



**premio internacional**  
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS  
JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**Texto completo correspondiente al artículo:**

## **El análisis del ciclo de vida en la evaluación ambiental de secciones de firme**

**Autor: Alberto Moral Quiza**

Publicado en el número especial de la revista *Carreteras*:

---

“Premio Internacional a la Innovación en Carreteras  
*Juan Antonio Fernández del Campo*”. VI Edición 2015-2016

---

Nº 214, julio – agosto 2017

**VI PREMIO INTERNACIONAL A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS**  
**JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO**



**LA HERRAMIENTA AMBIENTAL ANÁLISIS DEL CICLO DE  
VIDA EN EL ESTUDIO DE SECCIONES DE FIRME.  
EVALUACIÓN AMBIENTAL DE VARIAS SECCIONES DE  
FIRME DE CATEGORÍA DE TRÁFICO T00 A T2 CONFORME  
A LA NORMA 6.1-IC**



## Contenido

<b>01 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. MOTIVACIÓN</b> .....	2
<b>02 SECCIONES DE FIRME OBJETO DE ESTUDIO</b> .....	6
<b>03 EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO HERRMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL</b> .....	12
<b>3.1 El concepto de Análisis del Ciclo de Vida</b> .....	12
<b>3.2 Metodología del ACV</b> .....	14
<b>04 OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO</b> .....	16
<b>4.1 Objetivo del estudio</b> .....	16
<b>4.2 Alcance del estudio</b> .....	17
<b>05 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA</b> .....	23
<b>06 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS SECCIONES</b> .....	33
<b>6.1 Calentamiento global</b> .....	34
<b>6.2 Consumo de agua</b> .....	38
<b>07 CONCLUSIONES</b> .....	43
<b>08 AGRADECIMIENTOS</b> .....	48
<b>09 REFERENCIAS</b> .....	49

## CAPÍTULO 01



## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. MOTIVACIÓN

*El presente trabajo constituye un resumen de la Tesis Doctoral realizada por Alberto Moral Quiza, que fue defendida el 17 de junio de 2016, incluida en el marco del Programa “Medio Ambiente y Territorio” en la Escuela Politécnica de la Universidad Alfonso X el Sabio, en Villanueva de la Cañada, Madrid. El título de la tesis es “La herramienta ambiental análisis del ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la norma 6.1-IC”, y ha sido dirigida por D. Luis Couceiro Martínez.*

La **carretera** ha sido, es y sin duda será un elemento crucial en el desarrollo y bienestar del ser humano, como lo ha demostrado a lo largo de la historia y como queda patente en la actualidad.

Prácticamente cualquier actividad a desarrollar en el día a día, bien por una persona individual o por un colectivo, independientemente del grupo social al que pertenezca, la franja de edad en la que esté incluido, esté relacionado con su vida personal o laboral, de cualquier sector industrial y económico; pasa inexorablemente por la necesidad de acudir a estas infraestructuras que facilitan el transporte de personas y mercancías, conectando distintas

localizaciones y facilitando que la sociedad disponga de un soporte para realizar su actividad cotidiana.

El mayor número de desplazamientos de personas y de mercancías se realiza por carretera, a una gran distancia con respecto al resto de modalidades de transporte interior, lo que coloca a la carretera como el soporte de comunicación más importante. Por otro lado, las infraestructuras viarias determinan en gran medida decisiones estratégicas para realizar asentamientos industriales o comerciales, generadores de riqueza y bienestar, condicionan el entorno que nos rodea y se convierten en una pieza clave para la toma de decisiones a distintos niveles. Todos estos factores hacen que la carretera sea un elemento interesante a estudiar, no sólo desde el punto de vista conceptual, sino desde otros puntos de vista que pueden ofrecer nuevas perspectivas de este elemento tan cotidiano y asumido como básico por la sociedad actual.

El presente trabajo trata de establecer cómo interactúa la carretera con el medio ambiente, utilizando la herramienta ambiental más comúnmente aceptada en la actualidad, el **Análisis del Ciclo de Vida (ACV)**.

El ACV es una herramienta que determina los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante: la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a estas entradas y salidas y la interpretación de los resultados de las fases de inventario y de impacto con relación a los objetivos del estudio.

La principal motivación de este trabajo es determinar los impactos ambientales de las **secciones de firme** que componen la carretera utilizando como herramienta de evaluación el Análisis del Ciclo de Vida. Quedan además incluidos dentro del campo de estudio los escenarios de conservación, que en muchos estudios anteriores bien son marginados o desechados debido a su complejidad y ambigüedad.

Para lograr la mayor transparencia y trazabilidad en el estudio, en el presente trabajo se describe cómo se estructura una sección de firme, cuáles son sus principales componentes y cómo se desarrollan todas las actividades desde la extracción de materias primas que componen las secciones de firme hasta la puesta en obra de las mismas.

El principal activo de este trabajo es el inventario del ciclo de vida que se ha realizado para cada una de las etapas del ciclo de vida del producto que se ha estudiado. Una de las carencias más extendida en los análisis de ciclo de vida es la poca trazabilidad de los datos, la presentación de los mismos de forma agregada o el modelo “caja negra”, donde no es posible profundizar en un producto intermedio o una etapa concreta.

En el presente trabajo, y gracias a la colaboración de una empresa constructora especialista en obra civil, se ha conseguido elaborar un inventario muy detallado para cada una de las secciones de firme estudiadas, que muestran datos a un nivel de detalle que no ha sido realizado en ningún análisis de ciclo de vida anterior.

La normativa española vigente en lo que respecta a secciones de firme que ha sido utilizada para realizar este trabajo ha sido:

- Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC secciones de firme, de la instrucción de carreteras (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2003).
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes actualizado de acuerdo a la Orden FOM/2523/2014 de 12 de diciembre (PG-3) (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2015)

Las secciones de firme analizadas han sido las secciones 0031, 0032 y 0033 para categorías de tráfico T00, las secciones 031, 032 y 033 para la categoría de tráfico T0, las secciones 131 y 132 para T1 y 231 y 232 para categorías de tráfico T2. La selección de estas secciones responde varias motivaciones:

- No es la intención de este trabajo realizar comparaciones entre pavimentos asfálticos y pavimentos rígidos, sino establecer las directrices generales de comportamiento ambiental de las secciones de firme más comúnmente utilizadas en el territorio nacional, que son las secciones que incluyen capas de rodadura asfálticas, en un porcentaje superior al 90 %.
- Debido a la gran cantidad de información proporcionada por el suministrador de los datos de inventario, se pretende establecer una comparación de los distintos tipos de secciones utilizando para ello diversos indicadores ambientales.
- Se podrá discernir entre distintas soluciones constructivas atendiendo a los resultados ambientales obtenidos.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en el presente trabajo son válidos para el producto estudiado y bajo las condiciones de contorno de la empresa suministradora de los datos de inventario, lo que implica que estos resultados pueden variar en otros análisis de ciclo de vida realizados en otras compañías, si bien proporcionarán una información muy valiosa en lo que se refiere a conocimiento ambiental de las secciones de firme. Por tanto, los objetivos del presente trabajo se centran en:

- Analizar el impacto ambiental de una parte fundamental de la carretera, como son las secciones de firme, con el fin de poder identificar dónde recaen los mayores impactos,

bien desde el punto de vista estructural del elemento a estudiar o de la etapa del ciclo de vida analizada.

- También se establecerá una relación entre cada uno de los componentes de la sección y su impacto ambiental, introduciéndose de esta forma el concepto de densidad ambiental, que puede ser expresado por un indicador específico.
- Que los resultados finales aborden el concepto de unidad funcional de una manera novedosa, incluyendo el concepto de unidad funcional teórica o calculada sobre proyecto y la unidad funcional real tras 30 años de operación, pudiéndose establecer relaciones entre ambas y sus resultados ambientales.
- Se realizará una evaluación acerca del tipo de uso que se da a la sección y que viene marcado por la categoría de tráfico a la que pertenece, estableciendo una relación directa entre carga ambiental y tránsito de vehículos pesados (factor que establece el tipo de categoría de tráfico y por tanto, diseño de sección).

Por tanto, la motivación de este trabajo surge del interés en conocer con más detalle las características de la carretera como soporte físico al tráfico rodado y su impacto ambiental asociado a su ciclo de vida, incluyendo la extracción de materias primas, transporte de las mismas hasta las plantas de fabricación, procesos de fabricación llevados a cabo, distribución desde las plantas hasta la obra de los materiales constituyentes de la sección y puesta en obra de dichos materiales.

Hasta este punto, el análisis estaría dentro de la categoría *cradle to construction* (de la cuna a la construcción), pero el estudio se encarga también de analizar con detalle los tipos de actuaciones que se realizan durante la vida útil de la carretera y las implicaciones ambientales que conllevan.

El ACV es una herramienta útil y eficaz para abordar este tipo de evaluaciones, proporcionando una información muy valiosa para todo tipo de audiencias (constructores, Administraciones Públicas y público en general) como un elemento a tener en cuenta a la hora de tomar decisiones estratégicas en la construcción de las infraestructuras de nuestro país.

Desde el punto de vista del autor, el Análisis del Ciclo de Vida reúne todas las condiciones necesarias para introducir nuevos criterios en la etapa de diseño con el fin de establecer estrategias de mejora en el comportamiento ambiental de las infraestructuras en general, y de las secciones de firme estudiadas en esta tesis en particular.



## CAPÍTULO 02

### SECCIONES DE FIRME OBJETO DE ESTUDIO

A la hora de seleccionar las secciones de firme a estudiar, se tuvieron en cuenta las características del elemento sobre el que se apoya la sección de firme: la explanada. De acuerdo a la Norma 6.1 IC, las categorías de tráfico T00 y T0 únicamente pueden estar soportadas sobre explanada tipo E3, la categoría T1 sobre explanada E2 y E3, mientras que la categoría T2 presenta las tres posibilidades de explanada.

Con el fin de establecer criterios de comparación equitativos, a partir de una misma base de estudio y no distorsionar los resultados debido a la elección de una explanada de prestaciones diferentes, todas las secciones de firme estudiadas serán las correspondientes a las dispuestas sobre explanada E3.

El presente estudio se centra en secciones de firme que incluyen mezclas bituminosas, es decir, secciones semiflexibles y semirrígidas. En ningún momento la intención de este estudio es realizar comparaciones con firme rígidos, sino que los esfuerzos se encaminan al estudio de las distintas secciones de firme que incorporan mezclas bituminosas en su configuración, ya que son las más ampliamente utilizadas y las que han generado mejores prestaciones.

De acuerdo a estas consideraciones, las secciones que finalmente serán objeto de estudio quedan recogidas en la tabla 1.

- Tres secciones para la categoría de tráfico T00 (0031, 0032 y 0033).
- Tres secciones para la categoría de tráfico T0 (031, 032 y 033).
- Dos secciones correspondientes a la categoría de tráfico T1 (131 y 132).
- Dos secciones de categoría de tráfico T2 (231 y 232).

Dentro del desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida se ha realizado una descripción pormenorizada de cada una de las secciones y las distintas soluciones constructivas propuestas, más concretamente en el apartado *Definición de objetivos y ámbito de aplicación*, donde quedarán caracterizadas cada una de ellas.

La configuración de las secciones seleccionadas ha sido realizada bajo el asesoramiento y recomendaciones del equipo técnico de la empresa constructora PAVASAL E.C S.A (Pavasal.com 2015), ubicada en Valencia y con una experiencia de más de 60 años en la construcción de carreteras.

Todos los diseños han sido realizados teniendo en cuenta que irán soportados por una explanada de categoría E3, para las categorías de tráfico T00, T0, T1 y T2 y únicamente formados por mezclas bituminosas, dejando fuera del estudio los firmes rígidos.

**Tabla 1.** Secciones a estudiar. Fuente : Norma 6.1-IC

Categoría de tráfico	Sección
<b>T00</b>	
<b>T2</b>	

Con el fin de aumentar la versatilidad del estudio, cada una de las secciones estudiadas ha sido evaluada con dos configuraciones diferentes. Estas dos configuraciones se basan en la colocación de dos tipos de capa de rodadura diferente:

- BBTM 11 B 45/80-65
- PA 16 45/80-65

Esto representa un total de 10 secciones x 2 configuraciones/sección = 20 secciones evaluadas.

## Secciones evaluadas para tráfico T00

Dentro de las secciones seleccionadas para la categoría de tráfico T00, en la tabla 2 se muestran dos tipos de diseños diferentes para cada una de las secciones (0031, 0032 y 0033).

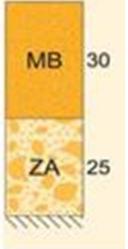
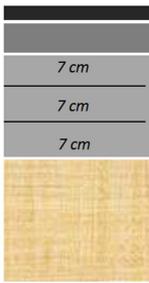
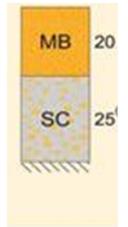
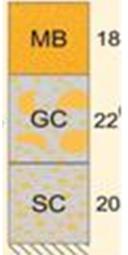
**Tabla 2.** Secciones a estudiar en categoría de tráfico T00. Fuente: Norma 6.1-IC y PAVASAL E.C.

CATEGORÍA DE TRÁFICO	SECCIÓN	CONFIGURACIÓN DE SECCIÓN	
T00	0031	<p><b>S0031 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm AC 22 35/50 BIN S 6 cm 8 cm AC 22 35/50 BASE G 9 cm 9 cm ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>	<p><b>S0031 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm AC 16 35/50 BIN S 5 cm 8 cm AC 22 35/50 BASE G 9 cm 9 cm ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>
	0032	<p><b>S0032 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm AC 22 35/50 BIN S 6 cm 8 cm AC 22 35/50 BASE G 8 cm SUELO CEMENTO 30 cm</p>	<p><b>S0032 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm AC 16 35/50 BIN S 5 cm 8 cm AC 22 35/50 BASE G 8 cm SUELO CEMENTO 30 cm</p>
	0033	<p><b>S0033 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm AC 22 35/50 BIN S 6 cm AC 32 35/50 BASE G 11 cm GRAVA CEMENTO 22 cm SUELO CEMENTO 25 cm</p>	<p><b>S0033 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm AC 16 35/50 BIN S 5 cm AC 32 35/50 BASE G 11 cm GRAVA CEMENTO 22 cm SUELO CEMENTO 25 cm</p>

## Secciones evaluadas para tráfico T0

Para la categoría de tráfico T0, y al igual que en el caso anterior, se describen dos tipos de diseño para cada una de las secciones a estudiar (031, 032 y 033), (tabla 3).

