propio Estudio Informativo, con fecha 19 de julio de 2007, al Ministerio de Medioambiente solicitando la Declaración de Impacto Ambiental (DIA).

En respuesta, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del citado Ministerio, con fechas 26 de octubre y 26 de diciembre de 2007, remitió sendos escritos en que se solicitaba a la Dirección General de Ferrocarriles la ampliación de algunos aspectos del estudio, previamente a la emisión de la DIA. Por ello, la Dirección General de Ferrocarriles redactó el documento «Información Complementaria. Expediente de Información Pública. Estudio Informativo del Nuevo Complejo Ferroviario de la Estación de Atocha», que fue remitido con fecha 8 de febrero de 2008 a la citada Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ésta, con fecha 20 de febrero, solicitó complementar algunos aspectos de este último documento, por lo que la Dirección General de Ferrocarriles redactó un documento complementario que se remitió con fecha 27 de febrero de 2008.

El objeto del Estudio Informativo fue analizar y definir el diseño de las nuevas instalaciones para la ampliación de la actual estación de Puerta de Atocha, de manera que se consiga una Terminal que en conjunto con el futuro esquema ferroviario de Madrid, tenga capacidad suficiente para un horizonte temporal de largo plazo.

Se quería que el Nuevo Complejo Ferroviario de la Estación de Atocha fuera en su conjunto de una gran calidad, como debe corresponder a la estación central de la red de cercanías y de las líneas de alta velocidad, de forma que constituya una unidad arquitectónicamente integrada con la estación actual, mejorando su funcionalidad y aprovechando al máximo las instalaciones existentes.

Además de esto, ADIF realizó publicaciones sobre el comienzo de las obras en diferentes periódicos y páginas web locales, donde avisaba de cortes de tráfico y diferentes alternativas de circulación.

Con todo esto este proyecto tiene una puntuación de 3 puntos.

Figura 5.68. Puntuación de la función de valor del indicador I13 Información Pública

I14. Contratación y formación de personal local

Este indicador está formado por la suma de dos variables, Número de Cursos Impartidos (NCI) y Número de Personal Local contratado (NPL).

No se ha podido obtener información sobre la procedencia del personal contratado, por lo que a esta variable se le ha estimado un intervalo de contratación de entre el 10% y el 30%, es decir ha obtenido una puntuación de 2.

Hay constancia de que en la obra se han repartido manuales de buenas prácticas ambientales al comienzo de los trabajos, pero no de cursos ni formación del personal durante el periodo de obra, por lo que se le ha dado la puntuación más baja de la variable, 1 punto.

Figura 5.69. Puntuación de la función de valor del indicador I14 Contratación Local

I15. Afecciones a terceros

Al ser un indicador muy amplio, medido con la variable Mitigación de Impactos a Terceros (MIT) que a la vez consta de la suma de varias variables, se van a ir analizando cada una de ellas:

$$\text{MIT} = 0,30 \times (\text{TCP} + \text{MIC}) + 0,6 \times (\text{MIS} + \text{CPP}) + 0,10 \times \text{DPD}$$

El tiempo de construcción del puente (TCP) ha sido de 15 meses y medio, por lo que para esta variable obtiene un puntuación de 3, según lo descrito en el capítulo 4 de este proyecto.

Para las variables Mitigación de Impactos durante la Construcción (MIC), del proyecto constructivo se han extraído los siguientes puntos para la validación del cuadro para la mitigación de los impactos durante la construcción:

- En relación a la mitigación acústica

El proyecto de plataforma del tramo contiene un estudio de predicción de ruidos y vibraciones encaminado a localizar las zonas sensibles a dichos efectos y proponer las posibles medidas preventivas y correctoras. Se proyecta barrera antirruído entre los pp.kk. 100+000 y 100+350, no solo en el puente sino también en el desmonte, para evitar molestias a los vecinos.

Tipo de área acústica		Índice de ruido L_{Amax}
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica	80
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	85
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c.	88
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	90
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial	90

Figura 5.70. Valores límite de emisión máxima de ruido aplicables a infraestructuras ferroviarias

<p>Las medidas preventivas que deben tomarse para minimizar los trastornos debidos al tránsito de vehículos, son las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Selección de maquinaria con características ambientales favorables; se establecerá el primer control sobre las emisiones de la maquinaria de obra. – Se limitará la velocidad máxima de circulación de los vehículos de la obra en las pistas y caminos de acceso a la obra, colocando las correspondientes placas indicativas con prohibición de circular a más de 30 km/h. – Los motores de combustión interna se dotarán de silenciadores. Los grupos electrógenos y compresores que se utilicen serán de los denominados silenciosos y están sometidos al control de sus emisiones a través de un Organismo de Control Autorizado (OCA). – La maquinaria estará homologada según el R.D. 212/2002, de 22 de febrero, que regula los niveles de emisión de ruidos de la maquinaria de obra. Deberán
--

Figura 5.71. Puntos para evitar la generación de ruidos. Artículo I.1.10 del PPT

- En relación con la mitigación visual.

