



## **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA EL TRANSPORTE.**

**Fase I. Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina.**

**Energía y cambio climático**



## **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA EL TRANSPORTE.**

**Fase I. Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina.**

**Energía y cambio climático**

Yolanda Lechón  
Helena Cabal  
Carmen Lago  
Cristina de la Rúa  
Rosa M<sup>a</sup> Sáez  
Montserrat Fernández

CIEMAT/ESYME/04-45201/12

Edita: Centro de Publicaciones  
Secretaría General Técnica  
Ministerio de Medio Ambiente.

I.S.B.N.: 84-8320-312-X  
NIPO MMA: 310-05-056-9, NIPO MEC: 654-05-016-5  
Depósito Legal: M-32605-2005

## Presentación

El Ministerio de Medio Ambiente, en colaboración con otros Ministerios con responsabilidades en la materia, está poniendo todos los medios a su alcance para incidir de un modo eficaz en los sectores denominados “difusos”, entre los que se encuentra el sector transporte, responsables en gran medida de la emisión de gases de efecto invernadero. Buena prueba de ello es la firma de un acuerdo específico, dentro del Convenio Marco de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), con el fin de poder informar de los beneficios que supone para nuestro país el uso de biocarburantes. De este modo pretendemos aportar una iniciativa más para hacer posible el cumplimiento de los objetivos de Kioto.

El sector transporte supone actualmente el 5,7% del PIB, consume el 40% del total energético nacional y fue responsable del 24,4% de las emisiones de gases de efecto invernadero en España en el año 2003 y, lo que es más preocupante, se prevé que estas emisiones aumenten un 50% entre 1990 y 2010.

Estas previsiones, similares para el conjunto de la Unión Europea, hicieron que la Comisión pidiera en el Libro Blanco *“La política europea de transporte de cara al 2010: la hora de la verdad”* una reducción de la dependencia del petróleo en el sector del transporte utilizando otros combustibles alternativos. Se consideró que un incremento en el uso de biocarburantes para el transporte supone una medida para cumplir con los compromisos de Kioto, además de crear nuevas oportunidades en el ámbito del desarrollo rural. Al mismo tiempo se incrementa la seguridad de abastecimiento energético ya que podrían llegar hasta el 20% de sustitución de los carburantes fósiles en 2020.

Estas y otras consideraciones dieron lugar a la Directiva 2003/30/CE, relativa al fomento del uso de biocarburantes y otros combustibles renovables en el transporte por la que se recomienda a los estados miembros la sustitución, de un 2% para 2005 y 5,75% para 2010, con combustibles renovables en el sector del transporte.

El reciente Plan de Acción 2005-2010, dentro de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética, da un fuerte impulso a la reducción de gases de efecto invernadero a través de la sustitución de gasolina y gasóleo, tal como recomienda la Directiva 2003/30/CE. En esta línea de actuación, se puede prever un consumo de biocarburantes en España de 1660 Ktep para el periodo 2005-2007 que podría evitar, en principio, 3810 Kt de CO<sub>2</sub>. Cabe destacar que España ha sido uno de los Estados miembros que más rápidamente ha reaccionado ante el nuevo marco comunitario, en concreto arbitrando medidas fiscales que contemplan exenciones fiscales para los biocarburantes hasta 2012, lo que permite a las empresas producir biocarburantes de una forma más competitiva y viable.

Estas medidas y la existencia de condiciones favorables para la producción, han dado como resultado que España sea actualmente el primer productor de bioetanol de la Unión Europea con 226 millones de litros, el 44% del total producido en la UE, esperándose que a finales de 2005 se alcancen los 426 millones de litros.

Ahora bien, los combustibles alternativos, además de cumplir las normas de calidad establecidas, han de ser competitivos económicamente, estar ampliamente disponibles para todos los consumidores y, sobre todo, han de ser menos agresivos que los carburantes

convencionales y, por consiguiente, su uso debe suponer un beneficio medioambiental para el país que los utilice. Además, estos posibles beneficios medioambientales deben de ser medidos, para así poder ser mejorados, y comparados con los combustibles convencionales a los que pretenden sustituir. Este tipo de análisis conocido como Análisis del Ciclo de Vida (ACV) permite la cuantificación de todas las consecuencias para el medio ambiente (desde la cuna hasta la tumba) que lleva consigo la producción y uso de los combustibles alternativos. De este modo se pretende contribuir a la aplicación del *principio de prevención*, que debe presidir las alternativas viables de introducción de sustancias en la atmósfera.

El trabajo que aquí se presenta, *‘El Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina’* es un trabajo riguroso, realizado por un prestigioso Organismo Público de Investigación, el CIEMAT y supervisado por un grupo de expertos independientes en el ACV, así como por representantes de las partes interesadas: Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP), productores de bioetanol, asociación nacional de fabricantes de coches, representantes del Ministerio de Medio Ambiente, e investigadores expertos en cultivos energéticos y procesos de transformación a bioetanol.

En este estudio se analizan los procesos actuales de producción de bioetanol y gasolina en España y se cuantifican comparativamente sus impactos en el cambio climático y en el consumo de energía de la producción y uso. Los resultados no pueden ser más elocuentes, si producimos bioetanol en España y lo utilizamos en nuestros vehículos de transporte, ahorraremos emisiones de CO<sub>2</sub> y energía fósil. Sin embargo estos mismos resultados nos advierten que el proceso de obtención de bioetanol, especialmente en la etapa de obtención de la materia prima, puede y debe ser mejorado. A este trabajo le seguirá otro -que persigue los mismos objetivos- sobre el biodiesel de aceites usados y de primer uso de plantas oleaginosas en comparación con el diesel a quien pretenden sustituir.