**Tabla 3.** Secciones a estudiar en categoría de tráfico T0. Fuente: Norma 6.1-IC y PAVASAL E.C.

CATEGORÍA DE TRÁFICO	SECCIÓN	CONFIGURACIÓN DE SECCIÓN	
T0	<p>031</p> 	<p><b>S031 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm</p> <p>AC 22 35/50 BIN S 6 cm</p> <p>7 cm</p> <p>AC 22 35/50 BASE G 7 cm</p> <p>7 cm</p> <p>21 cm</p> <p>ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p> 	<p><b>S031 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm</p> <p>AC 16 35/50 BIN S 5 cm</p> <p>7 cm</p> <p>AC 22 35/50 BASE G 7 cm</p> <p>7 cm</p> <p>21 cm</p> <p>ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p> 
	<p>032</p> 	<p><b>S032 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm</p> <p>AC 22 35/50 BIN S 6 cm</p> <p>AC 32 35/50 BASE G 11 cm</p> <p>SUELO CEMENTO 25 cm</p> 	<p><b>S032 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm</p> <p>AC 16 35/50 BIN S 5 cm</p> <p>AC 32 35/50 BASE G 11 cm</p> <p>SUELO CEMENTO 25 cm</p> 
	<p>033</p> 	<p><b>S033 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm</p> <p>AC 22 35/50 BIN S 6 cm</p> <p>AC 32 35/50 BASE G 9 cm</p> <p>GRAVA CEMENTO 22 cm</p> <p>SUELO CEMENTO 20 cm</p> 	<p><b>S033 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm</p> <p>AC 16 35/50 BIN S 5 cm</p> <p>AC 32 35/50 BASE G 9 cm</p> <p>GRAVA CEMENTO 22 cm</p> <p>SUELO CEMENTO 20 cm</p> 

## Secciones elegidas para tráfico T1 y T2

Para la categoría de tráfico T1 se definen dos diseños para dos tipos de sección (131 y 132), y para la categoría de tráfico T2 hay también dos diseños para las secciones 231 y 232 (tabla 4).

**Tabla 4.** Secciones a estudiar en categoría de tráfico T1 y T2. Fuente: Norma 6.1-IC y PAVASAL E.C.

CATEGORÍA DE TRÁFICO	SECCIÓN	CONFIGURACIÓN DE SECCIÓN	
T1	131	<p><b>S131 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm            AC 22 35/50 BIN S 6 cm            AC 22 35/50 BASE G 8 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 8 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>	<p><b>S131 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm            AC 16 35/50 BIN S 5 cm            AC 22 35/50 BASE G 8 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 8 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>
	132	<p><b>S132 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm            AC 22 35/50 BIN S 6 cm            AC 32 35/50 BASE G 11 cm            SUELO CEMENTO 20 cm</p>	<p><b>S132 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm            AC 16 35/50 BIN S 5 cm            AC 32 35/50 BASE G 11 cm            SUELO CEMENTO 20 cm</p>
T2	231	<p><b>S231 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm            AC 22 35/50 BIN S 6 cm            AC 32 35/50 BASE G 11 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>	<p><b>S231 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm            AC 16 35/50 BIN S 5 cm            AC 32 35/50 BASE G 11 cm            ZAHORRA ARTIFICIAL 25 cm</p>
	232	<p><b>S232 (a)</b></p> <p>BBTM 11 B 45/80-65 3 cm            AC 22 35/50 BIN S 6 cm            AC 32 35/50 BASE G 6 cm            SUELO CEMENTO 20 cm</p>	<p><b>S232 (b)</b></p> <p>PA 16 45/80-65 4 cm            AC 16 35/50 BIN S 5 cm            AC 32 35/50 BASE G 6 cm            SUELO CEMENTO 20 cm</p>

### Justificación de la selección de secciones de firme objeto de estudio

La selección de secciones y diseño de las mismas obedece a distintos propósitos. Por un lado, se pretende que distintas secciones de una misma categoría de tráfico puedan ser comparadas entre sí. Por otro lado, únicamente se han seleccionado secciones que contienen mezclas bituminosas y no firmes rígidos. Como se puede apreciar en las secciones escogidas para el

estudio, todas ellas han sido diseñadas por duplicado. Mientras la sub-base es igual para los dos casos, las secciones codificadas (a) implican una capa de rodadura tipo BBTM 11 B 45/80-65 de 3 cm de espesor, mientras que las secciones codificadas (b) en su codificación implican el uso de una mezcla drenante PA 16 45/80-65 de 4 cm de espesor. De esta forma, se podrán realizar comparaciones entre secciones equivalentes pero con distinta configuración debido al uso de un determinado tipo de capa de rodadura, se podrán comparar distintas secciones para una misma categoría de tráfico, o evaluar cómo varía el impacto ambiental de una sección en función del tipo de tráfico que soporta.

La elección de estas secciones permitirá desarrollar un estudio versátil, ya que se compararán distintas secciones para una misma categoría de tráfico, además de comparación entre categorías de tráfico; y equitativo, ya que en todos los casos se parte del mismo tipo de explanación, por lo que ésta no será un factor decisivo a la hora de realizar comparaciones.

El motivo por el que únicamente se han considerado categorías de tráfico T00, T0, T1 y T2, está basado en criterios estadísticos e históricos generados por el Ministerio de Fomento en cuanto a Intensidad Media Diaria de pesados (IMDp) en la Red de Carreteras del Estado. De acuerdo a los datos proporcionados a finales de 2014, la red de carreteras del estado soportaba los siguientes valores medios de intensidad de pesados (figura 1). La IMDp tanto para autopista libre y autovía (AU (2)), autopista de peaje (AP) y carretera convencional (CC) arrojan valores que quedan comprendidos en las cuatro categorías de tráfico seleccionadas.

En las autopistas libres y autovías, la IMDp media anual se establece en 3.062 pesados, (incluido en categoría de tráfico T0). Las autopistas de peaje con una media de 2.252 quedarían incluidas en esa misma categoría.

En las carreteras convencionales la media se establece en 544 pesados /día, incluido en la categoría T2. Teniendo en cuenta que autopistas y autovías están dimensionadas para tráficos elevados T00 y T0, y que las carreteras convencionales establecen una media de intensidad incluida en el horquilla correspondiente a la categoría de tráfico T2, se ha considerado oportuno realizar el estudio incluyendo las cuatro categorías de tráfico con mayor representación en la Red de Carreteras del Estado.

Mes	IMD (Veh/Día)			
	Total	AU (2)	AP	CC
<b>Ligeros</b>				
ENERO	8.342	16.574	10.397	2.814
FEBRERO	9.164	18.364	10.781	3.170
MARZO	9.379	18.434	11.530	3.316
ABRIL	10.710	20.473	14.678	3.882
MAYO	10.100	19.689	13.256	3.525
JUNIO	10.961	21.467	14.705	3.707
JULIO	12.297	23.922	18.426	3.920
AGOSTO	14.657	27.465	22.807	5.180
SEPTIEMBRE	11.339	22.424	14.925	3.750
OCTUBRE	10.076	19.568	13.092	3.587
NOVIEMBRE	9.486	18.727	11.711	3.294
DICIEMBRE	9.538	19.162	12.560	2.966
<b>TOTAL AÑO</b>	<b>10.514</b>	<b>20.537</b>	<b>14.100</b>	<b>3.595</b>
<b>Pesados</b>				
ENERO	1.419	2.760	2.141	450
FEBRERO	1.612	3.186	2.325	513
MARZO	1.530	2.971	2.293	491
ABRIL	1.633	3.215	2.339	516
MAYO	1.601	3.124	2.327	516
JUNIO	1.693	3.265	2.326	595
JULIO	1.712	3.238	2.354	641
AGOSTO	1.469	2.682	1.782	653
SEPTIEMBRE	1.678	3.212	2.189	624
OCTUBRE	1.687	3.210	2.378	609
NOVIEMBRE	1.590	3.103	2.365	504
DICIEMBRE	1.422	2.811	2.213	411
<b>TOTAL AÑO</b>	<b>1.586</b>	<b>3.062</b>	<b>2.252</b>	<b>544</b>

Figura 1. IMD en la Red de Carreteras del Estado (Fomento.gob.es 2015).



## CAPITULO 03.

# EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO HERRMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

El hilo conductor elegido para desarrollar este estudio es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Esta herramienta ambiental ha demostrado su validez a lo largo de muchos años y se ha convertido en un elemento muy valorado no sólo por los expertos en evaluación ambiental, sino también por las industrias como herramienta de toma de decisiones y estrategia de producto.

Debido a que el concepto del ACV está ampliamente extendido y es una herramienta consolidada en el ámbito del impacto ambiental, no es el propósito de este trabajo el realizar una valoración profunda de la misma. Pese a ello, en este capítulo se describe brevemente la metodología del ACV y las etapas que lo articulan.

### 3.1 El concepto de Análisis del Ciclo de Vida

El concepto del ACV ha ido evolucionando desde el desarrollo de los primeros estudios ambientales hasta la actualidad de manera gradual, en función de las necesidades o interés particulares de la época, hasta la concepción normalizada por la colección de normas ISO 14040 (UNE EN ISO 14040, 2006). De acuerdo a la SETAC (Setac.org, 2015), el Análisis del

Ciclo de Vida “es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental”.

El presente estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesado de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final (figura 2).

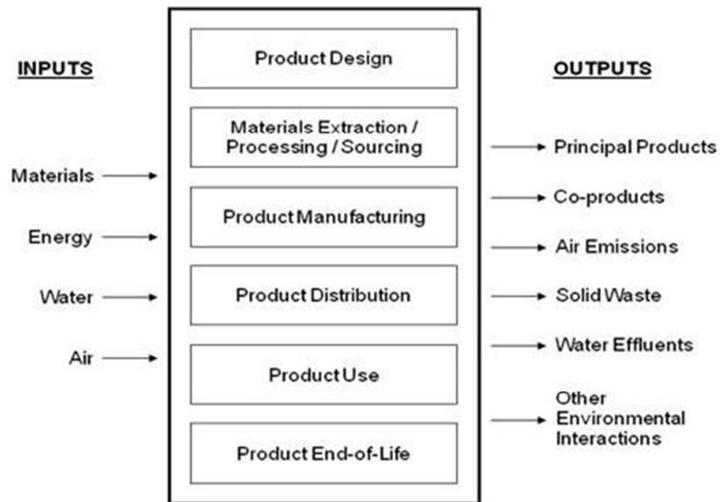


Figura 2. Esquema del ACV. Fuente: SETAC (1991).

La norma ISO 14040 establece que el Análisis del Ciclo de Vida “es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante: la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema; la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a estas entradas y salidas y la interpretación

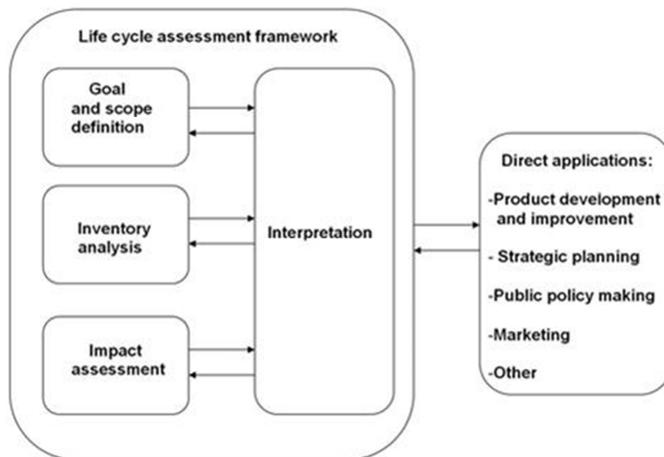


Figura 3. Esquema del ACV según ISO. Fuente: ISO 14040.

de los resultados de las fases de inventario y de impacto con relación a los objetivos del estudio” (figura 3).

La aplicación de esta herramienta ambiental supone un importante beneficio y una ventaja competitiva para el usuario de la misma, pudiéndose obtener, entre otras, las siguientes ventajas:

- Mejoras del comportamiento ambiental de producto a través de su diseño / rediseño.
- Benchmarking ambiental entre el producto propio y el de la competencia.
- Jerarquizar las etapas del ciclo de vida del producto en función de su impacto.
- Determinar el impacto global del ciclo de vida del producto.

- Identificar puntos de mejora, tales como reducción de emisiones, eficiencia energética, minimización de recursos, disminución de residuos generados, etc.
- Definir una estrategia de producto más amplia incorporando criterios ambientales.
- Aumentar la cantidad de información disponible del producto y su proceso.
- Incrementar la cantidad y calidad de información que se puede proporcionar al cliente.
- Incentivar la mejora continua del comportamiento ambiental del producto, proceso o servicio evaluado.

En definitiva, el ACV es una herramienta que proporciona un feedback muy valioso, y es por este motivo por el que se ha escogido para la realización del presente trabajo.

### 3.2 Metodología del ACV

De acuerdo a la norma, el ACV consta de cuatro etapas bien diferenciadas:

- Definición del objetivo y el alcance
- Fase de análisis de inventario
- Fase de evaluación del impacto ambiental
- Fase de interpretación

#### a) Definición de objetivo y alcance

En esta primera etapa de un ACV debe dar respuesta a una serie de cuestiones que determinarán la naturaleza del ACV y que constituyen el *objetivo*, tales como las razones que llevan a realizar el estudio, el público previsto y público objetivo o la aplicación prevista.

Por otro lado, dentro del *alcance* del ACV se definen una serie de criterios que marcarán el curso del ACV. Se debe proporcionar información del producto a estudiar, la función del mismo, cuáles son los límites del sistema y cuál va a ser la unidad funcional de estudio o cómo se asignarán las cargas ambientales. También debe especificarse qué categorías de impacto y metodología van a ser usadas, se valorará qué tipo de datos se van a utilizar y cuál es la calidad de los mismos, o cuáles son las limitaciones e hipótesis que se llevarán a cabo. Toda esta información será determinante a la hora de disponer un estudio bien estructurado, trazable y transparente.

Dentro de esta primera etapa cobra especial importancia el término *Unidad Funcional (UF)*. Éste queda definido como el desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia a la cual se relaciona las entradas y salidas.

Por otro lado, los *Límites del Sistema* definen los procesos a incluir en el sistema, en función de los objetivos del estudio.

### **b) Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)**

En esta etapa se recopilan los datos y procedimientos de cálculo que darán lugar a la cuantificación de las entradas y salidas del sistema. Dentro de los datos recopilados se puede hacer referencia a:

- Entradas de energía, materias primas u otro tipo de entradas,
- Generación de productos, co-productos, subproductos o residuos,
- Emisiones al aire, suelo y agua.