Se cerró parcialmente la zona de obra para proteger visualmente la zona, por lo que se le ha dado el 50% de la puntuación, tal y como viene descrito en el apartado G01. Obras de Tierra del Pliego de Prescripciones Técnicas (PPT).

<p>Levantamiento de vallas metálicas.</p> <p>Consiste en las operaciones necesarias para desmontar los elementos que las componen, cualquiera que sea la altura de la misma, demoler la cimentación que las sustenta, trasladar dichos elementos a lugar de almacenamiento y retirar a vertedero los materiales resultantes de la demolición.</p> <p>Antes de las operaciones de despeje y desbroce se procederá al desmontado de todo tipo de vallas y al establecimiento de vallados provisionales que delimiten la extensión de la zona de obras. El vallado provisional no será de abono.</p> <p>Se tomarán las medidas necesarias para no dañar los elementos de la valla durante el levantamiento, transporte y almacenamiento, a fin de poderla utilizar posteriormente si fuese necesario.</p>

Figura 5.72. Puntos para la mitigación visual del proyecto

- En relación a la calidad del aire

Viene definidas las actuaciones realizadas en los Artículos I.1.2, del Pliego de Prescripciones técnicas.

<p>– El Contratista está obligado a mantener un control efectivo de la generación de polvo en el entorno de las obras, adoptando las medidas pertinentes, entre ellas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar periódicamente operaciones de riego sobre los caminos de rodadura y cuantos lugares estime necesarios la Dirección Ambiental de Obra, dos riegos diarios durante los periodos secos y un riego diario en la época más húmeda. • En la realización de voladuras, utilizar para el retacado material granular y tacos de arcilla, y retirar de la superficie el detritus originado por las distintas operaciones asociadas a las voladuras. • Retirar los lechos de polvo y limpiar las calzadas del entorno de actuación, utilizadas para el tránsito de vehículos de obra. • Emplear toldos de protección en los vehículos que transporten material pulverulento, o bien proporcionar a éste la humedad conveniente. Limitar su velocidad y evitar ese transporte en momentos de fuertes vientos.
--

Figura 5.73. Puntos para evitar la generación de polvo. Artículo I.1.1 del PPT

Así, el cuadro de puntuación queda de la siguiente manera:

VARIABLE	ATRUBUTO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Mitigación de impactos durante la Construcción (MIC)	Mitigación Acústica	Monitoreo mensual del nivel de ruido en las zonas cercanas a los vecinos	2
		Limitar el tiempo de exposición del personal que se ve afectado por actividades consideradas ruidosas	2
		Colocación de pantallas antiruido donde se pueda molestar a los vecinos	2
		Asegurar que los equipos estacionarios productores de ruido se sitúan lejos de receptores sensibles	1
	Calidad del aire	Monitoreo mensual de la calidad del aire en 3 puntos de la obra	0
		Mantener húmedas las áreas de trabajo para el paso de vehículos	0
		Regular la velocidad dentro del área de trabajo	0
		Revisar que los camiones utilicen lonas para el transporte de materiales que emitan polvo	2
		Implementar con barreras vegetales si se presenta un desmejoramiento de la calidad del aire	2
	Mitigación visual	Cerrar la zona de obra de modo que impacte lo menos posible a los vecinos	1
TOTAL			12

Figura 5.74. Puntuación de la variable MIC

Para la siguiente variable del indicador, Mitigación de impactos durante la puesta en servicio de la instalación (MIS), se ha tenido en cuenta lo descrito en el capítulo III.6 Integración Ambiental y el apartado G605 del proyecto, así la puntuación quedaría:

Figura 5.75. Pantallas acústicas colocadas durante las obras

Tabla 5.30. Resultados de la variables MIS

VARIABLE	ATRUBUTO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Mitigación de impactos durante la Puesta en Servicio (MIS)	Mitigación Acústica	Colocación de pantallas antiruido donde el uso del puente pueda molestar a los vecinos	2
	Mitigación visual	Respetar el paisaje existente implementando la vegetación y la ordenación del paisaje	2
	TOTAL		4

Se le ha otorgado la mayor puntuación para la variable conectividad permitida por el puente (CPP), es decir 3 puntos ya que no interfiere en la actividad diaria de la población.

En la variable para la duración del desmantelamiento (DPD), debido a que se trata de un puente mixto, ha obtenido 2 puntos.

$MIT = 0,3 (5 + 12) + 0,6 (3 + 4) + 0,1 (2) = 9,5$ puntos

Figura 5.76. Puntuación de la función de valor del indicador I15 Afecciones a Terceros

C9. RESILIENCIA

I16. Resiliencia. Impacto social de la paralización.