Nuestro interés es conocer con el mayor rigor científico posible, cuáles son las prestaciones medioambientales de los carburantes alternativos y si sus beneficios para la atmósfera contribuyen al éxito de las políticas puestas en marcha por el gobierno, y en concreto las que viene desarrollando el Ministerio de Medio Ambiente, para la integración de las consideraciones ambientales en todos los sectores productivos, incluido el sector transporte que –como hemos señalado más arriba- es responsable en buena medida de las emisiones de gases efecto invernadero que nos pueden alejar de los objetivos de Kioto.

Con esta publicación –que viene a sumarse a otras obras que han visto la luz recientemente- deseamos poner en manos del público y de los expertos o estudiosos en la materia una obra que no sólo es producto de un objetivo político muy definido para el que es imprescindible la coordinación entre los agentes implicados, organismos y administraciones públicas, sino también el resultado concreto y eminentemente práctico de una línea de investigación que relaciona los residuos agrícolas, las fuentes de energía alternativas y la integración de las consideraciones medioambientales en el transporte.

*Arturo Gonzalo Aizpiri*  
*Secretario General para la Prevención de la Contaminación*  
*y del Cambio Climático*

# ÍNDICE

<b>SECCION I. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).</b>	<b>7</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO</b>	<b>7</b>
<b>2 OBJETIVO DEL ESTUDIO</b>	<b>8</b>
<b>3 ALCANCE DEL ESTUDIO</b>	<b>9</b>
3.1 Funciones de los sistemas estudiados	9
3.2 Unidad funcional	10
3.3 Sistemas estudiados	10
3.4 Límites de los sistemas	11
3.5 Descripción de los productos estudiados y cuantificación de la unidad funcional	12
<b>4 DATOS NECESARIOS. REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MISMOS.</b>	<b>14</b>
<b>5 HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA.</b>	<b>15</b>
5.1 La Base de Datos	15
5.2 Los indicadores de calidad de los datos	15
5.3 El inventario de ciclo de vida	16
5.4 La evaluación de impacto	16
<b>6 REVISION CRÍTICA</b>	<b>16</b>
<b>SECCION II. ANÁLISIS DE INVENTARIO</b>	<b>19</b>
<b>1 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA.</b>	<b>19</b>
1.1 Principales hipótesis y limitaciones	19
1.2 Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso	22
1.3 Procedimientos de cálculo	25
1.4 Reglas de asignación	27
1.5 Balance energético	29
1.6 Vinculación de los datos con la unidad funcional	31
<b>2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN A ETANOL.</b>	<b>31</b>
2.1 Principales hipótesis y limitaciones	31
2.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso	32
2.3 Procedimientos de cálculo	34
2.4 Asignación de cargas a los co-productos	35
2.5 Balance energético	39
2.6 Vinculación con la unidad funcional	40
<b>3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE EXTRACCION Y TRANSPORTE DEL CRUDO</b>	<b>40</b>
3.1 Principales hipótesis y limitaciones	40
3.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso	42
3.3 Procedimientos de cálculo	43
3.4 Reglas de asignación	47
3.5 Balance energético	48
3.6 Vinculación con la unidad funcional	48
<b>4 ANALISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE REFINO DEL CRUDO</b>	<b>49</b>
4.1 Principales hipótesis y limitaciones	49
4.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso	49
4.3 Procedimientos de cálculo	51
4.4 Reglas de asignación	52
4.5 Balance energético	53
4.6 Vinculación con la unidad funcional	54
<b>5 ANALISIS DE INVENTARIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS MEZCLAS</b>	<b>54</b>