Estos datos deberán ser validados y documentados, determinando su origen y fecha de adquisición, para garantizar la trazabilidad de los mismos. Todos los cálculos necesarios para su vinculación a la unidad funcional deberán también estar justificados.

### **c) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**

La tercera etapa del ACV se encarga de determinar la cuantía del impacto asociado a los datos recopilados en la fase de inventario del ciclo de vida. Los datos de inventario quedarán relacionados con las categorías de impacto seleccionadas en el estudio y con sus correspondientes indicadores. Por tanto, la secuencia que la norma exige para esta etapa incluye la selección de categorías de impacto y modelos de caracterización, la asignación de los resultados del inventario del ciclo de vida y el correspondiente cálculo de resultados de indicador de categoría. Estos pasos terminan en los resultados del indicador de categoría y los correspondientes resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida.

En esta tarea también pueden llevarse a cabo los denominados análisis de gravedad, de incertidumbre y de sensibilidad, que pueden ayudar a incorporar más información al estudio y un mayor conocimiento del sistema que se está evaluando, permitiendo ver cómo evolucionan los cálculos en función de las incertidumbres o cómo un determinado elemento del estudio puede convertirse en determinante o no en función de la fuente seleccionada.

### **d) Interpretación del Ciclo de Vida**

En esta fase se extraen todos los resultados derivados de las dos etapas anteriores, y que puedan proporcionar conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones en lo relativo a estrategia de producto. En esta etapa se verifica la adecuación de las categorías de impacto seleccionadas en función de los resultados obtenidos, permitiendo identificar los impactos más significativos, obtener conclusiones y perfilar posibilidades de actuación para la mejora global del comportamiento ambiental del producto, proceso o servicio estudiado. Se requiere también una revisión crítica por parte de un agente externo al estudio.



## CAPITULO 04.

# OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

En este capítulo, se describen las características del estudio para cada una de las partes que integran esta primera etapa de la metodología del ACV: el **Objetivo** del estudio realizado y el **Alcance** del Análisis del Ciclo de Vida.

### 4.1 Objetivo del estudio

#### **Aplicación prevista**

El presente trabajo y sus resultados pretenden ser un documento de consulta para obtener información ambiental acerca de las secciones de firme, y más concretamente de su comportamiento ambiental a lo largo de su ciclo de vida.

#### **Razones para realizar el estudio**

Dentro de los elementos que componen la carretera, las secciones de firme tienen una importancia fundamental ya que son el elemento principal de la misma, encargadas de soportar el tráfico, convirtiéndose en el punto de unión más inmediato entre el usuario y la infraestructura.

## **Público previsto**

La realización de este estudio y los resultados que de él se obtengan pretenden aportar información acerca del comportamiento ambiental de las secciones de firme, aplicando la herramienta ambiental del Análisis del Ciclo de Vida, por lo que puede resultar de interés en los siguientes ámbitos:

- Profesionales en el sector de la construcción de infraestructuras,
- Administraciones Públicas
- Comunidad científica
- Expertos ambientales
- Asociaciones y plataformas
- Público en general

Como se puede apreciar, el presente trabajo tiene la ambición, siempre desde la humildad con la que se ha realizado, de proporcionar información tanto a nivel científico como divulgativo, en el sector de la carretera.

## **4.2 Alcance del estudio**

### **Sistema de producto a estudiar**

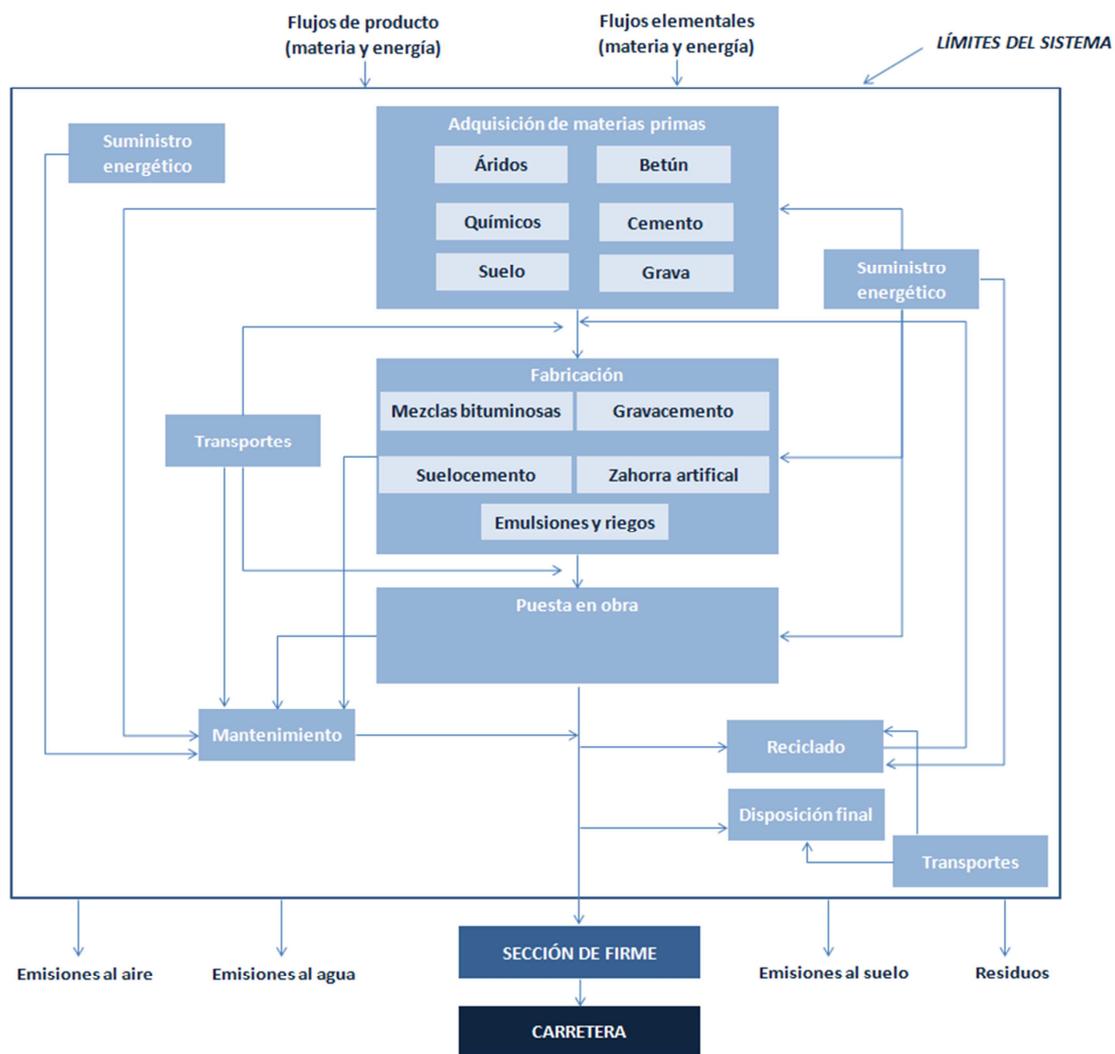
El sistema producto se define como el conjunto de flujos elementales y flujos de producto, que desempeñan una o más funciones, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.

Este esquema facilita la identificación de las entradas y salidas del sistema producto. El sistema producto a estudiar se denomina **Sección de firme**, y queda definido por la figura 4. El esquema presentado en la figura representa el sistema producto, en el que quedan contenidos diversos procesos unitarios que serán descritos más adelante, dando como producto final la sección de firme, objeto del estudio, que no deja de ser un elemento más de un sistema producto de más envergadura al que se denominaría carretera.

### **Funciones del sistema producto**

Las secciones de firme son un conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, que están ubicados sobre la explanada y cuya funcionalidad es soportar las cargas del tráfico, permitiendo la circulación de los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad. Además:

- La estructura debe ser de carácter permanente bajo las cargas repetidas del tráfico a lo largo de la vida útil o periodo de proyecto.
- Repartir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de manera que a la explanada llegue una mínima parte de éstas.
- Proteger la explanada de la intemperie, y sobre todo de la acción del agua, heladas y deshielo.



**Figura 4.** Sistema producto objeto de estudio. Fuente: *Elaboración propia.*

### La unidad funcional

El ACV es una herramienta compleja que se estructura en varias etapas que deben quedar perfectamente detalladas y cuya transparencia pueda permitir una trazabilidad total con respecto a las consideraciones e hipótesis tomadas en el marco del estudio. Por estos motivos, es crucial justificar los criterios de comparación seleccionados, con la intención de especificar una unidad funcional útil, real y que proporcione datos robustos.

A modo de ejemplo, el hecho de que dentro de una misma categoría de tráfico se comparen dos tipos de secciones, una con base granular y otra con base que utiliza cemento como aglomerante, implica la comparación de dos secciones de firme que presentan distintas propiedades físicas y mecánicas, por lo que desde un punto de vista se podría pensar que no debería poder compararse directamente sin asignar previamente algún coeficiente o factor de compensación que recogiera esa diferencia de propiedades mecánicas. Pero por otro lado, las

dos secciones dan cumplimiento a las especificaciones que solicita una determinada categoría de tráfico, por lo que estarían incluidas dentro de un mismo *grupo de productos*, con funcionalidad equivalente, por lo que serían comparables de forma directa. Esta doble lectura hace que deba plantearse una reflexión acerca de los criterios de comparación a utilizar, justificando y detallando de manera clara y exhaustiva las decisiones tomadas. Teniendo estos factores en cuenta, se ha decidido plantear una duda razonable en el estudio y establecer tres criterios de comparación distintos, que proporcionarán distinta información para su posterior evaluación:

- Criterio 1. Basado en funcionalidad
- Criterio 2. Basado en prestaciones
- Criterio 3. Basado en balance diseño y prestaciones

A continuación se describe cada uno de ellos, encaminados a definir la Unidad Funcional:

**a) Criterio 1. Criterio de comparación basado en funcionalidad.**

En este caso, se acepta que cualquier tipo de sección incluida en cada una de las categorías de tráfico seleccionadas (T00 a T2) es capaz de proporcionar el servicio requerido, es decir, soportar con garantías el tráfico previsto, por lo que, independientemente de su estructura y diseño, podrían ser comparadas entre ellas. Según este criterio, *la unidad funcional será 1 m<sup>2</sup> cuadrado de sección*.

**b) Criterio 2. Criterio de comparación basado en prestaciones.**

Este criterio de comparación es sin duda más complejo que el anterior. En este caso deben justificarse diferencias mecánicas y de prestaciones de distintas secciones de una misma categoría de tráfico.

Con el fin de abordar esta cuestión, este trabajo se ha apoyado en el estudio realizado por Carlos Kraemer (Universidad Politécnica de Valencia) y Raúl Albelda (INTEVIA) titulado “*Evaluación técnico económica de las secciones de firme de la norma 6.1 IC*” (Kraemer & Albelda 2004), presentado en el VI Congreso Nacional de Firmes celebrado en León en mayo de 2004. Dicho trabajo expone de forma resumida la metodología y los resultados obtenidos en la evaluación técnica y económica de estas secciones.

Este estudio determinó en primer lugar el tráfico equivalente de proyecto **TEP**:

Es el Tráfico Equivalente de Proyecto exigido (TEP) a las secciones en función de cada tipología de firme y categoría de tráfico, y se expresa como el número de ejes tipo que solicitarán el firme durante el periodo de proyecto considerado. Se adopta como eje tipo de carga representativo del tráfico de pesados el eje simple con ruedas gemelas de 13 toneladas (130 kN), equitativamente repartida entre las cuatro ruedas, con una presión de contacto de 0,8 MPa, radio de huella 11,35 cm y distancia entre centros de las ruedas gemelas de 37,5 cm. Se obtiene a través de la ecuación [1]:

$$TEP = IMD_p \cdot CE \cdot 365 \cdot F \cdot \gamma_t \quad [1]$$

- **IMD<sub>p</sub> (τ)** Es un valor relativamente conservador que permite trabajar con un único parámetro por categoría en lugar de trabajar con intervalos de tráfico pesado. Este valor es 7.000 para la categoría de tráfico T00, mientras que para el resto de categorías (T0, T1 y T2) se calcula mediante la siguiente ecuación [2]:

$$\frac{\log_{10}\tau}{\log_{10}IMD_{pmax}} = 0,99 \quad [2]$$

- **CE** Es el Coeficiente de equivalencia medio de los vehículos pesados. Para los firmes flexibles y semiflexibles toma un valor de 0,5, mientras que para los semirrígidos es 0,6.
- **F** Es el factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados [3]:

$$F = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad [3]$$

Donde *r* es la tasa de crecimiento de tráfico de vehículos pesados (3 %) y *n* es el periodo de proyecto del firme en años (20 años).

- **γ<sub>t</sub>** Es el coeficiente de seguridad en cargas. Para tráfico T0 el valor es de 1,18, para T0 y T1 es 1,15 y para T2 el valor del coeficiente es 1,12.

Posteriormente se calculó el **Número de ejes tipo calculados, N** a partir de las leyes de fatiga y se calculó también el **Equivalente en años (n)**, que es el periodo de tiempo que satisface la ecuación anterior cuando en lugar del tráfico equivalente del proyecto TEP se calcula con el número de ejes tipo calculados N.

### c) Criterio 3. Basado en balance diseño y prestaciones.

En este caso, se realizó el cálculo del **estimador k**, que es la relación que analiza el grado de adecuación entre la vida de servicio calculada y la esperada por su categoría de tráfico.

$$K = \frac{\log_{10} N}{\log_{10} TEP} \quad [4]$$

Todos estos valores aparecen recogidos en la tabla 5 para cada una de las secciones estudiadas.

**Tabla 5.** Parámetros importantes en el cálculo de secciones de firme. Fuente (Kraemer & Albelda 2004).

PARÁMETROS		T00			T0			T1		T2		
		0031	0032	0033	031	032	033	131	132	231	232	
<b>Criterio 1</b>	<b>Funcionalidad</b>	m <sup>2</sup> sección	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Criterio 2</b>	<b>Prestaciones</b>	N (x 10 <sup>6</sup> )	89	2.021	4.430	46	117	2.799	19	14	8	1,6
		Equivalente en años	34	120	145	34	53	152	30	22	32	8
<b>Criterio 3</b>	<b>Balance</b>	K	1,04	1,21	1,25	1,05	1,09	1,28	1,04	1,01	1,04	0,92

El presente trabajo establecerá los resultados de manera general por metro cuadrado de sección, pero se realizarán valoraciones y comparaciones utilizando el resto de criterios, con el fin de determinar la importancia que tiene la selección de la unidad funcional en el estudio. Los factores de conversión para pasar de metro cuadrado a las distintas unidades funcionales serán los inversos de los resultados obtenidos en la tabla 5.