Tal y como se describía en la metodología del estudio del capítulo 4, se han tenido en cuenta seis variables cuyo sumatorio conforman el indicador I16.

$$I16 = NPA + ATI + TIS + RAS + RAT + VAT$$

Así, el número de personas afectadas en caso de paralización del puente (NPA), al tratarse de una ampliación de las vías de Alta Velocidad en el acceso a la estación de ferrocarril más importante de España y con mayor volumen de tráfico, se ha establecido en:

- Nº de asientos por tren: 264 personas
- Ocupación: 70%, entre la ocupación en horas valle (45%) y la ocupación en horas punta (90%).
- Nº de trenes al día: 20 trenes

Por lo afectaría a unas 3.696 personas, que supone una puntuación de 2 puntos.

Al tratarse de las vías de los trenes de Alta velocidad de Atocha procedentes o con dirección al sur, el alcance territorial de la interrupción (ATI) sería nacional, que supone una puntuación de 2 puntos.

El tiempo de interrupción del servicio (TIS), como es una variable que no podemos determinar hasta que no se producen los hechos, se ha tomado un valor medio del cuadro, entre 3 y 5 días de interrupción, por lo que lo ha obtenido 3 puntos.

El riesgo de acciones sísmicas (RAS), según la situación de Madrid en el mapa de valoración nos indica un nivel VI de peligro que lleva asociada una puntuación de 5 puntos, al ser el menor de los valores posibles, es decir el más favorable.

En este caso resulta $ab / g \leq 0,04$, siendo g la aceleración de la gravedad, por lo que no es necesaria la consideración de acciones sísmicas para el cálculo de las estructuras.

Siendo g la aceleración de la gravedad.

La puntuación de la variable por riesgo de avenidas torrenciales (RAT), según la situación del puente y los mapas indicados en el capítulo 4 sería de 4 puntos.

La puntuación de la variable que mide el riesgo por acciones terroristas (VAT) para este proyecto, al tratarse de una vía de Alta Velocidad, será de 3 puntos.

Con todo esto se obtiene una puntuación total de 19 puntos.

Figura 5.77. Puntuación de la función de valor del indicador I16 Resiliencia

5.2.3 Análisis de los resultados

Una vez aplicados todos los parámetros y los pesos otorgados a cada uno de los indicadores, según el árbol de toma de decisión que hemos planteado en el capítulo 4, para el supuesto número dos quedaría de la siguiente manera:

5. Aplicación a Estructuras Existentes. Puentes Ferroviarios

0,6	1,0	2,	1,	18	30	5,0	1,		Cu	Atribi	≥100% I ₁	Resistencia a la tracción, impacto sobre la pasarela	≥130% C	
0,8	1,1	1,	0,	6,0	12	0,0	8,5			Atribi	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,3	2,5	1,	0,	10	10	0,0	3,0		Funde	Atribi	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,6	1,0	3,	1,	3,0	5,0	0,0	3,0		C	Atribi	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,1	1,0	3	8,	5	5	1,	1,		C	Atribi	≥30% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
1,0	1,1	3	0,	2,	5,	0,	5,0		C	Atribi	≥70% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,6	4,2	2	0,	3	8,	3	1,		C	MW/h	≥100% I ₂	Ecología del emplazamiento	≥130% C	
0,8	1,0	3	1	1	2	1	4,		C	Tn/m	≥100% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,3	-0,	0	-4	2	2	9	4,		decrec Curva	2	≥100% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,5	1,0	2	1,	1	2	5	1		Cu	Tn/m ²	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
1,0	1,0	3	5,	1	2,	1	0,0		C	Tn/m	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,5	1,0	3	6,	2	2	2	4,		C	Tn/m	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,0	1,1	1	2,	5,	0,	0,0				Atribi	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,3	1,0	1	0,	5	7	5			Funde	ME/m	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,5	1,0	3	2	2	1,	2	8,0		Cu	Atribi	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	
0,3	1,0	3	0,	6,	0,	1	6,0		C	miles	≥40% I ₂	Resistencia a la tracción	≥130% C	

Figura 5.78. Resumen de puntuación del segundo proyecto

5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBOS PROYECTOS

Una vez analizados ambos proyectos vamos a realizar una comparativa de los resultados para poder valorar que proyecto de los dos es más sostenible y analizar los resultados obtenidos.

En una primera fase se ha comparado la puntuación obtenida por cada proyecto respecto de la puntuación máxima posible según las tres parámetros que conforman la definición de sostenibilidad: económica, medioambiental y social y la ponderación de cada parte respecto del propio proyecto.

En una segunda fase se han comparado cada uno de los indicadores del modelo para los dos proyectos, viendo las diferencias y los resultados obtenidos.

Por último, se ha realizado una gráfica por proyecto con la agrupación de criterios que conforman las categorías de estudio del modelo.

Para realizar la comparativa de ambos proyectos no se han modificado los pesos del modelo al tratarse de dos estructuras similares ya construidas, pero este modelo podría adaptarse a las preferencias y necesidades del decisor, modificando los pesos que se asignan a los elementos que lo conforman, realizando siempre la asignación de pesos antes de determinar cuáles van a ser los casos de estudio, para no favorecer la arbitrariedad.

En estas primeras gráficas se muestra la puntuación obtenida por cada puente respecto del total de puntos posibles.