5.1	Principales hipótesis y limitaciones .....	54
5.2	Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso .....	54
5.3	Procedimientos de cálculo .....	55
5.4	Balance energético .....	56
5.5	Vinculación con la unidad funcional.....	57
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL USO FINAL DE LOS COMBUSTIBLES ESTUDIADOS.....</b>	<b>57</b>
6.1	Principales hipótesis y limitaciones .....	57
6.2	Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso .....	59
6.3	Procedimientos de cálculo .....	60
6.4	Vinculación de los datos con la unidad funcional.....	62
<b>SECCIÓN III. RESULTADOS .....</b>		<b>63</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>63</b>
<b>2</b>	<b>BALANCES ENERGÉTICOS.....</b>	<b>63</b>
2.1	Energía primaria total.....	63
2.2	Energía fósil .....	64
2.3	Ratio de energía fósil de la producción de etanol y gasolina 95 .....	66
2.4	Eficiencias energéticas de la producción y distribución de las mezclas estudiadas .....	67
<b>3</b>	<b>CAMBIO CLIMATICO.....</b>	<b>68</b>
<b>4</b>	<b>ESCENARIO DE INTRODUCCIÓN DE E5 Y E85 .....</b>	<b>70</b>
4.1	Descripción del escenario analizado .....	71
4.2	Ahorro de emisiones de CO <sub>2</sub> y gases de efecto invernadero .....	72
<b>SECCIÓN IV. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....</b>		<b>75</b>
<b>1</b>	<b>DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS ANALIZADOS.....</b>	<b>75</b>
<b>2</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....</b>	<b>76</b>
2.1	Fijación de carbono en el suelo en forma de rizodepósitos.....	76
2.2	Emisiones de N <sub>2</sub> O en la etapa de producción agrícola. ....	77
2.3	Origen del cereal .....	79
2.4	Análisis de sensibilidad de la distancia de transporte del grano. ....	81
2.5	Análisis de sensibilidad de la producción de las plantas de producción de etanol .....	83
2.6	Consideración del CO <sub>2</sub> producido y vendido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso.....	85
2.7	Análisis de sensibilidad de la sustitución de la electricidad de cogeneración.....	87
2.8	Análisis de sensibilidad del consumo de combustible con la mezcla E5.....	89
2.9	Análisis de sensibilidad del método de asignación.....	91
2.10	Resumen de resultados del análisis de sensibilidad .....	94
<b>SECCION V. AREAS DE MEJORA .....</b>		<b>101</b>
<b>1</b>	<b>CONSUMOS ENERGÉTICOS .....</b>	<b>101</b>
<b>2</b>	<b>CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>102</b>
<b>SECCIÓN VI. CONCLUSIONES .....</b>		<b>103</b>
<b>1</b>	<b>BALANCES ENERGÉTICOS.....</b>	<b>103</b>
<b>2</b>	<b>CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>103</b>
<b>3</b>	<b>ESCENARIO DE INTRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....</b>	<b>103</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD REALIZADOS .....</b>	<b>104</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES SOBRE LAS AREAS DE MEJORA IDENTIFICADAS .....</b>	<b>105</b>
<b>SECCIÓN VII. REFERENCIAS .....</b>		<b>107</b>

# SECCION I. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).

---

## 1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El transporte de personas y mercancías es una necesidad social que caracteriza el desarrollo humano y el crecimiento económico de un país, siendo un símbolo de progreso en las sociedades desarrolladas. Así, el sector del transporte en los países desarrollados ha alcanzado unos volúmenes de actividad tales que sus problemas ambientales cada vez son más patentes.

Dos son las características que definen al sector y determinan sus problemas ambientales asociados: la dependencia casi total de las importaciones de petróleo y la baja eficiencia energética. Como consecuencia de esto, el sector del transporte es un gran emisor de gases de efecto invernadero, uno de los principales problemas ambientales de nuestro país en la actualidad. Así, el sector del transporte en España origina un tercio de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, y estas emisiones crecen a un ritmo muy superior al del resto de sectores.

Uno de los principales retos ambientales a los que se enfrenta España actualmente es el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asumido con la ratificación del protocolo de Kyoto. El sector del transporte no está incluido en la Directiva Europea de Comercio de Emisiones por lo que la reducción de las mismas se habrá de llevar a cabo mediante actuaciones directas en el sector, sin la ayuda de otros mecanismos previstos en esta directiva.

Estas actuaciones han de ir encaminadas a reducir la dependencia del petróleo, fomentando otras fuentes alternativas, y a aumentar la eficiencia energética, empleando una cantidad menor de energía para un mismo nivel de servicio de transporte.

La introducción de biocombustibles en el sector del transporte es una de las medidas propuestas para avanzar en la consecución de los objetivos anteriores. Los biocombustibles son una fuente de energía autóctona, técnicamente viable, y que tiene el potencial de reducir sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La publicación de la reciente directiva 2003/30/EC del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la promoción del uso de los biocombustibles en el transporte ha suscitado un debate importante sobre los beneficios ambientales reales de los diferentes combustibles alternativos a los combustibles fósiles actualmente utilizados en el transporte.

La propia directiva reconoce en sus considerandos que el incremento del uso de los biocombustibles debería ir acompañado de un análisis detallado de su impacto medioambiental, económico y social para determinar la conveniencia de este incremento frente a los combustibles tradicionales.

Este impacto depende en gran medida de las condiciones particulares en las que la introducción de los biocarburantes se realice en cada país, en especial las materias primas que se usen para su obtención, los procesos de producción a partir de estas

materias primas y el uso final, bien como aditivos o bien como mezcla en mayores porcentajes, pueden determinar el balance medioambiental de la introducción de estos combustibles.

Existe una amplia bibliografía sobre Análisis de Ciclo de Vida o estudios similares de combustibles alternativos para el transporte realizada tanto en Estados Unidos como en Europa. Ninguno de estos estudios se ha realizado en las condiciones actuales de introducción de los biocombustibles en España por lo que los resultados difícilmente son extrapolables a nuestras condiciones específicas.

Es necesario, por tanto, contar con un conocimiento cuantitativo fiable del comportamiento ambiental de las diferentes opciones alternativas a los combustibles tradicionales en las condiciones de introducción reales, tanto presentes como futuras, en nuestro país para poder definir las líneas de actuación óptimas a corto, medio y largo plazo.

En este contexto la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) del Ministerio de Medio Ambiente (MMA) ha solicitado al CIEMAT el apoyo técnico para la realización de un Análisis de Ciclo de Vida de combustibles alternativos para el transporte. En una primera fase, de duración un año, se analizará el etanol de cereales en comparación con la gasolina; y en una segunda fase, de duración otro año, se analizará el biodiesel en comparación con el diesel. Otras posibles materias primas para la obtención de etanol incluyendo la biomasa lignocelulósica o bien el uso del etanol en pilas de combustible han sido propuestas también para su estudio en fases posteriores.