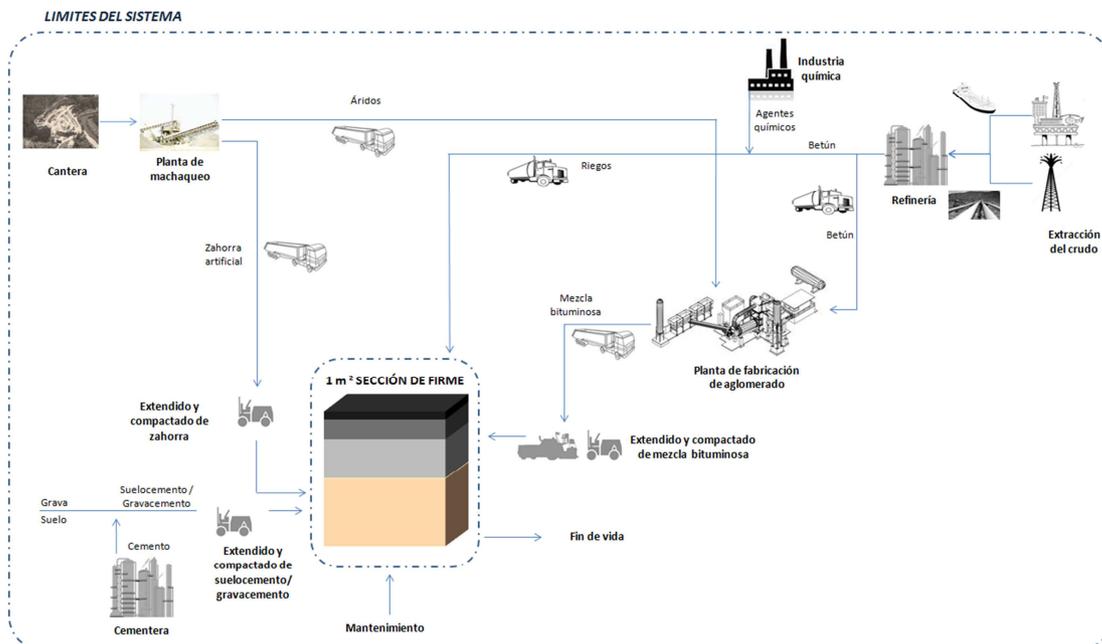
Las etapas del ciclo de vida que entran a formar parte de la unidad funcional son:

- Extracción y adquisición de materias primas,
- Transportes de las materias primas,
- Procesos de fabricación,
- Distribución hasta la obra,
- Puesta en obra,
- Operaciones de mantenimiento en el periodo de proyecto,

En la interpretación de los resultados se hará hincapié en lo que respecta al tipo de unidad funcional seleccionada.

### Los límites del sistema

Los límites del sistema quedan definidos de acuerdo al esquema representado en la figura 5, en la que se puede apreciar como todas las etapas del ciclo de vida del firme quedan incluidas, siendo éstas descritas y definidas en posteriores apartados de este trabajo.



**Figura 5.** Límites del sistema y esquema de sección de firme. Fuente: *Elaboración propia.*

Quedarán incluidas por tanto las labores de obtención de materias primas, los transportes de dichos materiales bien a planta de producción o la propia obra, la fabricación de los materiales

constituyentes de la sección, la distribución de estos hasta la obra, la fase de construcción y puesta en obra de los mismos, las operaciones de mantenimiento para un horizonte temporal de 30 años y los posibles escenarios de fin de vida.

### **Los criterios de interpretación**

La sección de firme será evaluada desde el punto de vista funcional y de prestaciones, por lo que la interpretación de los resultados del estudio quedará ligada al criterio de unidad funcional.

### **Las suposiciones**

A lo largo de la realización de este estudio, se perseguirá por todos los medios obtener un grado de confianza muy elevado en lo que a la obtención de datos se refiere. En caso de que no sea posible establecer una aseveración con un grado de confianza de suficiente calidad, se recurrirá, en último caso, a la realización de suposiciones,

### **Las limitaciones**

En cada una de las etapas del ciclo de vida se establecerán las limitaciones asociadas al presente estudio. Estas limitaciones pueden tener diversos orígenes:

- La dificultad de establecer valores comparables,
- Carencia de datos fiables en el inventario
- Deslocalización en términos geográficos
- Obtención de datos en la modalidad “caja negra”, y que no permiten trazabilidad

### **Los requisitos de la calidad de los datos**

A continuación se detallan los requisitos en lo que se refiere a la calidad de los datos utilizados para el inventario:

- Se elegirán preferiblemente datos reales,
- Se evaluará la precisión del dato, es decir, la reproducibilidad del mismo a lo largo de un periodo temporal representativo, ,
- Se priorizará el uso de datos relativamente actuales,
- Se utilizarán datos del entorno geográfico objeto de estudio,
- Se utilizarán datos que hagan referencia a las tecnologías más habituales,
- Contrastada fiabilidad de la fuente de los datos,
- Los datos deberán ser representativos.



## CAPITULO 05.

# INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Como se ha comentado en el capítulo anterior de este trabajo, se aprovecharán las distintas partes de la sección de firme con el fin de facilitar el inventario del ciclo de vida. Este hecho implica que se realizará una recopilación de datos de acuerdo los distintos componentes de la sección de firme.

Estos componentes se enumerarán de forma ascendente, y a partir de ahora serán considerados “subsistemas unitarios” de la sección de firme. Esta consideración tiene como consecuencia que la sección de firme quedará dividida en los siguientes subsistemas:

- a) Capa sub-base.
- b) Riego sobre la capa sub-base.
- c) Capa base y riego inter-capa en caso de puesta en obra en sucesivas tongadas de la capa base.
- d) Riego sobre la capa base.
- e) Capa intermedia y riego inter-capa en caso de puesta en obra en sucesivas tongadas de la capa intermedia.
- f) Riego sobre capa intermedia.
- g) Capa de rodadura.

Para cada uno de los subsistemas se realizará una evaluación de todo el ciclo de vida, incluyendo todas sus etapas, siendo el resultado final de la evaluación de las secciones de firme la suma de las contribuciones de cada uno de estos subsistemas.

La figura 6 muestra, de acuerdo al esquema de numeración anterior, los “subsistemas” en las secciones de firme objeto de estudio



**Figura 6.** Esquema de sección de firme dividida por subsistemas. Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los subsistemas descritos anteriormente estará a su vez dividido en las distintas etapas con conforman el ciclo de vida de la sección de firme.

Mediante la figura 7, se muestra como utilizando una matriz de dos entradas se pueden establecer correlaciones entre cada uno de los subsistemas de la sección de firme y las etapas del ciclo de vida.



**Figura 7.** Matriz de doble entrada que correlaciona los subsistemas y las etapas del ciclo de vida. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se recogen los códigos utilizados para la denominación de la figura anterior:

**Tabla 6.** Codificación de etapas del ciclo de vida y subsistemas. Fuente: Elaboración propia.

Codificación etapas del ciclo de vida		Codificación de subsistemas de la sección de firme	
MP	Materias primas	CR	Capa de rodadura
TMP	Transporte de materias primas	R(I-R)	Riego entre intermedia y rodadura
F	Fabricación	CI	Capa intermedia
D	Distribución	R(B-I)	Riego entre base e intermedia
PEO	Puesta en obra	CB	Capa base
MT	Mantenimiento	R(S-B)	Riego entre sub-base y base
FVD	Fin de vida	CS	Capa sub-base

De esta forma queda definido cómo se realizará el inventario. Las aportaciones al inventario serán obtenidas mediante las contribuciones parciales de cada uno de los subsistemas de la sección de firme, evaluadas para cada una de las etapas del ciclo de vida. Hasta la puesta en obra se realizará de manera individual, mientras que las etapas de mantenimiento y fin de vida serán evaluadas e inventariadas de manera global.

$$\text{Inventario} = \sum_{\text{Materias primas}}^{\text{Puesta en obra}} \text{Subsistema}_i + \text{Mantenimiento} + \text{Fin de vida}$$

A modo de ejemplo, el apartado R (I-R) \_PEO implica que se está estudiando el subsistema *Riego entre las capas Intermedia y de Rodadura*, dentro de la etapa del ciclo de vida de *Puesta en obra*. Con esta codificación queda perfectamente determinado cómo se llevará a cabo el inventario, de manera que se simplifique el proceso de recolección de datos y la visualización por parte del lector.

En los siguientes apartados se realizará un inventario de datos recopilado a partir de datos proporcionados por empresas y datos recogidos en el PG-3.

Esta forma de realizar el inventario proporciona varias ventajas que a continuación se detallan:

- Por un lado la codificación de los apartados permite una más fácil recolección de datos y una mayor trazabilidad de los mismos
- Una vez se obtengan los resultados de la evaluación ambiental de la sección de firme seleccionada, será posible realizar un cómputo del resultado ambiental bien basado en el subsistema estudiado (acudiendo a todos los apartados que comiencen por la misma codificación), o bien por etapa del ciclo de vida (acudiendo a todos los apartados que terminen por la misma codificación).
- Este esquema permitirá adquirir un nivel de detalle muy elevado, siendo capaces de determinar los aspectos determinantes con un grado de precisión muy elevada, evitando de esta manera las comúnmente utilizadas “cajas negras”, en las que no es posible determinar qué elemento del subsistema estudiado es el más relevante.
- Se podrá diferenciar en lo relativo a impactos ambientales desde el punto de vista estructural, determinando qué capa presenta mayor carga ambiental; o desde el punto de vista de la etapa del ciclo de vida que represente mayor carga, de forma que será posible establecer una jerarquización de un detalle muy elevado, lo que permitirá posteriormente sugerir en qué puntos de la sección de firme puede ser más interesante aplicar mejoras o focalizar estudios para incrementar la sostenibilidad del proceso.

A continuación quedan reflejados los inventarios para cada una de las etapas consideradas:

- Materias primas (tabla 7)
- Transporte de materias primas (tabla 8)
- Fabricación (tabla 9)
- Distribución (tabla 10)
- Puesta en obra (tabla 11)
- Conservación y mantenimiento (figura 9)

**Tabla 7.** Inventario etapa materias primas

	T00						T0						T1				T2			
Término	0031a	0031b	0032a	0032b	0033a	0033b	031a	031b	032a	032b	033a	033b	131a	131b	132a	132b	231a	231b	232a	232b
Capa de rodadura	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)	0,060 t BBTM (3 cm)	0,077 t PA (4 cm)
Riego (intermedia-rodadura)	0,44 kg Riego adherencia																			
Capa intermedia	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)	0,147 t AC22 BIN S (6 cm)	0,118 t AC16 BIN S (5 cm)
Riego (base-intermedia)	0,35 kg Riego adherencia																			
Capa base	0,616 t AC 22 BASE G (26 cm)+ 0,70 kg Riego adherencia		0,379 t AC 22 BASE G (16 cm) + 0,35 kg Riego adherencia		0,264 t AC 32 BASE G (11 cm)		0,498 t AC22 BASE G (21 cm) + 0,70 kg Riego adherencia		0,264 t AC32 BASE G (11 cm)		0,216 t AC32 BASE G (9 cm)		0,379 t AC 22 BASE G (16 cm)		0,264 t AC 32 BASE G (11 cm)		0,264 t AC 32 BASE G (11 cm)		0,144 t AC 32 BASE G (6 cm)	
Riego (sub-base-base)	1,1 kg Riego imprimación		0,5 kg Riego de curado				1,1 kg Riego imprimación		0,5 kg Riego de curado				1,1 kg Riego imprimación		0,5 kg Riego de curado		1,1 kg Riego imprimación		0,5 kg Riego de curado	
Sub-base	0,578 t ZA (25 cm)		0,6616 t SC (30 cm)		0,551 t SC (25 cm) + 0,497 t GC (22 cm)		0,578 t ZA (25 cm)		0,551 t SC (25 cm)		0,441 t SC (20 cm) + 0,497 t GC (22 cm)		0,578 t ZA (25 cm)		0,441 t SC (20 cm)		0,578 t ZA (25 cm)		0,441 t SC (20 cm)	
<p><b>BBTM:</b> Mezcla asfáltica BBTM 11 B 45/80-65, <b>PA:</b> Mezcla asfáltica PA 16 45/80-65, <b>AC22 BIN S:</b> Mezcla asfáltica AC 22 35/50 BIN S, <b>AC16 BIN S:</b> Mezcla asfáltica AC 16 35/50 BIN S, <b>AC 22 BASE G:</b> Mezcla asfáltica AC 22 35/50 BASE G, <b>AC 32 BASE G:</b> Mezcla asfáltica AC 32 35/50 BASE G, <b>ZA:</b> Zahorra artificial, <b>SC:</b> Suelo-cemento, <b>GC:</b> Grava-cemento</p>																				

**Tabla 8.** Inventario transporte de materias primas

	T00						T0						T1				T2			
Término	0031a	0031b	0032a	0032b	0033a	0033b	031a	031b	032a	032b	033a	033b	131a	131b	132a	132b	231a	231b	232a	232b
Capa de rodadura (tkm)	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126	13,156	19,126
Riego (intermedia-rodadura) (tkm)	0,026																			
Capa intermedia (tkm)	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963	4,943	3,963
Riego (base-intermedia) (tkm)	0,017																			
Capa base (tkm)	20,375		12,534		8,673		16,463		8,673		7,096		12,534		8,672		8,672		4,730	
Riego (sub-base-base) (tkm)	0,040		0,026				0,044		0,026				0,044		0,026		0,044		0,026	
Sub-base (tkm)	-		18,455		29,203		-		15,380		25,929		-		12,303		-		12,303	