Figura 5.79. Puntuación del primer proyecto respecto a la máxima puntuación

Figura 5.80. Puntuación del segundo proyecto respecto a la máxima puntuación

De estas dos gráficas se pueden extraer algunos puntos importantes para comparar y diferenciar los proyectos:

- El puente mixto tiene un peso importante en la parte medioambiental, superando al 70% respecto del 35% del puente de hormigón.
- Del puente de hormigón resalta el aspecto económico, con un peso muy importante en esta parte, llegando a un cumplimiento del 88% respecto al 39% del puente mixto.
- En la parte social aunque más igualados, destaca el puente mixto con casi un 61%, frente al 43% del puente de hormigón. Este es el requerimiento menos marcado y ambos puentes tienen margen de crecimiento.

Figura 5.81. Puntuación porcentual conseguida por el puente hormigón respecto a los requerimientos
Figura 5.82. Puntuación porcentual conseguida por el puente mixto respecto a los requerimientos

Con estas otras dos nuevas gráficas, Figuras 5.81, podemos reforzar las conclusiones obtenidas en las cuatro primeras, Figuras 5.79. y 5.80., donde se puede observar que el peso medioambiental es mucho mayor en el puente mixto, mientras que en el puente de hormigón destaca por su puntuación económica y ambos puentes están mal situados frente a los aspectos sociales a tener en cuenta en una construcción sostenible.

Con esta comparativa se ve claramente la parte menos desarrollada a día de hoy de los tres parámetros que forman la definición de sostenibilidad.

La comparativa de los indicadores se ha realizado por m^2 de puente para poder analizar el mismo valor en ambos puentes, ya que se trata de dimensiones de puente muy diferentes, 129 m del puente mixto frente a los 649 m del puente de hormigón.

I1. Costes de las obras.

Como se puede ver en la Figura 5.83. y ya hemos podido analizar con anterioridad, los costes/ m^2 del puente mixto son muy superiores a los del puente de hormigón.

En esta valoración hay que tener en cuenta la situación de ambos puentes y su estética. El puente mixto se encuentre en una zona urbana, en el acceso a la estación de Atocha, con una relevancia importante, donde el peso estético que se le ha querido dar al puente es grande, mientras el puente de hormigón, se encuentra en un cruce de autopistas, sin vecinos colindantes, por lo que la estética no era prioritaria en este caso.

Figura 5.83. Comparativa de los resultados para el indicador I1

I2. Costes por no calidad.

Con este indicador se señala de manera clara el número de empresas que cuentan con el certificado ISO 9001, que es superior en el puente de hormigón.

Figura 5.84. Comparativa de los resultados para el indicador I2

I3. Costes de mantenimiento y desmantelamiento

Este indicador señala claramente que los costes por el mantenimiento y desmantelamiento de un puente de hormigón son superiores respecto a los de un puente mixto, ya que el mantenimiento de las pilas y las estructuras de hormigón es mayor que la pintura de una estructura mixta. Además como ya se ha visto el desmantelamiento de esta último es más rápido, lo que conlleva menores costes.

Figura 5.85. Comparativa de los resultados para el indicador I3

I4. Resiliencia frente a eventos no previstos

Este indicador se ha evaluado mediante la comparativa de las características constructivas de puente, concluyendo como muestra la Figura 5.86. que los puentes continuos se comportan mejor frente a movimientos de la base ya que absorben mejor las vibraciones que los puentes isostáticos. Por otra parte, al tratarse de un puente metálico es más elástico frente a eventos no previstos, por lo que el puente mixto ha obtenido una puntuación mayor.

Figura 5.86. Comparativa de los resultados para el indicador I4

I5. Recursos naturales

Este indicador es muy significativo, ya que existe una gran diferencia entre los recursos naturales consumidos por el puente mixto y el puente de hormigón como se puede ver en la Figura 5.87. Esto es debido en gran parte a que se utiliza un mayor porcentaje de materias primas recicladas en la fabricación del acero que en la fabricación del hormigón y sobre todo, hay que destacar, los m³ obtenidos de canteras y gravas para los terraplenes, rellenos y la capa de forma que han sido necesarios en el puente de hormigón.

Figura 5.87. Comparativa de los resultados para el indicador I5

I6. Consumo de agua

En el consumo de agua ocurre lo contrario, el puente mixto obtiene peor valoración al consumir mucho más agua en su proceso de fabricación en comparación con el proceso de fabricación del hormigón. El consumo de agua en los mantenimientos y durante la puesta en servicio es similar, mientras que en el desmantelamiento es superior, aunque no significativamente, en el puente de hormigón.

Figura 5.88. Comparativa de los resultados para el indicador I6

I7. Recursos Reciclados

Como es lógico, en este indicador ocurre lo mismo que con los recursos naturales, es el puente mixto el que obtiene una puntuación más alta al haber consumido más materia prima reciclada que el puente de hormigón, debido a los altos porcentajes de materia prima reciclada que conlleva la fabricación del hormigón.