La utilización de la misma metodología de Análisis de Ciclo de Vida de las diferentes opciones planteadas permitirá al final del estudio disponer de una misma base para la comparación de todas ellas.

## 2 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El presente estudio de ACV ha sido solicitado por el Ministerio de Medio Ambiente al CIEMAT, en acuerdo específico de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) de dicho Ministerio y el CIEMAT.

Dentro del marco de este Análisis de Ciclo de Vida, la primera de las fases está dedicada a la realización de un ACV comparativo del **etanol** obtenido a partir **de cereales** y de la **gasolina de 95 octanos**.

En esta primera fase del estudio de ACV del etanol de cereales se ha analizado un **escenario de referencia** que será representativo de la situación en un futuro inmediato. En este escenario de referencia se ha realizado el ACV comparativo del **etanol de cereales y la gasolina EN-228 año 2003**. Se ha elegido el etanol proveniente de cereales por dos razones fundamentales: la primera, la existencia de plantas de producción de bioetanol en España en funcionamiento que usan cereales (trigo o cebada) para la obtención de bioetanol, y la segunda, el hecho de que el Plan de Fomento de Energías Renovables considera estos cultivos como la materia prima principal para la obtención de bioetanol. El etanol se considerará que se usa en mezcla directa con gasolina al 5% (E5). De forma adicional, se considerará el uso del etanol en mezcla a alto porcentaje con gasolina, en concreto la mezcla al 85% de etanol (E85). El horizonte temporal de este escenario será el año 2005. En resumen, los sistemas que se analizarán serán:

**Etanol de cereales mezclado al 5% con gasolina (E5) vs gasolina95****Etanol de cereales mezclado al 85% con gasolina (E85) vs gasolina 95**

El objetivo por tanto de este estudio es

- Evaluar y cuantificar los impactos medioambientales de dos combustibles que cumplen funciones equivalentes: el etanol obtenido a partir de cereales y la gasolina de 150 ppm de azufre, a lo largo de todo su ciclo de vida y comparar sus impactos asociados.
- Identificar y evaluar las oportunidades para reducir dichos impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida una vez detectados los impactos en cada fase del proceso (extracción, producción, transformación, distribución y uso)
- Analizar los beneficios medioambientales de los combustibles estudiados.

El estudio de ACV se ha realizado según la metodología normalizada de Análisis de Ciclo de Vida siguiendo para ello la serie de normas internacionales UNE-EN-ISO 14040-43.

La audiencia esperada para este ACV está formada en principio por los responsables de la DGCEA del Ministerio de Medio Ambiente que darán a los resultados del estudio la difusión y utilización que consideren oportuna. Las partes interesadas en este estudio de ACV recibirán asimismo los resultados de este ACV ya que formarán parte del grupo de revisión crítica del mismo. Por su parte el CIEMAT pretende publicar los resultados obtenidos en revistas científicas de difusión internacional y en congresos nacionales e internacionales.

Los resultados del ACV realizado servirán como herramienta para la toma informada de decisiones por parte del Ministerio de Medio Ambiente en relación a las distintas políticas y medidas relacionadas con la promoción de los combustibles alternativos al transporte en concreto en este caso el bioetanol.

En una fase posterior de este acuerdo específico de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) de dicho Ministerio y el CIEMAT está previsto el estudio de un **escenario prospectivo** en el que se realizará el ACV comparativo del **etanol de biomasa lignocelulósica (paja de cereal) y la gasolina 95 de 10 ppm** de azufre que será representativo de la situación a partir del año 2005. En ese año entran en el mercado las gasolinas de bajo contenido en azufre (50 ppm en 2005 y 10 ppm en 2009) y es el momento en el que se empieza a producir etanol de biomasa lignocelulósica en la planta de Abengoa de Salamanca. El etanol se considerará asimismo mezclado en mezcla directa con gasolina al 5% (E5) y al 85% (E85). Este escenario no se considera en este documento.

### 3 ALCANCE DEL ESTUDIO

#### 3.1 Funciones de los sistemas estudiados

El uso final del combustible influye en gran medida en la definición de los ciclos de vida. En nuestro caso, el énfasis en el uso del bioetanol es en el transporte de pasajeros en automóviles.

**Los sistemas estudiados cumplen la función de servir de combustible para vehículos de pasajeros de forma que se pueda recorrer con ellos un mismo número de kilómetros.**

### 3.2 Unidad funcional

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. La unidad funcional seleccionada deberá estar definida y ser mensurable.

En nuestro caso la unidad funcional que se ha elegido es la siguiente:

**La cantidad de combustible expresada en MJ de cada tipo de combustible que es necesaria para recorrer un km en un vehículo de combustible flexible (Ford Focus 1.6i 16V Zetec Flexifuel) en un ciclo de conducción determinado (Directiva 98/69/CE).**

Se ha elegido un vehículo de combustible flexible debido a que es capaz de utilizar gasolina o mezclas de este combustible con etanol a porcentajes variables indistintamente y permite así la comparación del uso de los diferentes combustibles estudiados en las mismas condiciones.

### 3.3 Sistemas estudiados

En la figura 1 se han representado esquemáticamente las etapas principales de los sistemas estudiados así como el sistema de referencia considerado.