**tkm:** tonelada x kilómetro (expresión utilizada para cuantificar los transportes)

**Tabla 9.** Inventario procesos de fabricación

	T00						T0						T1				T2			
Término	0031a	0031b	0032a	0032b	0033a	0033b	031a	031b	032a	032b	033a	033b	131a	131b	132a	132b	231a	231b	232a	232b
Capa de rodadura (tkm)	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,2 kWh 0,4 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil	0,3 kWh 0,5 m <sup>3</sup> GN 0,02 L gasoil
Riego (intermedia-rodadura) (tkm)	3,9E-04 kWh, 8,00E-05 L gasoil																			
Capa intermedia (tkm)	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	0,3 kWh 0,7 m <sup>3</sup> GN 0,03 L gasoil	0,4 kWh 0,9 m <sup>3</sup> GN 0,04 L gasoil	
Riego (base-intermedia) (tkm)	3,1E-04 kWh, 6,00E-05 L gasoil																			
Capa base	2,5 kWh 3,69 m3GN 0,13 L gasoil		1,54 kWh 2,27 m3GN 0,08 L gasoil		1,07 kWh 1,58 m3GN 0,08 L gasoil		2,02 kWh 2,98 m3GN 0,11 L gasoil		1,07 kWh 1,58 m3GN 0,06 L gasoil		0,87 kWh 1,29 m3GN 0,05 L gasoil		1,05 kWh 2,27 m3GN 0,08 L gasoil		0,73 kWh 1,58 m3GN 0,06 L gasoil		0,73 kWh 1,58 m3GN 0,06 L gasoil		0,40 kWh 0,86 m3GN 0,03 L gasoil	
Riego (sub-base-base)	9,8E-04 kWh 2,1E-04 L gasoil		4,60E-04 kWh 8E-05 L gasoil				9,8E-04 kWh 2,1E-04 L gasoil		4,60E-04 kWh 8E-05 L gasoil				9,8E-04 kWh 2,1E-04 L gasoil		4,60E-04 kWh 8E-05 L gasoil		9,8E-04 kWh 2,1E-04 L gasoil		4,60E-04 kWh 8E-05 L gasoil	
Sub-base	-		0,066 kWh		0,1051 kWh 8E-05 L gasoil		-		0,051kWh		0,093 kWh 8E-05 L gasoil		-		0,044 kWh		-		0,044 kWh	

**Tabla 10.** Inventario distribución.

	T00						T0						T1				T2			
Término	0031a	0031b	0032a	0032b	0033a	0033b	031a	031b	032a	032b	033a	033b	131a	131b	132a	132b	231a	231b	232a	232b
Capa de rodadura (tkm)	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892	2,254	2,892
Riego (intermedia-rodadura) (tkm)	0,017																			
Capa intermedia (tkm)	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419	5,512	4,419
Riego (base-intermedia) (tkm)	0,013																			
Capa base (tkm)	23,145		14,239		9,904		18,698		9,904		8,103		14,240		9,904		9,904		5,403	
Riego (sub-base-base) (tkm)	0,042		0,020				0,042		0,020				0,042		0,020		0,042		0,020	
Sub-base (tkm)	17,340		19,845		31,459		17,340		16,537		28,151		17,340		13,230		17,340		13,230	
<b>tkm:</b> tonelada x kilómetro (expresión utilizada para cuantificar los transportes)																				

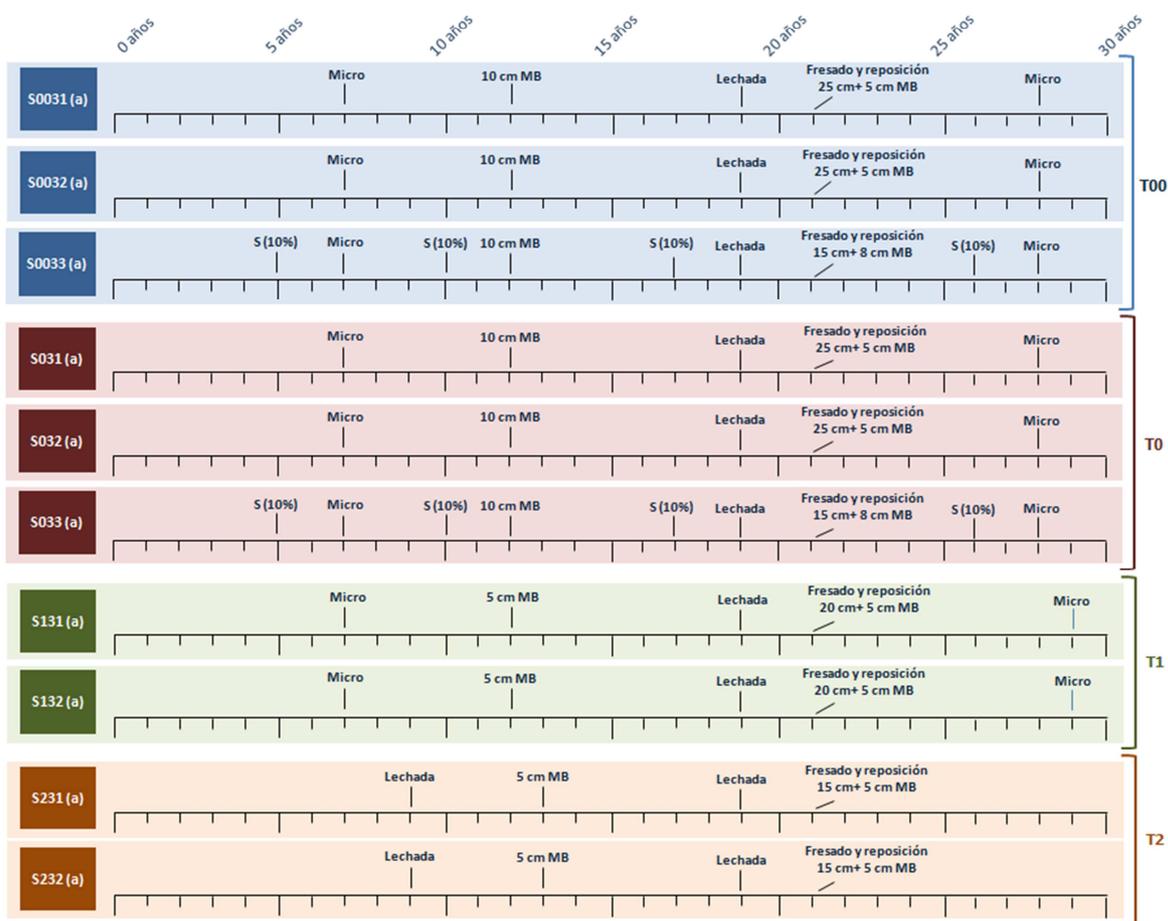
**Tabla 11.** Inventario puesta en obra.

	T00						T0						T1				T2			
Término	0031a	0031b	0032a	0032b	0033a	0033b	031a	031b	032a	032b	033a	033b	131a	131b	132a	132b	231a	231b	232a	232b
Capa de rodadura (tkm)	0,078 L diesel	0,080 L diesel																		
Riego (intermedia-rodadura) (tkm)	0,004 L diesel																			
Capa intermedia (tkm)	0,086 L diesel	0,083 L diesel																		
Riego (base-intermedia) (tkm)	0,004 L diesel																			
Capa base (tkm)	0,279 L diesel		0,182 L diesel		0,099 L diesel		0,266 L diesel		0,099 L diesel		0,094 L diesel		0,183 L diesel		0,099 L diesel		0,099 L diesel		0,086 L diesel	
Riego (sub-base-base) (tkm)	0,004 L diesel																			
Sub-base (tkm)	0,066 L diesel		0,164 L diesel		0,275 L diesel		0,066 L diesel		0,138 L diesel		0,254 L diesel		0,066 L diesel		0,114 L diesel		0,066 L diesel		0,114 L diesel	

En lo que respecta a la **conservación y mantenimiento**, es relativamente poco frecuente encontrar una guía de las operaciones de conservación para las distintas secciones de firme. La etapa de conservación puede ser muy variable en función de múltiples factores que pueden escapar del alcance del proyectista. Pese a ello, se ha identificado un documento de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía 2007) donde se recogen diversos escenarios de conservación en función del tipo de tráfico que soporta la sección y el diseño de la misma.

Es necesario dejar claro que este esquema de mantenimiento se ajusta a las indicaciones expresadas en el documento proporcionado por la Junta de Andalucía, y que no puede diferir de las actuaciones reales que se realizan en los pavimentos españoles. Pese a ello, es la única referencia o recomendación respaldada por una Administración Pública, por lo que es la que se ha tenido en cuenta en este estudio.

### OPERACIONES DE MANTENIMIENTO PARA LAS SECCIONES ESTUDIADAS (Capas de rodadura BBTM)



**Figura 8.** Esquema de mantenimiento para secciones con capa de rodadura BBTM (Secciones tipo a). Fuente: Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía 2007.

Los impactos ambientales asociados al fin de vida de la sección no serán tenidos en cuenta en este estudio, debido a que las carreteras son estructuras que se conservan y refuerzan de manera continua, prolongado su vida útil de manera indefinida.



## CAPITULO 06.

# IMPACTO AMBIENTAL DE LAS SECCIONES

En la Tesis que da origen a este trabajo se han estudiado y cuantificado los siguientes indicadores:

- Calentamiento global
- Consumo de agua
- Eutrofización
- Acidificación
- Oxidación fotoquímica
- Demanda acumulada de energía
- ReciPe

Para el resumen que se presenta únicamente van a valorarse los indicadores de calentamiento global y de consumo de agua, por ser dos de los indicadores más punteros, objetivos, y comúnmente utilizados a la hora de valorar ambientalmente el impacto de un producto, proceso o servicio. Para la evaluación ambiental se ha utilizado el software SimaPro (Pre-sustainability.com 2015) y la base de datos Ecoinvent (Wernet et al. 2016).

## 6.1 Calentamiento global

En la tabla 12 quedan representados los impactos ambientales por etapa del ciclo de vida, desde la etapa de extracción de materias primas hasta la puesta en obra de la sección de firme, expresados en emisiones kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> sección

**Tabla 12.** Emisiones de gases de efecto invernadero por etapa del ciclo de vida. kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> sección.

kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup>	Materias primas	Transporte de materias primas	Fabricación	Distribución	Puesta en obra	TOTAL	
<b>T00</b>	<b>0031a</b>	18,90	6,96	15,20	8,95	2,08	<b>52,09</b>
	<b>0031b</b>	18,70	7,90	15,00	8,86	2,08	<b>52,54</b>
	<b>0032a</b>	30,60	8,97	10,90	7,75	2,06	<b>60,28</b>
	<b>0032b</b>	30,40	9,91	10,60	7,67	2,06	<b>60,64</b>
	<b>0033a</b>	40,80	10,40	8,76	9,10	2,17	<b>71,23</b>
	<b>0033b</b>	40,70	11,30	8,54	9,01	2,17	<b>71,72</b>
<b>T0</b>	<b>031a</b>	16,70	6,27	13,00	8,13	2,03	<b>46,13</b>
	<b>031b</b>	16,50	7,20	12,80	8,04	2,03	<b>46,57</b>
	<b>032a</b>	25,10	7,71	8,73	6,11	1,63	<b>49,28</b>
	<b>032b</b>	24,90	8,65	8,51	6,02	1,62	<b>49,70</b>
	<b>033a</b>	37,00	9,49	7,87	8,16	2,15	<b>64,67</b>
	<b>033b</b>	36,90	10,40	7,65	8,07	2,15	<b>65,17</b>
<b>T1</b>	<b>131a</b>	14,30	5,56	10,80	7,30	1,68	<b>39,64</b>
	<b>131b</b>	14,10	6,49	10,60	7,21	1,68	<b>40,08</b>
	<b>132a</b>	22,20	7,11	8,73	5,73	1,56	<b>45,33</b>
	<b>132b</b>	22,00	8,04	8,51	5,64	1,56	<b>45,75</b>
<b>T2</b>	<b>231a</b>	11,80	4,87	8,71	6,49	1,34	<b>33,21</b>
	<b>231b</b>	11,60	5,81	8,48	6,41	1,34	<b>33,64</b>
	<b>232a</b>	20,00	6,40	5,97	4,90	1,51	<b>38,78</b>
	<b>232b</b>	19,90	7,34	5,74	4,81	1,50	<b>39,29</b>

Los mismos resultados, expresados en esta ocasión por elemento constructivo de la sección quedan recogidos en la tabla 13.

De esta forma, la sección queda perfectamente evaluada desde ambos puntos de vista. Por un lado, desde el punto de vista de la etapa del ciclo de vida evaluada, pero también en función del elemento constructivo que constituye la sección.

**Tabla 13.** Emisiones de gases de efecto invernadero por elemento constructivo. kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> sección.

kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup>	CR	R(I-R)	CI	R(B-I)	CB	R(S-B)	CS	TOTAL	
<b>T00</b>	<b>0031a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	3,23E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>52,09</b>
	<b>0031b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	3,23E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>52,54</b>
	<b>0032a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,98E+01	2,93E-01	2,55E+01	<b>60,28</b>
	<b>0032b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,98E+01	2,93E-01	2,55E+01	<b>60,64</b>
	<b>0033a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	4,30E+01	<b>71,23</b>
	<b>0033b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	4,30E+01	<b>71,72</b>
<b>T0</b>	<b>031a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	2,63E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>46,13</b>
	<b>031b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	2,63E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>46,57</b>
	<b>032a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	2,11E+01	<b>49,28</b>
	<b>032b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	2,11E+01	<b>49,70</b>
	<b>033a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,10E+01	2,93E-01	3,88E+01	<b>64,67</b>
	<b>033b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,10E+01	2,93E-01	3,88E+01	<b>65,17</b>
<b>T1</b>	<b>131a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,98E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>39,64</b>
	<b>131b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,98E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>40,08</b>
	<b>132a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	1,71E+01	<b>45,33</b>
	<b>132b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,33E+01	2,93E-01	1,71E+01	<b>45,75</b>
<b>T2</b>	<b>231a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	1,33E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>33,21</b>
	<b>231b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	1,33E+01	5,35E-01	4,69E+00	<b>33,64</b>
	<b>232a</b>	5,94E+00	2,68E-01	8,22E+00	1,95E-01	6,84E+00	2,93E-01	1,71E+01	<b>38,78</b>
	<b>232b</b>	7,95E+00	2,68E-01	6,65E+00	1,95E-01	6,84E+00	2,93E-01	1,71E+01	<b>39,29</b>

**CR:** Capa de rodadura, **R(I-R):** Riego entre intermedia-rodadura, **CI:** Capa intermedia, **R (B-I):** Riego entre base e intermedia, **CB:** Capa base, **R (S-B):** Riego entre sub-base y capa base, **CS:** Sub-base

Como se puede apreciar en las dos tablas anteriores, las diferencias entre secciones de firme equivalentes pero con distinta capa de rodadura (**a**: capa de rodadura BBTM, y **b** capa de rodadura PA) no son significativas, no superando en ningún caso el 1,5%. Por ese motivo, se representarán gráficamente únicamente las secciones de firme con capa de rodadura BBTM, que son las que se corresponden con el sufijo (**a**).