Hay que tener en cuenta que en ninguno de los dos proyectos se han recuperado áridos de los desmontes.

Hay que tener en cuenta también, que en este apartado se ha considerado el agua reciclada en la fabricación del acero.

Por último, en el desmantelamiento de las instalaciones, el porcentaje de recuperación del puente mixto es mucho mayor, llegando a duplicarlo, que el porcentaje de recuperación del puente de hormigón.

Figura 5.89. Comparativa de los resultados para el indicador I7

I8. Emisiones de CO₂

El acero contribuye en mayor medida al calentamiento global, con mayores emisiones de CO₂ a la atmósfera en su producción, por lo que el puente mixto tiene una puntuación menor en este indicador. Además el peso de este material también ha influido negativamente en mayores emisiones de CO₂ en el transporte del material.

Figura 5.90. Comparativa de los resultados para el indicador I8

I9. Residuos

Según muestra la Figura 5.91. los residuos generados en el puente de hormigón son mayores por m² que los generados en el puente mixto, y esto viene dado por los m³ de desmonte que no se reutilizan y tiene que ser llevados a vertedero en el caso del puente de hormigón.

Figura 5.91. Comparativa de los resultados para el indicador I9

I10. Energía total

En la Figura 5.92. se muestra la diferencia de energía consumida durante la vida útil de ambos puentes, destacando que el puente de hormigón obtiene mayor puntuación al consumir menor cantidad de energía sobre todo en la fabricación de sus materias primas.

El resto de variables de este indicador se mantienen similares en ambos puentes.

Figura 5.92. Comparativa de los resultados para el indicador I10

I11. Valor ecológico del emplazamiento

Estos dos valores son muy similares en ambos puentes al estar ubicados en zonas sin valor ecológico específico. Como se muestra en la figura 5.93. el puente mixto ha obtenido mayor puntuación por encontrarse ubicado en una zona urbana.

Figura 5.93. Comparativa de los resultados para el indicador I11

I12. Calidad Medioambiental. ISO 14001

En la gráfica se ve de un modo claro y rápido cual de los dos puentes cuenta con el mayor número de empresas con el certificado ISO 14001.

Figura 5.94. Comparativa de los resultados para el indicador I12

I13. Información pública

En la figura 5.95. se muestra el resultado de la comparativa de la información pública facilitada a la comunidad de vecinos para su participación activa en la toma de decisiones en la construcción del puente. Como se puede observar la participación ciudadana fue mayor en el puente mixto, quizás por su ubicación en zona urbana.

Figura 5.95. Comparativa de los resultados para el indicador I13

I14. Contratación local

Este indicador, aunque es importante dentro del peso del árbol de toma de decisión y tiene gran influencia en la participación de la comunidad, en esta comparativa no tiene un peso relevante al no contar con datos suficientes para su análisis exhaustivo.

Figura 5.96. Comparativa de los resultados para el indicador I14

I15. Afecciones a terceros

Según la puntuación mostrada en la Figura 5.97., debido a la situación del puente mixto se le ha dado en el proyecto una mayor importancia a este indicador, valorándose la integración en el entorno y la implicación de la comunidad de vecinos.

Figura 5.97. Comparativa de los resultados para el indicador I15

I16. Resiliencia

Debido al gran numero de variables que se ha tenido en cuenta en este indicador, los resultados de ambos proyectos son muy similares, situándose además en un punto medio de la valoración.

Figura 5.98. Comparativa de los resultados para el indicador I16

En las figuras siguiente, Figura 5.99. y 5.100., se puede ver un resumen de cada uno de los indicadores para ambos proyectos.

Figura 5.99. Resumen de indicadores del primer proyecto

Figura 5.100. Resumen de indicadores del segundo proyecto

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan de los estudios y adaptaciones realizadas a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Finalmente, en otro orden de cosas, se presentan las futuras líneas de investigación donde se enumeran una serie de sugerencias para dar continuidad a esta tesis en futuros trabajos de investigación.

Las conclusiones más relevantes se recogen a continuación:

1. Se ha propuesto un nuevo modelo para la evaluación del desarrollo sostenible de las infraestructuras ferroviarias, más en concreto en para puentes ferroviarios. Este método abarca toda la vida útil de las mismas desde las fases iniciales de planificación hasta el desmantelamiento de las mismas y está basado en un análisis multi-criterio para su aplicación en obras civiles.
2. Se ha desarrollado un modelo que salva algunas limitaciones existentes para obtener un conjunto de indicadores de sostenibilidad en las infraestructuras ferroviarias, ya que a día de hoy no hay herramientas estandarizadas que permitan una evaluación de dichas infraestructuras y ninguna de ellas incluye la resiliencia frente a eventos no previstos de las instalaciones.
3. El modelo planteado ha obtenido unos parámetros medios para los tres ámbitos de la sostenibilidad: económico, medioambiental y social, que presenta un modelo equilibrado y diferente a la toma de decisión actual en los proyectos de construcción civil, basada principalmente en el peso de la

parte económica del sistema.