Los tres sistemas estudiados en el Análisis de Ciclo de Vida son los siguientes:

- **Sistema A1:** Producción y uso de etanol de cereales en mezcla al 85% con gasolina (E85) en vehículos de combustible flexible circulando según el ciclo de conducción definido en la directiva 98/69/CE.
- **Sistema A2:** Producción y uso de etanol de cereales en mezcla al 5% con gasolina (E5) en vehículos de combustible flexible circulando según el ciclo de conducción definido en la directiva 98/69/CE
- **Sistema B:** Producción y uso de gasolina sin plomo 95 en vehículos de combustible flexible circulando según el ciclo de conducción definido en la directiva 98/69/CE

El sistema de referencia considerado incluye las actividades que se llevan a cabo fuera y de forma alternativa a las actividades realizadas dentro de los límites de los sistemas estudiados. Así este sistema de referencia incluye los procesos de producción de los productos a los que sustituyen los co-productos de nuestros sistemas. Por ejemplo, la paja producida en los sub-sistemas agrícolas se usa como alimento animal y sustituye a la producción de heno, de forma que si no se cultivara cereal para la producción de etanol, esta paja habría de ser sustituida por heno. Asimismo se considera la demanda de cereal para etanol, como adicional a la demanda existente y que de no cultivarse cereal para etanol las tierras estarían en retirada.

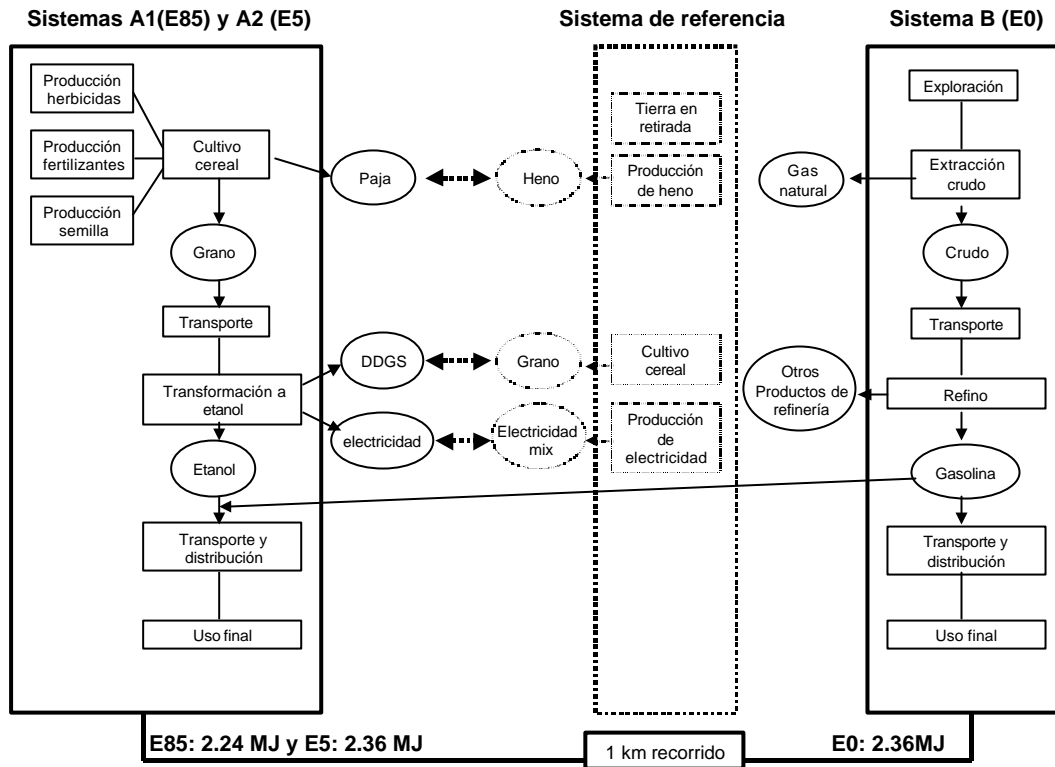


Figura 1. Esquema de los procesos implicados en los sistemas estudiados

### 3.4 Límites de los sistemas

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, y qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

**Límites geográficos.** El ACV realizado se limita al uso de la gasolina y el bioetanol en España. Eso sin embargo no quiere decir que todas las etapas de los ciclos de vida respectivos se limiten a este ámbito geográfico. El ciclo de vida de la gasolina expande este límite al incluir los procesos de extracción y transporte del crudo que se producen fuera de nuestras fronteras al ser un producto importado. El ciclo de vida del bioetanol puede incluir la producción del cereal fuera de España y su transporte hasta nuestro país si el cereal usado en la producción de etanol es importado.

Para las operaciones que se realizan dentro de nuestro país se han usado, en la medida de lo posible, datos nacionales y, cuando han estado disponibles, datos originales de los procesos reales. Para las operaciones realizadas fuera de nuestras fronteras se han usado datos medios de la industria.

**Límites temporales.** El horizonte temporal considerado es el año 2005.

**Etapas excluidas del análisis.** Para este estudio, las cargas ambientales relativas a la producción de la maquinaria e infraestructuras necesarias para la extracción, transporte y refinación del crudo se han excluido del análisis porque su contribución al balance global es muy pequeña, menor del 1% (Sheehan et al, 1998, Delucchi, 1993). Análogamente, las cargas ambientales relativas a la fabricación de la maquinaria agrícola, los vehículos

de transporte, y las instalaciones de la transformación del grano de cereal en etanol quedan excluidas. Es importante señalar que en la producción agrícola los procesos de fabricación de la maquinaria agrícola sí pueden tener una aportación algo más significativa tal y como señalan Audsley et al (1997) y Delucchi (1993); sin embargo se excluyen por coherencia con lo realizado para el caso del petróleo.