Esta elección se realiza ya que los resultados de conservación y mantenimiento, al haber sido generados por la Junta de Andalucía, hacen referencia secciones con capas de rodadura más similares a las BBTM que a las porosas o drenantes (PA). De esta forma se podrán evaluar los resultados de manera conjunta

### Calentamiento global

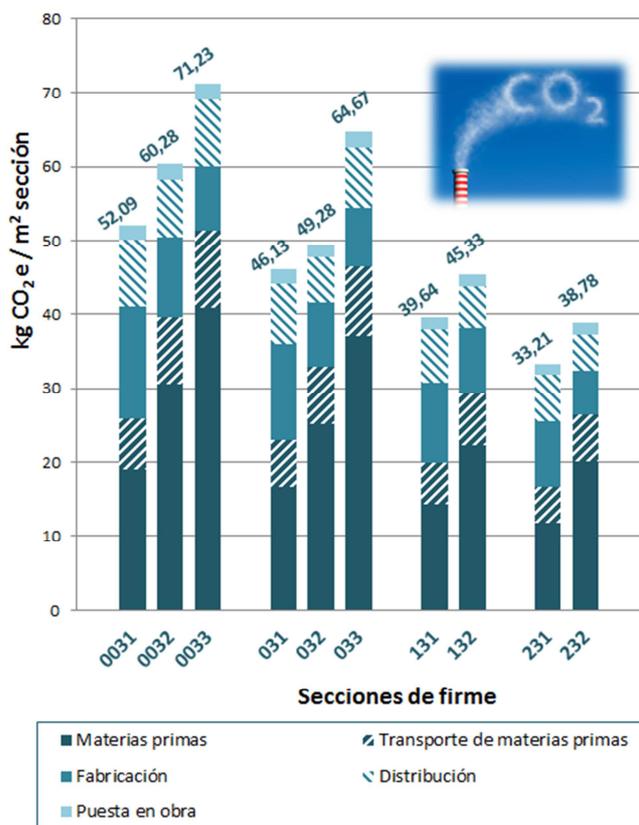


Figura 9. Calentamiento global expresado en función de etapa del ciclo de vida.

En la figura 9 se observan los resultados en términos de calentamiento global por metro cuadrado de sección. De manera general se observa cómo según se disminuye en categoría de tráfico el impacto también disminuye. Las secciones de firme con sub-bases que utilizan ligantes hidráulicos (suelo cementos y gravacimientos) presentan impactos superiores las que presentan bases de material granulado. La etapa de materias primas es en todas las secciones la etapa más impactante, seguida de los procesos de fabricación y los transportes. Se aprecia como la puesta en obra, si bien técnicamente es una etapa fundamental, no presenta especial relevancia desde el punto de vista ambiental.

En la figura 10 se observan los mismos resultados, expresados en este caso en función del elemento constructivo que compone la sección.

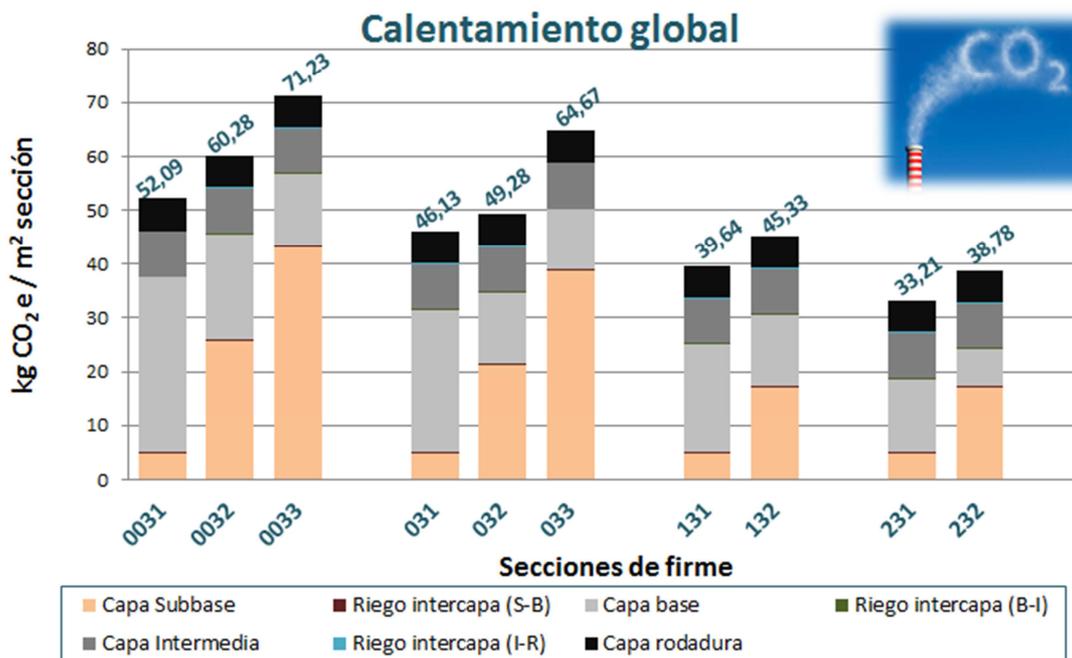


Figura 10. Calentamiento global expresado en función del elemento estructural de la sección.

Las sub-bases en las secciones tipo 32 y 33 presentan resultados especialmente elevados, convirtiéndose en los elementos más impactantes en ese tipo de secciones. Para el resto de secciones, exceptuando la 232, se observa que a mayor espesor de capa (bien sea base, intermedia o rodadura), mayor es el impacto, independientemente de la composición y formulación de la mezcla. Los riegos, tanto de adherencia como de curado, no presentan especial relevancia, siendo sin duda el tipo de sub-base el factor que marca las diferencias.

Si se atiende al proceso de mantenimiento recomendado por la Junta de Andalucía, los resultados que se obtienen quedan reflejados en la figura 11:

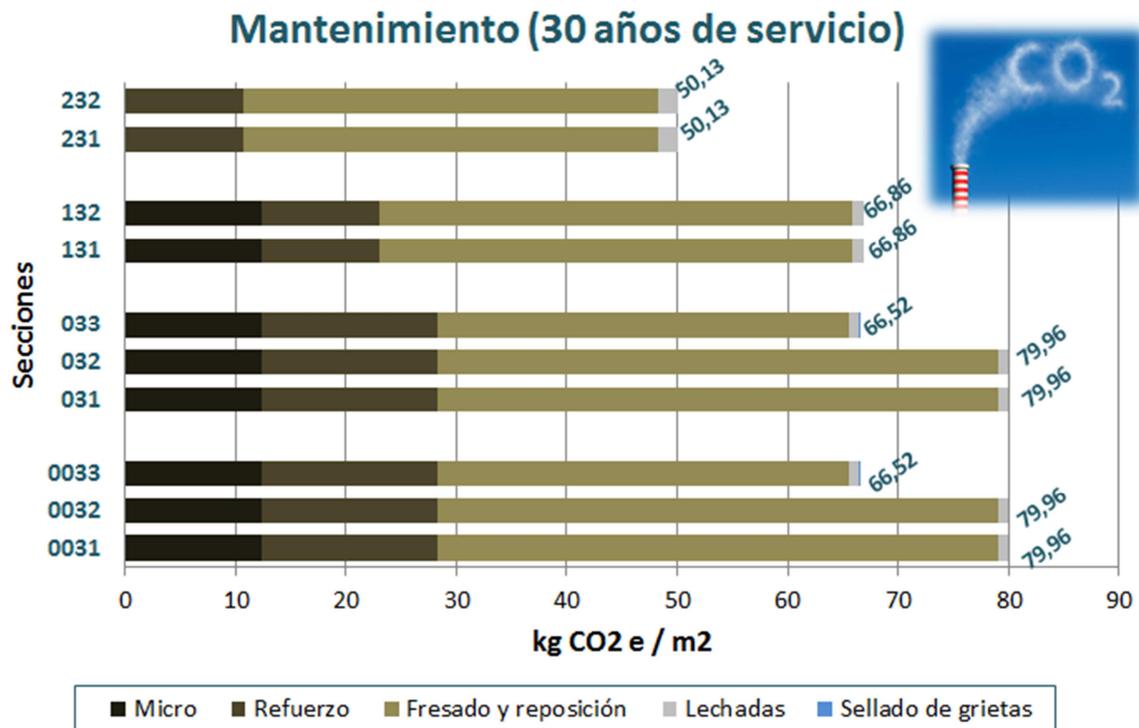


Figura 11. Calentamiento global expresado para la etapa de mantenimiento (30 años).

Como se puede observar, dentro de la misma categoría de tráfico, los impactos asociados a secciones con sub-bases 31 (zahorra artificial) y 32 (suelocemento) presentan resultados equivalentes en todas las categorías de tráfico, mientras que las secciones con sub-base tipo 33 (suelocemento y gravacemento) presentan impactos ligeramente inferiores.

Es importante destacar que estos resultados deben tomarse con cautela, debido a que no dejan de ser recomendaciones, y la coincidencia con lo que sucede en la realidad puede variar, debido a distintos factores como la calidad de la ejecución de la obra, el correcto diseño de la sección, los presupuestos destinados a conservación, etc.

## 6.2 Consumo de agua

De forma análoga, se presenta a continuación los resultados de consumo de recursos hídricos. En la tabla 14 se muestran los resultados de consumo de agua, expresado en metros cúbicos de agua por metro cuadrado de superficie de sección, en función de la etapa de ciclo de vida estudiada, desde la extracción de materias primas hasta la puesta en obra.

**Tabla 14.** Consumo de agua por etapa del ciclo de vida. m<sup>3</sup> agua /m<sup>2</sup> sección.

m <sup>3</sup> agua / m <sup>2</sup>		Materias primas	Transporte de materias primas	Fabricación	Distribución	Puesta en obra	TOTAL
T00	0031a	48,60	7,19	15,90	10,10	0,71	82,50
	0031b	48,50	8,78	15,60	9,96	0,71	83,55
	0032a	72,10	9,97	11,60	8,72	0,70	103,09
	0032b	72,00	11,00	11,30	8,62	0,70	103,62
	0033a	96,80	11,60	9,54	10,20	0,76	128,90
	0033b	96,60	12,60	9,30	10,10	0,76	129,36
T0	031a	43,80	6,93	13,20	9,12	0,81	73,86
	031b	43,70	8,01	12,90	9,03	0,81	74,45
	032a	59,20	8,57	9,31	6,89	0,55	84,52
	032b	59,10	9,64	9,07	6,80	0,55	85,16
	033a	87,40	10,60	8,58	9,16	0,72	116,46
	033b	87,30	11,60	8,34	9,07	0,72	117,03
T1	131a	38,40	6,14	11,30	8,20	0,57	64,61
	131b	38,20	7,21	11,10	8,10	0,57	65,18
	132a	52,00	7,93	9,29	6,46	0,52	76,20
	132b	51,80	8,99	9,04	6,37	0,52	76,72
T2	231a	32,80	5,38	9,11	7,33	0,46	55,08
	231b	32,60	6,44	8,86	7,23	0,46	55,59
	232a	47,10	7,13	6,97	5,50	0,50	67,20
	232b	46,90	8,20	6,73	5,41	0,50	67,74

La obtención de estos datos se realiza a partir de los inventarios previamente recopilados, quedando recogido en la tabla anterior todos los consumos hídricos necesarios para poner en servicio la sección de firme.

La tabla 15 cuantifica el consumo de recursos hídricos en la misma base que la tabla anterior, pero en esta ocasión expresando los resultados por elemento constructivo de la sección de firme.

**Tabla 15.** Consumo de agua por elemento constructivo. m<sup>3</sup> agua /m<sup>2</sup> sección.

m <sup>3</sup> agua / m <sup>2</sup>		CR	R(I-R)	CI	R(B-I)	CB	R(S-B)	CS	TOTAL
T00	0031a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	4,76E+01	1,61E+00	1,30E+01	82,50
	0031b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	4,76E+01	1,61E+00	1,30E+01	83,55
	0032a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	2,92E+01	8,15E-01	5,23E+01	103,09
	0032b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	2,92E+01	8,15E-01	5,23E+01	103,62
	0033a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	8,76E+01	128,90
	0033b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	8,76E+01	129,36
T0	031a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	3,84E+01	1,61E+00	1,30E+01	73,86
	031b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	3,84E+01	1,61E+00	1,30E+01	74,45
	032a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	4,33E+01	84,52
	032b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	4,33E+01	85,16
	033a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,61E+01	8,15E-01	7,87E+01	116,46
	033b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,61E+01	8,15E-01	7,87E+01	117,03
T1	131a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	2,92E+01	1,61E+00	1,30E+01	64,61
	131b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	2,92E+01	1,61E+00	1,30E+01	65,18
	132a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	3,49E+01	76,20
	132b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,96E+01	8,15E-01	3,49E+01	76,72
T2	231a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,96E+01	1,61E+00	1,30E+01	55,08
	231b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,96E+01	1,61E+00	1,30E+01	55,59
	232a	7,64E+00	7,11E-01	1,19E+01	5,19E-01	1,07E+01	8,15E-01	3,49E+01	67,20
	232b	1,02E+01	7,11E-01	9,93E+00	5,19E-01	1,07E+01	8,15E-01	3,49E+01	67,74

CR: Capa de rodadura, R(I-R): Riego entre intermedia-rodadura, CI: Capa intermedia, R (B-I): Riego entre base e intermedia, CB: Capa base, R (S-B): Riego entre sub-base y capa base, CS: Sub-base

Al igual que en el caso del calentamiento global, las diferencias entre secciones de firme equivalentes pero con distinta capa de rodadura (**a**: capa de rodadura BBTM, y **b** capa de rodadura PA) no son significativas, no superando en ningún caso el 1,5%, por lo que se representarán gráficamente únicamente las secciones de firme con capa de rodadura BBTM, que son las que se corresponden con el sufijo (a).

En la figura 13 se muestran los resultados de consumo de agua para las 10 secciones de firme estudiadas.