4. Se han identificado los modelos y herramientas existentes en la evaluación sostenible como ayuda a la toma de decisiones en el sector de la construcción (edificación y la escasa documentación de ingeniería civil). Se ha identificado una falta de metodología científica clara y precisa para la identificación, selección y priorización de indicadores de sostenibilidad en el sector de la construcción.
5. Se ha desarrollado un conjunto de indicadores del modelo, que se ha limitado a 16 con el principal objetivo de que sea manejable. El modelo abarca todos los axiomas de la sostenibilidad. A su vez, con el análisis de las herramientas existentes, se ha desarrollado una metodología para seleccionar la alternativa más óptima de un puente ferroviario desde el punto de vista de diseño. Esta metodología se ha basado en un modelo de tres ejes los cuales constituyeron el alcance del proyecto (requerimientos, componentes y ciclo de vida). Se han escogido aquellos que tienen más influencia en la sostenibilidad de proyectos civiles.
6. La metodología creada constituye una nueva propuesta hacia la estandarización en la identificación y selección de indicadores de sostenibilidad en la gestión de proyectos de construcción. Además, considerando la revisión de la documentación científica y la legislación aplicable, la propuesta metodológica permite obtener, por un lado el desarrollo de indicadores de sostenibilidad en la misma dirección que otros campos más desarrollados en estos momentos, como es el sector de la edificación, así como la aplicación en otros países.
7. El análisis del sistema de indicadores propuesto muestra que existe un gran número de indicadores emergentes, que a día de hoy no han sido fáciles de evaluar debido a lo novedoso del indicador y a la poca información existente, como es la resiliencia de las infraestructuras, pero que suponen un gran avance en .
8. Se ha buscado la validación y aplicación del sistema de indicadores de sostenibilidad ante dos casos de estudio de viaductos ferroviarios en España. Con el método desarrollado se pretende dar cabida tanto al estudio y la comparativa de varias alternativas de una misma estructura en una ubicación ya determinada como a sus diferentes ubicaciones dentro de las posibilidades de traza y a la elección de la zona más óptima sosteniblemente hablando.
9. Los resultados obtenidos han demostrado la viabilidad y las ventajas de su aplicación en el ámbito de estudio. Demostrando que

- 10.** La metodología utilizada para definir las distintas variables asegura que un técnico, aunque sea poco experimentado, va a poder realizar la evaluación con una notable precisión.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Entre los elementos de origen de este trabajo se han seguido las futuras líneas de investigación de la tesis de Noé Villegas Flores sobre el Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras, donde plantea la realización de un sistema de evaluación de la sostenibilidad para otros campos de aplicación con el fin de lograr una certificación de la sostenibilidad en los proyectos de ingeniería civil.

Se ha estudiado una metodología para evaluar puentes ferroviarios durante la fase de proyecto, construcción, durante su vida útil y su desmantelamiento. Dadas las perspectivas creadas desde esta línea de investigación sería conveniente:

- Aplicación de análisis de valor a otros campos o disciplinas diferentes, tales como infraestructuras ferroviarias, lineales etc.
- Hacer un análisis más exhaustivo de los variables propuestas para las construcciones ferroviarias. Como se ha planteado a lo largo del desarrollo de esta tesis, la propuesta desarrollada en el capítulo 4 respecto al árbol de requerimientos está desarrollado con las simplificaciones que requiere el ámbito de trabajo de esta investigación. En el futuro se necesitaría un completo, pero a la vez, sencillo árbol de requerimientos de tal manera que describan cada una de las variables de una manera más exacta.
- Actualmente la metodología hace una descripción somera sobre la incertidumbre y la resiliencia lo que conlleva a que se hagan futuras mejoras respecto a este tema teniendo en cuenta un análisis financiero y social de riesgos.
- Al comienzo de la tesis se definió el alcance de la propuesta el cual cobijaba la decisión respecto al tipo de puente a construir, de cara a futuro se puede desarrollar decisiones respecto a la localización óptima del futuro puente, decisiones respecto a la ubicación más favorable.
- Muchos de los indicadores analizadas no se han podido desarrollar de una manera detallada por no existir de datos suficientes para ello al tratarse de puentes ferroviarios ya finalizados y han tenido que ser valorados por variables de experto. En futuros trabajos se puede determinar con mayor exactitud cada una de estas variables y obtener valores más exactos para valorar los indicadores.
- El desarrollo de este modelo será el punto clave para lograr una certificación en construcción civil adaptable a nivel internacional y en todos los aspectos que enmarca la sostenibilidad: económicos, sociales y culturales.