La etapa de construcción del vehículo de referencia queda asimismo excluida del análisis al utilizarse el mismo vehículo para todos los casos estudiados.

**El suelo como parte del sistema productivo.** En las etapas agrícolas de este ACV, el suelo productivo hasta la profundidad del nivel freático queda incluido dentro de los límites del sistema al considerarlo parte del sistema productivo y no parte del medio ambiente. La implicación de esta hipótesis es que como efluentes al medio ambiente se considerará solo aquella fracción de los agroquímicos aportados al suelo que alcanza las aguas subterráneas o las superficiales y no aquella parte que permanece en el mismo. Esta fracción de agroquímicos aportados al suelo que alcanzan las aguas subterráneas o superficiales se ha estimado utilizando datos publicados en la literatura científica sobre el tema.

### 3.5 Descripción de los productos estudiados y cuantificación de la unidad funcional

Las características de los combustibles estudiados utilizadas en el presente estudio se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Características de los combustibles estudiados**

	Densidad Kg/l	PCI MJ/kg	C kg/t	C fósil Kg/t	S kg/t	RVP (KPa)	
						Verano	Invierno
Gasolina	0,752	42,90	868,89	841,39	0,150	58	72
E5	0,7541	42,05	853,23	783,57	0,142	63,5	76
E85	0,7877	29,07	614,04	72,67	0,021	33,8	38,3
Etanol puro	0,794	26,75	571,45	0	0		

Fuente: AOP, IDAE, REPSOL, ABENGOA, CLH.

La gasolina estudiada se ha considerado que contiene un 4,2% en peso de ETBE (Gameson, comunicación personal) del cual un 45% es etanol.

El poder calorífico inferior (PCI) de la gasolina de referencia para este estudio es el que se muestra en la Tabla 1, según recomendación de Repsol (Baro, comunicación personal)

Las características de densidad, PCI, contenido de C y S de las mezclas E5 y E85 han sido calculadas tomando en consideración las mencionadas características de la gasolina y del etanol puro y los porcentajes en que cada uno entran en las dos mezclas.

Los datos de RVP de gasolina han sido propuestos por Repsol (Baro, comunicación personal) y están situados entre los valores permitidos para la gasolina (45-60kPa) en verano y (50-80kPa) en invierno.

Los valores de RVP de la mezcla E5 se han estimado, según propuesta de Abengoa Bioenergía (Gameson, comunicación personal) añadiendo 5,5 kPa al valor de la gasolina de verano y 4 kPa al valor de la gasolina de invierno.

Los valores de RVP de la mezcla E85 se han calculado según fórmula de CLH (F. Gómez, comunicación personal):

$$RVP_{E85} = 0,3227 * RVP_{gasolina} + 15,071$$

La unidad funcional elegida se ha referido a la cantidad expresada en MJ de cada tipo de combustible necesario para recorrer 1 kilómetro. Se ha cuantificado en términos mensurables la unidad funcional utilizando los consumos de combustible del Ford Focus Flexifuel declarados por el fabricante (Luna, comunicación personal) de gasolina y de la mezcla E85.

El consumo de combustible cuando funciona con gasolina es de 0,073 l/km y cuando funciona con la mezcla E85 de 0,098 l/km, en el ciclo de conducción considerado en la Directiva 98/69/CE. Esto supone un incremento de un 34% en el volumen de consumo de combustible para el vehículo cuando funciona con E85.

En cuanto al consumo de combustible de los vehículos con mezclas a bajo porcentaje de etanol, existen numerosas evidencias que sugieren que el menor contenido energético de la mezcla se ve compensado por una mejor combustión de la misma (ECOFYS/NOVEM, 2003; IDIADA, 2003b; Swedish Ministry of Industry, Employment and Communications, 2004). Según esto se podría considerar que el consumo de combustible del vehículo cuando funciona con la mezcla E5 es el mismo que cuando lo hace con gasolina. Sin embargo, no existe hasta el momento una evidencia cierta de que esto se produce, necesiéndose una mayor investigación en este aspecto tan importante, según reconoce un estudio reciente de la IEA sobre biocombustibles (IEA, 2004). Dado que este consumo puede afectar de forma significativa a los resultados de este estudio de ACV, se ha decidido realizar un estudio de sensibilidad sobre la influencia de este factor.

En este estudio de ACV, para calcular el consumo de combustible del vehículo con la mezcla E5 se ha realizado una interpolación entre los consumos anteriores en función del porcentaje de etanol en la mezcla resultando un consumo de 0,0745 l/km. Esto supone un incremento de consumo de alrededor de un 2%.

Como escenario alternativo para el estudio de sensibilidad se considerará que el consumo de la mezcla E5 es el mismo que el de la gasolina.

En la Tabla 2 se resumen los consumos de combustible por km recorrido considerados en este estudio de ACV.