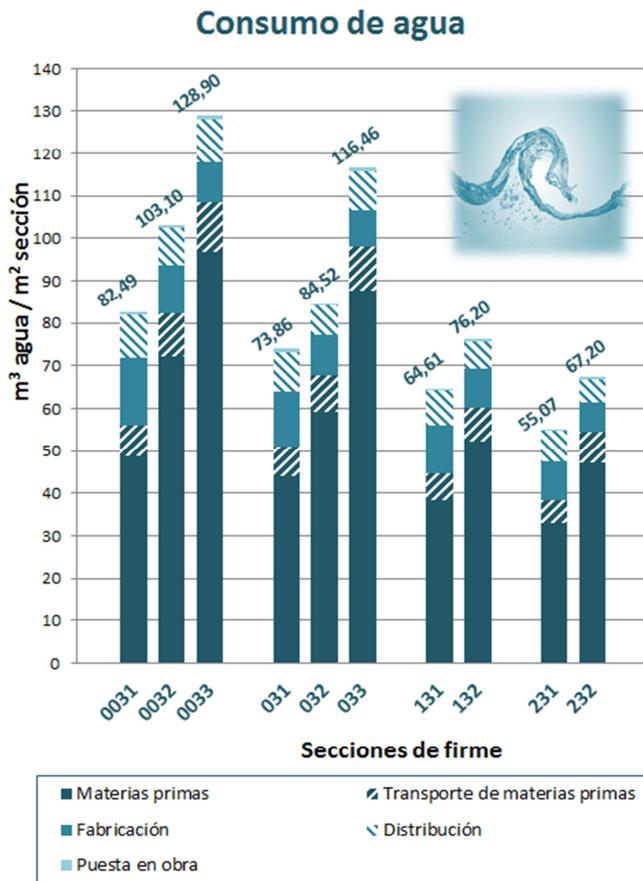


Figura 12. Consumo de agua expresado en función de etapa del ciclo de vida.

Como se puede apreciar en la figura 12, los resultados en cuanto a consumo de agua guardan una relación muy similar a los de calentamiento global, disminuyendo el impacto según se disminuye la categoría de tráfico, y con una variación importante en función del tipo de sub-base utilizada en cada una de las secciones. De nuevo la etapa de materias primas es la más impactante en todas las secciones de firme estudiadas, si bien en el caso de consumo de agua es mucho más evidente y relevante. La etapa de fabricación y los transportes presentan impactos similares, volviendo a ser la puesta en obra la etapa que menos influye en el consumo de agua de las secciones de firme.

La figura 13 muestra el consumo hídrico en base al elemento estructural de la sección de firme estudiado.

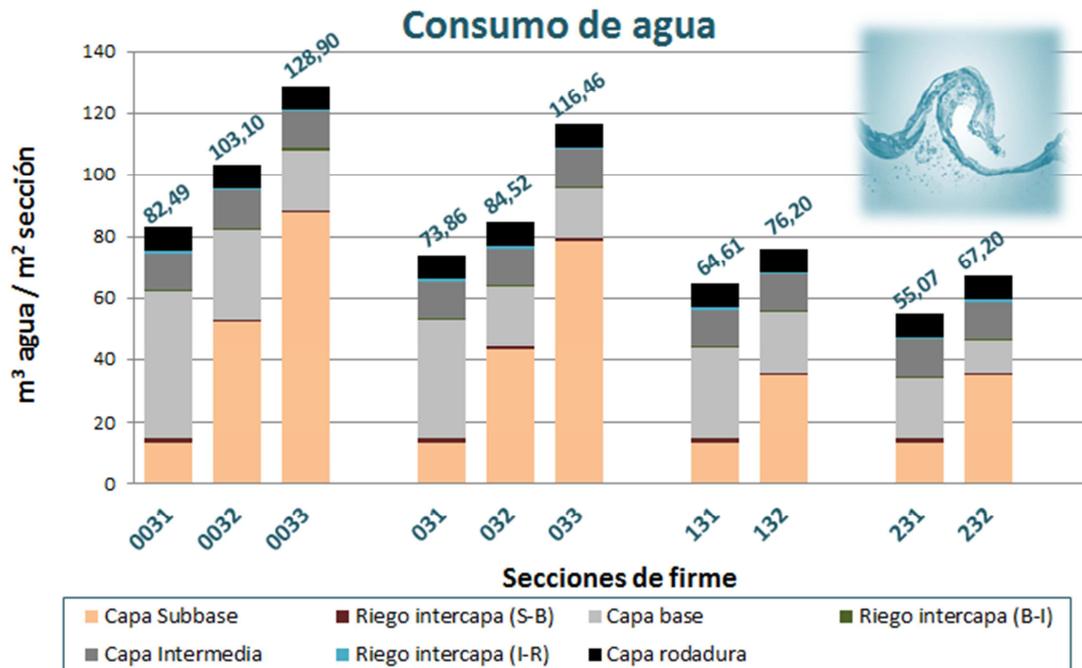
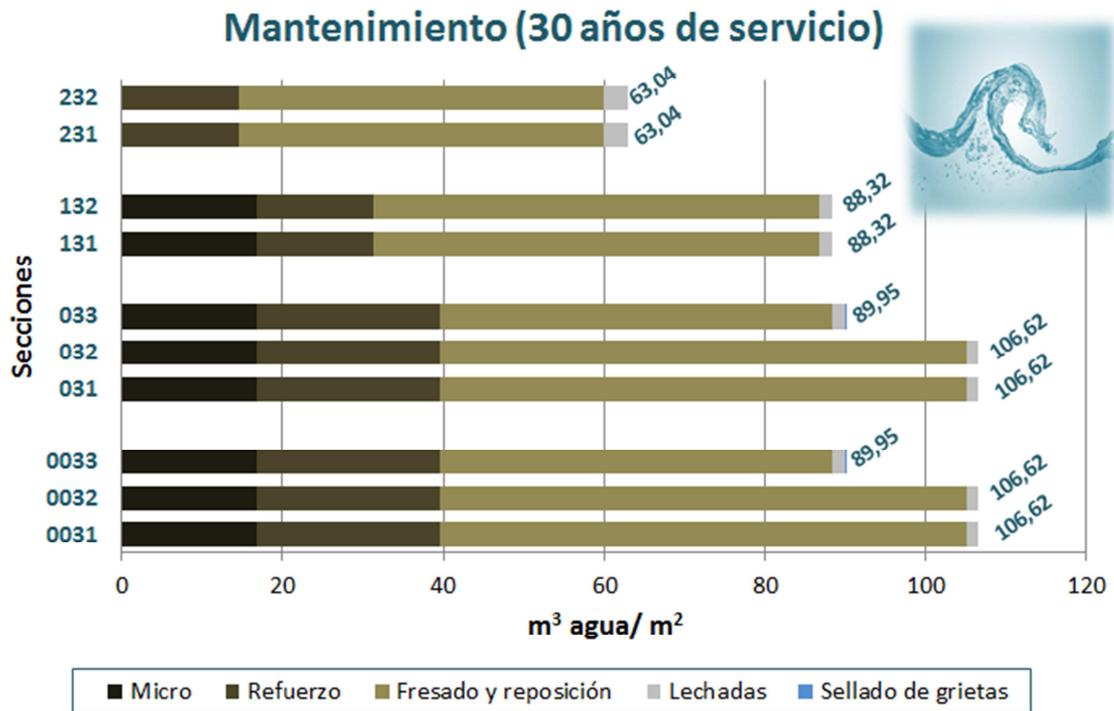


Figura 13. Consumo de agua expresado en función del elemento estructural de la sección.

Nuevamente se aprecia cómo dentro de cada sección el consumo de agua aumenta de acuerdo aumenta el contenido en ligante hidráulico en las sub-bases, manteniendo el resto de elementos constructivos que forman parte de la sección el mismo comportamiento que se observó en el indicador calentamiento global. En cuanto a los impactos asociados a la etapa de conservación, en la figura 14 se presentan los resultados obtenidos para un periodo de 30 años, donde vuelve a apreciarse una linealidad total con lo que ocurre en el indicador de calentamiento global, donde secciones con sub-base tipo 33 (suelocemento y gravacemento) presentan impactos ligeramente inferiores dentro de una misma categoría de tráfico.



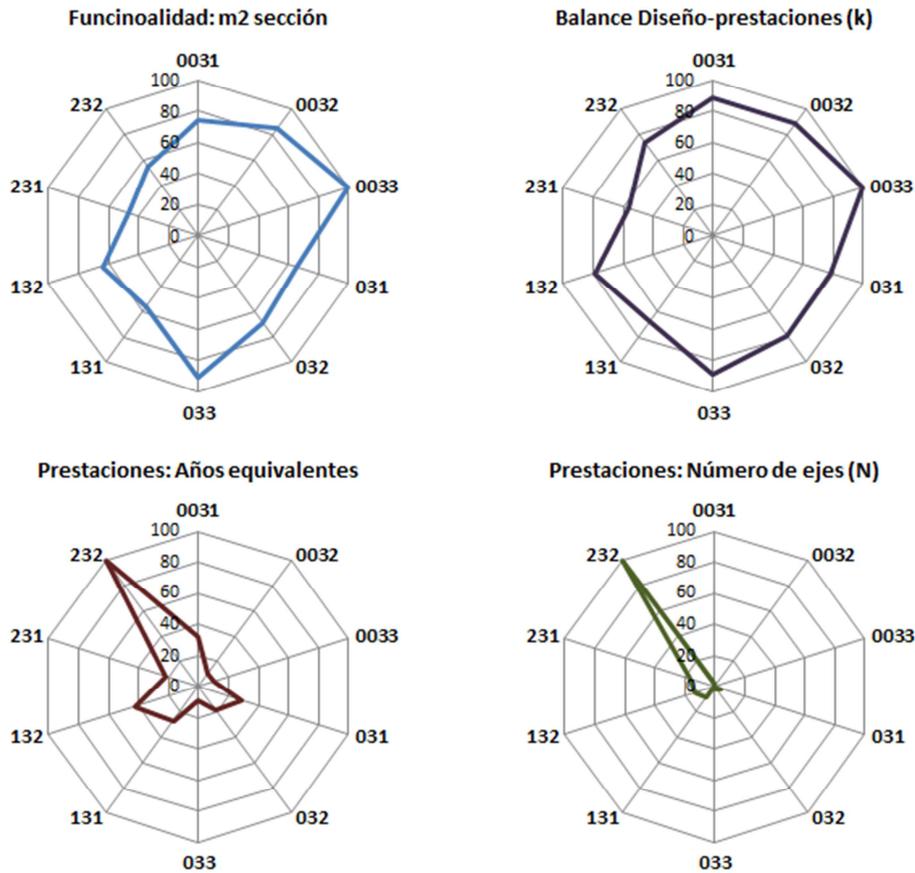
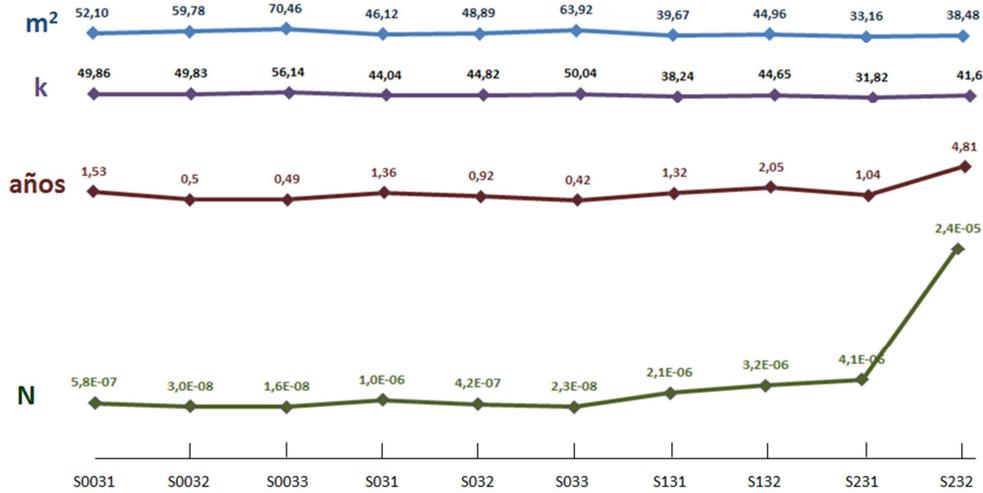
**Figura 14.** Consumo de agua expresado para la etapa de mantenimiento (30 años).

Pero tal y como se ha detallado en anteriores apartados de este trabajo, se va a realizar una valoración de qué tipo de unidad funcional en base a tres tipos de criterios:

- Criterio 1. Basado en funcionalidad (m2 de sección)
- Criterio 2. Basado en prestaciones (número de ejes tipo y años)
- Criterio 3. Basado en balance diseño y prestaciones (estimador que relaciona proyecto y escenario real)

En la figura 15 se muestran los resultados ambientales para calentamiento global, expresados según cuatro unidades funcionales distintas.

## Calentamiento global (kg CO<sub>2</sub>e)



**Figura 15.** Comparación en la expresión de los resultados en función de la unidad funcional seleccionada expresado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente

Como se puede apreciar, los resultados por m<sup>2</sup> y por balance diseño-prestaciones presentan muy buena correlación.



## CAPITULO 07.

### CONCLUSIONES

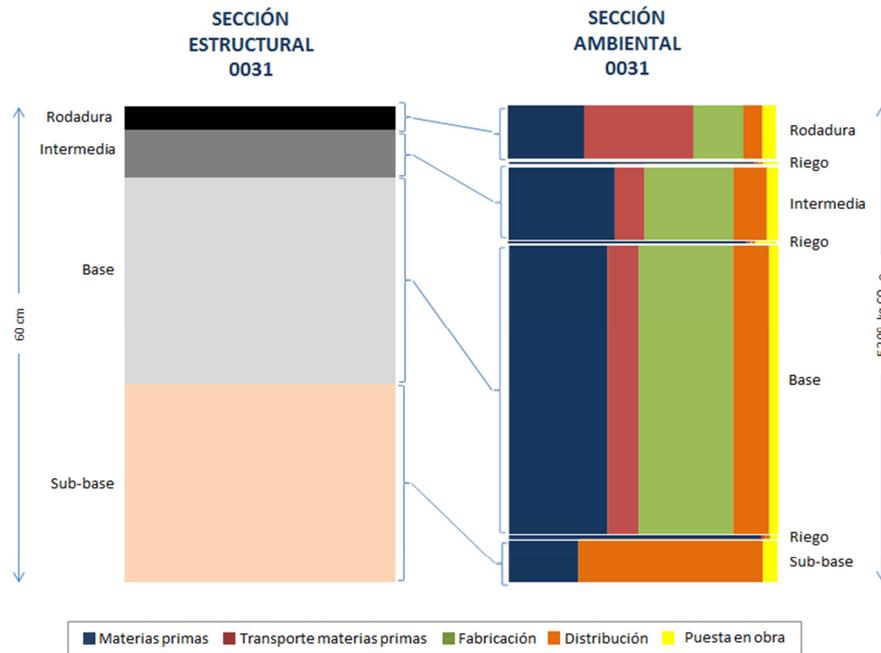
A lo largo de este trabajo se ha analizado el impacto ambiental de las secciones de firme no rígidas de las categorías de tráfico T00 a T2, estableciendo donde recaen los mayores impactos, tanto desde el punto de vista estructural del elemento a estudiar o de la etapa del ciclo de vida. Ha sido posible calcular los impactos ambientales referenciando los mismos a una parte de la sección estructural:

- Sub-base
- Riego intermedio
- Base
- Riego intermedio
- Intermedia
- Riego intermedio
- Rodadura

O a una etapa del ciclo de vida estudiado:

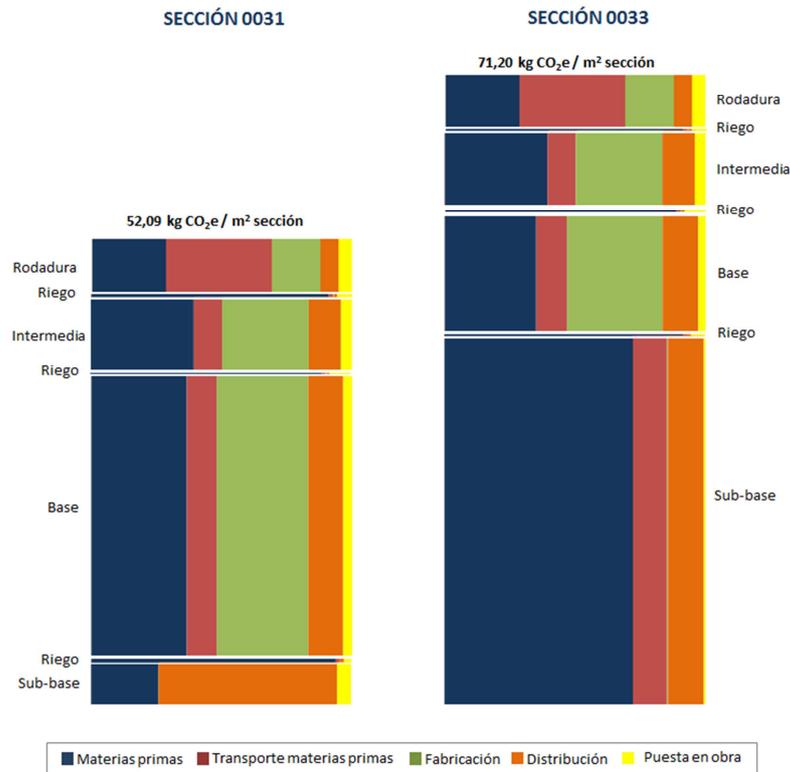
- Materias primas
- Transporte de materias primas
- Fabricación
- Distribución
- Puesta en obra
- Mantenimiento

Mediante esta estructuración de las secciones, es posible obtener diagramas comparativos de este tipo (figura 16), donde se compara la sección estructural y la sección ambiental.



**Figura 16.** Comparación sección estructural vs sección ambiental.

Pero también se posibilita la comparación entre distintas secciones (figura 17):



**Figura 17.** Comparación ambiental de dos secciones, considerando elemento estructural y etapa del ciclo de vida.

Con respecto a qué elementos de las secciones de firme presentan mayor impacto, se puede aseverar que en líneas generales van directamente relacionados con la masa de los mismos. Los riegos, por su pequeño volumen, presentan un impacto muy poco relevante en el estudio. Las sub-bases son el elemento más impactante siempre que esté compuesta por un material aglomerado incluyendo ligante hidráulico. En el caso de la zahorra, su impacto es considerablemente menor, si bien su transporte hasta la obra puede tener relativa importancia. Por regla general al ascender en la sección, las capas de firme son menos voluminosas y menos impactantes, aunque no hay una relación directamente proporcional entre masa e impacto ambiental.

Para los indicadores de calentamiento global y consumo de agua, el impacto ambiental aumenta según aumenta la cantidad de cemento incluido en la sección. Es una tendencia que se observa en todas las secciones estudiadas.

El trabajo ha abordado la unidad funcional de una manera novedosa, incluyendo el concepto de unidad funcional teórica o calculada sobre proyecto y la unidad funcional real tras 30 años de operación, pudiéndose establecer relaciones entre ambas y sus resultados ambientales. Los impactos asociados a cada una de las secciones estudiadas cambian notablemente en función de la unidad funcional de referencia seleccionada, cambiando el valor en términos absolutos pero también el orden jerárquico de las mismas.

Puede concluirse que la **unidad funcional metro cuadrado** de sección y la **unidad funcional definida por el estimado k** mantienen una buena correlación. Cuando se trabaja con el criterio basado en **equivalente en años**, se observa que la tendencia se aleja de las dos anteriores, con un repunte muy significativo de los resultados en la sección 232, lo que implica que el coste ambiental por año de las secciones 232 es muy superior al obtenido en el resto de secciones. Cuando el criterio de la unidad funcional es el **del número de ejes**, la tendencia resulta muy similar a la anteriormente descrita.

La unidad funcional basada en el estimado k proporciona información de las prestaciones de la sección vinculadas a las exigencias de la sección, mientras que años y ejes proporcionan información vinculada a macro-propiedades, lo que hace lógico la diferencia obtenida.

El impacto de las secciones disminuye paulatinamente según disminuyen las exigencias del firme, es decir, según las categorías del tráfico van siendo menores. Este es un hecho que se corrobora en todos los indicadores ambientales estudiados, si bien no existe una relación lineal entre el impacto ambiental y el tráfico soportado por la sección.

Al analizar en detalle la etapa de primera puesta en obra de las secciones, se han extraído las siguientes conclusiones:

- Los **transportes de materias primas** como la **distribución** de los componentes elaborados pueden llegar a tener una relevancia importante en este tipo de producto.
- Para ninguna de las 20 secciones estudiadas la **puesta en obra** ha resultado ser una etapa especialmente impactante. Independientemente del volumen de material que ha sido puesto en obra, la puesta en obra nunca ha representado una etapa determinante en ninguno de los casos.
- Para todas las secciones, la etapa de **materias primas** es la etapa del ciclo de vida más impactante (sin tener en cuenta la etapa de mantenimiento y conservación). Esto implica que, en caso de desear minorar el ciclo de vida de la sección, el punto más importante en el que incidir es sin duda la etapa de materias primas. Esto puede lograrse mediante dos opciones:
  - Desmaterialización: desarrollo de secciones menos voluminosas. Es el proceso de ofertar una solución estructura equivalente a la convencional pero con una cantidad de material menor. Existen varias tendencias a este respecto, tales como las mezclas de alto modulo o las más novedosas capas de rodadura *Asphalt Ultra Thin Layer* (AUTL). Estas acciones no solo mejorarían la etapa de materias primas sino que tendrían repercusión positiva en los transportes de materias primas y distribución, así como en los procesos de fabricación y puesta en obra.
  - Reciclabilidad: La incorporación de material reciclado es uno de los campos en los que más cantidad de trabajo se ha realizado, valorando distintos porcentajes de introducción de material reciclado, comportamiento de los betunes y adición de rejuvenecedores. El transporte en este caso puede ser crucial para que el reciclado se convierta en una opción viable desde el punto de vista ambiental y económico.
- Los principales impactos asociados a los procesos de **fabricación** van directamente asociados a los procesos de fabricación de mezclas bituminosas. En concreto, el proceso de calentamiento de áridos es el elemento ambientalmente más demandante en la fabricación de aglomerado asfáltico. Existen diversos tipos de mezclas (templadas, semicalientes) que favorecen una menor temperatura de operación, lo que permite un ahorro importante en el coste ambiental de la etapa de fabricación de mezcla bituminosa.

Si el estudio se centra en la parte de mantenimiento y conservación:

- La etapa de mantenimiento, de acuerdo al protocolo de conservación que se ha introducido en el estudio, puede llegar a implicar un elevado impacto ambiental en el Ciclo de Vida de la sección de firme, llegando a superar el impacto asociado a la primera puesta de la sección.

- Estos datos deben ser considerados con cautela ya que estos protocolos no se siguen de forma rigurosa y están condicionados por factores económicos imponderables. Lo que es claro y evidente es que las operaciones de mantenimiento son cruciales para la buena operatividad de la sección de firme y para que la contribución de la sección dentro del servicio general de transporte sea lo más beneficiosa posible.

Se ha evaluado el ciclo de vida completo de la sección de firme, y se ha logrado establecer comparaciones basadas en distintos criterios. Se ha valorado el comportamiento ambiental de las secciones en función de sus componentes elementales, las etapas del ciclo de vida que los componen y además se ha tenido en cuenta cómo interpretar la unidad funcional, aplicando criterios de funcionalidad y prestaciones.

Uno de los logros más importantes de esta sección es el inventario ya que habitualmente los estudios presentan cajas negras en las que la opacidad de los inventarios conlleva ciertas dudas o incertidumbres en la interpretación de los resultados

Otra de las conclusiones que pueden extraerse de este estudio, y que más conceptual que técnica, tiene que ver con el modo de apreciar nuestro entorno y afrontar el desarrollo sostenible de nuestra sociedad, **estudiando sistemas y no productos**. La sección de firme no deja de ser un nivel que aglutina gran cantidad de sub-niveles (mezclas asfálticas, suelocementos, gravacimientos, procesos de transportes, puestas en obra, etc.), pero que está incluido en un conjunto más grande de elementos que componen el servicio final, que es el transporte.

Esta visión permite tomar una perspectiva mucho más general del entorno y posibilitan una toma de decisiones mucho más racional y provechosa. En base a esta premisa, y debido el bajo impacto que tiene el proceso de construcción en comparación con la operación de la carretera, la investigación de este sector se debe orientar a lograr una mayor calidad de los firmes (sin hacerlo en detrimento de otros factores como confort, ruido, seguridad) lo que significa investigar en materiales. En este sentido, las tendencias mundiales deben orientarse a generar la “carretera perfecta”, entendiéndose así aquella que minore los consumos de los vehículos gracias a la calidad de la misma. El mantenimiento juega un papel fundamental.

Como conclusión final, cabe destacar que las secciones de firme (la carretera en su conjunto), es un elemento crucial en el desarrollo socioeconómico actual y que lo seguirá siendo en un futuro, sobre el que merece la pena seguir investigando e innovando con el fin de contribuir a que los servicios asociados al transporte sean más sostenibles desde el punto de vista ambiental, social y económico, contribuyendo así a dotar al conjunto de elementos que componen el transporte de un mayor grado de sostenibilidad.



## CAPITULO 08.

### AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis Luis Couceiro Martínez, de la Universidad Alfonso X el Sabio, que siempre ha sabido aportar su conocimiento para ayudarme a realizar este trabajo.

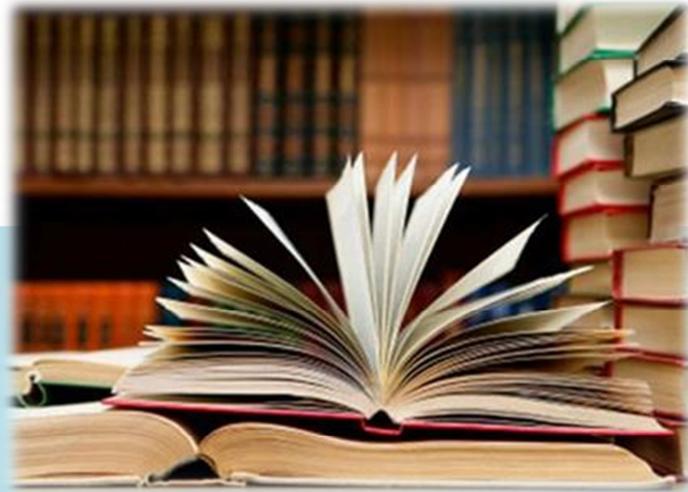
A la Fundación CARTIF, Centro Tecnológico en el que desempeñé mi carrera profesional, que ha apoyado el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros en el Área de Tecnología Ambiental y Gestión Sostenible de la Fundación CARTIF, Nuria, José, Laura, Alicia, Josué, Raquel, Marta y Loly, con quienes llevo trabajando más de doce años.

A todos las personas que han colaborado realizando la revisión crítica de este trabajo. José Luis Pena de la Plataforma Tecnológica de la Carretera, Rubén Carnerero y Francisco Campos de IK Ingeniería, Nuria García y Laura Pablos de la Fundación CARTIF.

A las distintas agrupaciones sectoriales relacionadas con la carretera: Asociación Española de la Carretera (AEC), Plataforma Tecnológica de la Carretera (PTC) y Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), con quienes he tenido el placer de trabajar en numerosos proyectos.

Un agradecimiento muy especial a la empresa constructora PAVASAL, que ha facilitado el inventario necesario para realizar este trabajo y que siempre ha estado dispuesta a colaborar en todo momento. Gracias a Jesús Felipe y muy especialmente a José Ramón López, quien ha aportado esfuerzo, entusiasmo, buenos consejos y una ayuda ilimitada para poder sacar adelante la presente tesis, y que sin duda merece toda mi gratitud.



## CAPITULO 09.

## REFERENCIAS

**Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, 2007** Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, (2007). *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía*. Sevilla: Junta de Andalucía, pp.170-174.

**Fomento.gob.es 2015** Fomento.gob.es, 2015, Ministerio de Fomento. [online]. 2015. [Ultimo acceso: 30/04/2015]. Disponible en: <https://www.fomento.gob.es>.

**Kraemer & Albelda, 2004** Kraemer, C. and Albelda, R. (2004). Evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC. In: *VI Congreso Nacional de Firmes*. [online] Disponible en: [http://www.aecarretera.com/congresos/PO\\_04.pdf](http://www.aecarretera.com/congresos/PO_04.pdf) [Ultimo acceso: 02/02/2015].

**Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2003** Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2003, Orden FOM/3460/2003 por la que se aprueba la norma 6.1-IC “secciones de firme” de la instrucción de carreteras. Madrid: BOE. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2003/12/12/pdfs/A44274-44292.pdf>.

**Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2015** Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones

técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2015/01/03/pdfs/BOE-A-2015-48.pdf>.

**Pavasal.com 2015** Pavasal.com, 2015, Pavasal [. [online]. 2015. [Ultimo acceso: 30/04/2015]. Disponible en: <http://www.pavasal.com>.

**Pre-sustainability.com 2015** Pre-sustainability.com, 2015, SimaPro - World's Leading LCA Software Package | PRe Sustainability. [online]. 2015. [Ultimo acceso: 30/04/2015]. Disponible en: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>.

**Setac.org 2015** Setac.org, 2015, Society of Environmental Toxicology and Chemistry.[online]. 2015. [Ultimo acceso: 30/04/2015]. Disponible en: <http://www.setac.org>.

**UNE EN ISO 14040, 2006** UNE EN ISO 14040: 2006. Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, Principios y marco de referencia

**UNE EN ISO 14044, 2006** UNE EN ISO 14044: 2006. Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, Requisitos y Directrices.

**Wernet et al. 2016** Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>