- A la hora de evaluar el criterio de consumo de materiales, en el que el gran número de materiales que se utiliza resulta en una escasa influencia de cada uno de ellos en la puntuación final. Una evaluación más exclusiva que incluya aquellos materiales con más representación ya sea en peso, toxicidad o emisiones, puede conducir a una evaluación más aproximada a los parámetros de influencia medioambiental.
- Al igual que al evaluar el criterio de consumo de materiales, pasaría lo mismo con el criterio de energía total consumida, ya que la escasez de datos objetivos ha hecho muy difícil la evaluación de este criterio en las fases de obra, puesta en servicio y desmantelamiento de la instalación, por lo que se podría determinar con mayor exactitud los datos sobre el consumo energético.
- Aunque en este modelo no se han tenido en cuenta las actuaciones previstas durante la ejecución de las obras para evitar la contaminación de las aguas y del suelo por vertidos accidentales, es un punto de mejora que habrá que tener en cuenta para las futuras líneas de investigación.
- Al inicio de la tesis se han analizado y caracterizado una serie de variables más relevantes que integran el desarrollo del puente ferroviario. No obstante, dichas variables constituyen tan solo la base inicial o armazón que describen de manera muy próxima, las necesidades planteadas para este tipo de construcción y se dejan abiertos muchos caminos para posibles líneas de investigación ampliando dichas variables.
- En esta tesis se han mencionado la ISO 21929-1, actualmente en desarrollo, pero no se ha trabajado dentro de su marco normativo, por lo que el modelo presentado y todos los indicadores de sostenibilidad deberían enfocarse para ser aplicados y evaluados dentro de este marco de trabajo del estándar ISO.

7 BIBLIOGRAFÍA

AA. VV. *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*. Noviembre 2009. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental Departamento de Medioambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca Gobierno Vasco.

Agencia Europea Ambiental (EEA – European Environmental Agency). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2012 and inventory report 2014*. 2014.

Aguado, A.; del Caño, A.; de la Cruz, M.P.; Gómez, D. y Josa, A. *Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code*". 2012. Journal of Construction Engineering and Management - ASCE, 138(2).

Ahmad, Y.; El Serafy, S. y Lutz, E. *Environmental accounting for sustainable development*. 1989. The World Bank, Washington, D. C.

Alarcón Núñez, B.; Aguado de Cea, A.; Josa García – Tornel, A. *Aplicación de la metodología de valor MIVES al edificio industrial sostenible*. 2006. X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.

Alarcón Núñez, Deissy Bibiana. *Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles*. 2005. Escola Tècnica Superior d'enginyers de Camins, Canals i Ports. Universitat Politècnica de Catalunya.

Alarcón, B.; Aguado, A.; Manga, R. y Josa, A. *A Value Function for Assessing Sustainability: Application to Industrial Buildings. Sustainability*. 2010. 3(1), 35-50; Doi:10.3390/su3010035.

Alfsen, K. H., y Viggo Saebo, H. *Environmental quality indicators: background, principles and examples for Norwa*. 1993. Environmental and resource economics, núm. 3, pp. 415-435.

Antonio Burgueño Muñoz. *Gestión Integral del Agua*. 2010. Servicio de Calidad y Medioambiente FCC Construcción.

Arboleda, J. *Una propuesta para la identificación y evaluación de impactos ambientales*. *Crónica Forestal y del Medioambiente*, nº 9. 1994.

Campos. J.; De Rus. G. y Barrón, I. *El Transporte Ferroviario de Alta Velocidad. Una Visión Económica*. 2009. Fundación BBVA. Bilbao.

Centro Común de Investigación, CCI, de la Comisión Europea (2008) Potenciales de Mejora Medioambiental de los Edificios Residenciales (IMPRO-Building). Oficina para Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo. 103 pp.

Cillero Hernández A. y García Álvarez, A. *Planificación y Programación del Servicio de Viajeros*. 2011. Aula de Formación Ferroviaria. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Domenech Quesada, Juan Luis. *Huella Ecológica y desarrollo sostenible*. 2007. Aenor Ediciones, Madrid.

ENSLIC BUILDING. *Directrices para el ACV simplificado de edificios - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings* (versión en español). 2010. 51 pp.

ENSLIC. Energy Saving through promotion of Life Cycle analysis in building. Co-financiado por la Comisión Europea, dentro del Intelligent Energy Programme (EIE/07/090/SI2.467609).

European Thematic Network on Practical Recommendations for Sustainable Construction (PRESCO).

European Union Directive on the Energy Performance of Buildings (EPBD2002/91/EC).

Fernández-Sánchez G.; Rodríguez-López, F.; Aguado, A.; Manga, M.; and Ormazábal, G. *Proposal for the integration of sustainability criteria in civil engineering projects: a case study*. 2006.

Fernández-Sánchez, Gonzalo. *Propuesta de Modelo para la Sostenibilidad en la Dirección Integrada de Proyectos de Ingeniería Civil*. 2010. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

Francesc Pardo i Bosch. *Gestión Integrada de Obras Hidráulicas de Hormigón: del diagnóstico a la inversión*. 2014. Universitat Politècnica de Catalunya.

Grupo de trabajo de ACHE. *Sostenibilidad y Construcción*. 2012. España.

Guía de la Edificación Sostenible: calidad energética y medioambiental en la edificación. IDAE, Institut Cerdá y Ministerio de Fomento. Madrid 1999.

Guía para la construcción de puentes integrales de carreteras. Ministerio de Fomento.