**Tabla 2. Consumos de combustible del vehículo de referencia con cada una de las mezclas estudiadas**

	Consumo de combustible (l/km)
Gasolina	0,073
E5	0,0745
E85	0,098

Teniendo en cuenta estos consumos de combustible y los poderes caloríficos del etanol y la gasolina detallados en la Tabla 1 la unidad funcional en cada uno de los sistemas queda como sigue:

**Sistema A1: 2,24 MJ de la mezcla E85**

**Sistema A2: 2,36 MJ de la mezcla E5**

**Sistema B: 2,36 MJ de gasolina 95**

De estas estimaciones de unidad funcional se desprende que el uso de la mezcla E85 proporciona un incremento de eficiencia energética de alrededor del 5% respecto del

uso de gasolina lo cual está en línea con los datos publicados en la literatura científica sobre el tema (Delucchi, 1991, Acurex, 1996, Wang, 1999).

## 4 DATOS NECESARIOS. REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MISMOS.

Una vez definido el objetivo y alcance del ACV a realizar es necesario definir las fuentes de datos más importantes y los datos recopilados.

En la medida de lo posible los datos han sido recogidos de instalaciones productivas específicas vinculadas a los procesos. Se han seleccionado los procesos cuya contribución a los flujos de masa y energía se espera sea importante y cuyas emisiones se espera sean relevantes para el medio ambiente. Estos procesos son los incluidos en la producción agrícola de los cereales, en la transformación a etanol, los procesos que se desarrollan en la extracción y refinado del petróleo y los procesos en la etapa de combustión de los combustibles en los motores. Para ello se han solicitado datos a las siguientes entidades:

- Abengoa Bioenergy. Datos relativos a sus plantas de producción de etanol de Cartagena y Curtis
- AOP. Datos relativos a la extracción, transporte y refinado del petróleo para producir gasolina en las refinerías españolas.
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid. Datos relativos a las etapas de producción agrícola de los cereales en España.
- ANFAC. Datos relativos a las emisiones y consumos de combustible del vehículo de referencia con los distintos combustibles considerados.

Para los procesos en los cuales no se dispone de datos primarios, se ha recurrido a la utilización de datos de fuentes ya publicadas. Asimismo, el estudio de los datos publicados en procesos similares a los de este análisis ha permitido realizar una validación de los datos primarios recogidos, así como disponer de unos rangos de variación de los datos para realizar estudios de sensibilidad.

Los requisitos de calidad de los datos recogidos han sido los siguientes:

**Ámbito temporal de los datos.** Los datos recogidos deben referirse preferiblemente a los últimos cinco años.

**Ámbito geográfico de los datos.** Los datos recogidos deben referirse preferiblemente a las zonas donde tienen lugar los procesos.

**Ámbito tecnológico.** El desarrollo de la tecnología a considerar debe ser, como se ha especificado anteriormente, la tecnología actualmente empleada en los procesos considerados.

Se han utilizado bases de datos publicadas y disponibles en la herramienta informática SIMAPRO 5.1(<http://www.pre.nl/simapro>) para los procesos más comunes como transportes, combustibles y productos químicos básicos. Las bases de datos a usadas son las siguientes:

- ETH-ESU 96.

ETH Zurich, Ökoinventare von Energiesysteme (Frischknecht et al. 1996). Inventario de datos para Suiza y Europa occidental de procesos relacionados con el suministro de energía.

Contiene datos sobre materiales (construcción, sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc.), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros.

En nuestro estudio se utilizará para los procesos de generación de energía y en los procesos donde intervienen sustancias químicas. También para construir una base de datos específica y actualizada del sistema eléctrico español.

- BUWAL 250.

BUWAL, Ökoinventare für Verpackungen (BUWAL 250). Inventario de materiales de empaquetado realizada por EMPA para el Instituto Suizo de Empaquetado.

Contiene datos sobre materiales (sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros.

En nuestro estudio se utilizará en los procesos donde intervienen sustancias químicas y transporte.

Además, para algunos procesos de las actividades agrícolas se ha utilizado la base de datos:

- LCAFood, (LCAFOOD) desarrollada dentro del proyecto “Life Cycle assessment of Basic Food (LCA)”.

## **5 HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA.**

El presente estudio de ACV se ha realizado utilizando una herramienta informática comercial denominada SIMAPRO 5.1(<http://www.pre.nl/simapro>).

SimaPro es una herramienta desarrollada por Pré Consultants para el Análisis de Ciclo de Vida que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de una manera sistemática y consistente siguiendo las recomendaciones de las normas ISO serie 14040.

La primera versión de SimaPro data de 1990 y desde entonces ha sido utilizado por empresas, consultoras, universidades y centros de investigación en multitud de estudios lo cual avala su capacidad y potencial en este tipo de análisis.

### **5.1 La Base de Datos**

Una de los principales elementos del programa es la Base de Datos. Esta Base de Datos puede contener varias librerías o proyectos que a su vez agrupan diferentes procesos. Todas las entradas y salidas de un proceso están definidas en el registro de la base de datos de ese proceso. Los procesos se separan en siete categorías: materiales, energía, transporte, procesado, uso, escenario de residuos y tratamiento de residuos. Además, la base de datos contiene datos de carácter general como son los nombres de sustancias, las unidades de medida, referencias de la literatura, etc..

La base de datos por defecto contiene librerías de distintos autores con datos de energía, industriales, materiales, transporte y métodos de evaluación de impacto.

### **5.2 Los indicadores de calidad de los datos**

Otro elemento importante de SimaPro es el sistema de indicadores de calidad de los datos basado en los requisitos expuestos en la ISO 14041. Este sistema evalúa la idoneidad de los datos asignándoles una puntuación ponderada teniendo en cuenta el perfil que se haya definido en el objetivo y alcance: periodo de tiempo, región del estudio, tipo de tecnología, límites del sistema, etc... En este sentido, los datos primarios utilizados en este ACV son de máxima calidad.