Informe sobre empleos verdes. Observatorio de la Sostenibilidad en España.

Josa, A.; Aguado, A. y Gettu, R. *Construcción y medioambiente. 1ª parte: Evaluación medioambiental. Rev.: Cemento – Hormigón*. 2001. Nº 827, septiembre, Pp.: 877-894.

Koji Sakai y Takafumi Noguchi. *The sustainable use of concrete*. 2012. USA.

Luis Irastorza. *Las Ciudades Del Siglo XXI*. Ensayo Sobre Sus Fundamentos Socioeconómicos, Tecnológicos, Energéticos y Climáticos. 2012. Fundación Esteyco.

Mamen Miñas Arenas. *Materiales Sostenibles en Edificación*. 2012. Universitat Politècnica de Catalunya.

Martín Cañizares, M. P. *¿Es posible la alta velocidad en vía única?*. 2011. Ponencia presentada en el marco de la XI Semana de la Ciencia.

Martin P. Burke, Jr.; The Genesis of Integral Bridges; Concrete International, July 1996.

Mas Carrera, Carlota. *Adaptación a nivel nacional del sistema de evaluación alemán DGNB: aplicación particular al edificio Caixaforum de Zaragoza*. 2013. Escola Tècnica Superior d'enginyers de Camins, Canals i Ports. Universitat Politècnica de Catalunya.

Minayo de la Cruz, F. y García Álvarez, A. *Relación entre la alta velocidad ferroviaria y los costes operativos no energéticos. En La importancia de la velocidad en el Ferrocarril*. 2008. Monografías. Fundación Caminos de Hierro. Madrid.

Pérez Arenas, R. & Millan, C. Abertis Autopistas España y JM. Simón-Talero, Torroja Ingeniería S.L. *La Gestión del mantenimiento de puentes de una red de autopistas en régimen de concesión. Resultados de los desarrollos recientes y de su aplicación*. 2009.

Planteamiento MIVES para la evaluación. El caso de la EHE Cem.-Hormigón, (913), 26–34 (in Spanish).

Proyecto ACV-SC, “Análisis de ciclo de vida comparativo de distintas soluciones constructivas aplicables a edificios residenciales y terciarios”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER (ENE2009-14714-C02-01).

R. Losada, E. Rojí, and J. Cuadrado. *Los aspectos conceptuales del proyecto MIVES. La medida de la sostenibilidad en edificación industrial*. eds., UPV, UPC, Labein-Tecnalia, Bilbao, Spain, 113–134 (in Spanish).

Riezmik, N.; Hernández, A. *Análisis de Ciclo de Vida*. 2005. Artículo en Biblioteca Ciudades para un Futuro más Sostenible.

Rodríguez, F.; Fernández, G. *Ingeniería sostenible: nuevos objetivos en los proyectos de construcción*. 2010. Universidad Politécnica de Madrid. ESPAÑA.

Rus, G. del. *Análisis coste-beneficio: evaluación económica de políticas y proyectos de inversión*. 2008. Ariel. 3ª Edición. Barcelona, 372 p.

Sohn, H.; Sridhar, S. *Fundamentals of Metallurgy*. 2005. Seshadri Seetharaman.

Tolón Becerra, A. y Lastra Bravo, X. *Los Espacios Protegidos. Concepto, evolución y situación actual en España*. 2009. Universidad de Almería.

U.S. Green Building Council. 2009. Breeam equivalence for LEED, US.

U.S. Green Building Council. 2009. LEED for new construction and major renovations, US.

Villegas, N. *Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras*. 2009. Tesis doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Zabalza Bribian, I. *Proyecto Energy Saving through promotion of Life Cycle analysis in building*. 2010. ENSLIC.

Zabalza Bribian, I. *Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España*. 2011. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza. 449 pp.

Páginas web

BBVA. <http://www.fbbva.es/TLFU/dat/DT_03_09_transporte_ferroviario_web.pdf>

Bloc de eTecma. 2012. <<http://www.e-tecmalearning.es>>

BREEAM-NL. <<http://www.breeam.nl>>

CARRETEROS. <<http://www.carreteros.org/normativa/ehe/ehe.htm>>

CEN. European Committee for standardization. <<http://www.cen.eu/Pages/default.aspx>>

EHE.<http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPH/instrucciones/EHE_es/>

Escuela de Organización Industrial. <<http://www.eoi.es>>

IDAE. <<http://www.idae.es/>>

LEED. < <http://www.usgbc.org/leed>>

MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE. <<http://www.magrama.es/es/>>

Observatorio de la Sostenibilidad. <<http://www.observatoriosostenibilidad.com/>>

Observatorio de la Sostenibilidad de España Empleo Verde en una Economía Sostenible.
Agenda de la Construcción Sostenible. <<http://es.csostenible.net/>>

PRESCO. <<http://www.etn-presco.net/>>

VERDE. < <http://www.gbce.es/pagina/certificacion-verde>>

World Green Building Council. 2012. <<http://www.worldgbc.org>>