### 5.3 El inventario de ciclo de vida

Una vez se han detectado qué datos son los necesarios para el análisis se procede a hacer el inventario del ciclo de vida. Primero se buscan y recogen aquellos datos que no están contenidos en las librerías de la herramienta y se introducen en los registros de los procesos de la forma en que se ha detallado en las secciones anteriores. Después SimaPro genera automáticamente un árbol de procesos o diagrama de flujos uniendo todos los procesos.

### 5.4 La evaluación de impacto

SimaPro incluye varios métodos de evaluación de impacto reconocidos. Todos utilizan el procedimiento de caracterización por el cual se calcula la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada. Además algunos métodos también utilizan otros procedimientos como la evaluación de daño (Eco-Indicator 99), la normalización o la ponderación. El programa también permite crear métodos propios de evaluación de impacto, que es la opción utilizada en este estudio.

## 6 REVISIÓN CRÍTICA

El proceso de revisión crítica es necesario en este estudio de ACV al tratarse de un aserto comparativo entre dos productos que cumplen la misma función, el etanol de cereales y la gasolina. Esto se hace con el objetivo de evitar al máximo la posibilidad de discrepancias o efectos negativos en las partes interesadas.

Tal y como señala la norma UNE-EN-ISO 14040, la revisión crítica deberá asegurar que:

- los métodos usados en el ACV son consistentes con dicha norma internacional
- los métodos usados en el ACV son científica y técnicamente válidos
- los datos usados son apropiados y razonables en relación con el objetivo del estudio
- las interpretaciones reflejan las limitaciones identificadas y el objeto del estudio
- el informe del estudio es claro y consistente

Objetivos adicionales del proceso de revisión crítica son los siguientes:

- identificar los interlocutores que pueden contribuir a la recolección de los datos
- identificar los parámetros que caracterizarán al escenario prospectivo según la perspectiva de los diferentes actores del sector.
- validar los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo esta revisión crítica se ha formado un **grupo de revisión crítica** integrado por expertos de ACV externos así como por representantes de las partes interesadas.

Los integrantes de este grupo de revisión crítica son las siguientes personas:

- Doña Montserrat Fernández San Miguel de la DGCA del Ministerio de Medio Ambiente
- D. Eduardo Pallaró del Ministerio de Medio Ambiente.
- D. Ginés de Mula González de Riancho de Abengoa Bioenergía.
- D. Pedro Carrillo Donaire de Abengoa Bioenergía.
- D. Thomas Gameson de Abengoa Bioenergía
- D. Gerson Santos-León de Abengoa Bioenergía R&D
- D. Gonzalo del Castillo Ramírez de la Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP)
- D. José Baro Calle de REPSOL YPF

- D. Miguel Lagarejos García de la Compañía Española de Petróleos (CEPSA)
- Dr. Jesús Fernández de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- D. Manuel Luna de Ford
- D. Carlos Mataix Kubusch de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC)
- D. Miguel Fraile de IVECO
- Dra. Mercedes Ballesteros del proyecto de Biocombustibles Líquidos del CIEMAT

Expertos de ACV externos independientes:

- M<sup>a</sup> Teresa Bosch i Vilardell de RANDA GROUP
- Veronica Borghi de RANDA GROUP

Adicionalmente a este grupo de revisión crítica, a lo largo del estudio, Dr Mark Delucchi (<http://www.its.ucdavis.edu/faculty/delucchi.htm>) de la Universidad de Davis (California) y el Dr. John Sheehan (<http://www.nrel.gov/biomass/bios.html#Sheehan>) del National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos han sido consultados.

Durante este proceso de revisión crítica se han realizado dos informes de revisión y una reunión del grupo revisor.

El primero de los informes de revisión definía el objetivo y alcance del estudio de ACV y fue mandado a todos los miembros del grupo revisor para sus comentarios. Dichos comentarios fueron incluidos en la versión final del mismo y los contenidos de los mismos quedan reflejados en el presente documento.

El segundo de los informes de revisión definía la metodología a seguir para realizar el estudio. Este documento fue presentado ante el grupo revisor en una reunión que tuvo lugar en CIEMAT el día 26 de enero de 2004 . En dicha reunión se discutieron los puntos más controvertidos de la metodología. Las modificaciones a la metodología propuestas en la reunión fueron incorporadas a la versión final de este documento metodológico y los contenidos de las mismas quedan reflejadas en el presente documento.



## SECCION II. ANÁLISIS DE INVENTARIO

### 1 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA.

#### 1.1 Principales hipótesis y limitaciones

La metodología empleada en el análisis de inventario de la actividad agrícola está fundamentalmente basada en la metodología desarrollada en la acción Concertada AIR3-CT94-2028 de la Comisión Europea “Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture” (Ausdley et al, 1997).

A continuación se detallan algunas de las principales hipótesis metodológicas hechas en el inventario de la actividad agrícola que entra a formar parte de los sistemas A1 y A2.

##### 1.1.1 Origen del cereal

El origen del cereal usado en las plantas de producción de etanol es tanto nacional, cultivado en zonas cerealistas españolas y transportado por tierra a la planta de producción de bioetanol, como importado y transportado por tierra o mar hasta la planta de transformación. Según información recibida de Abengoa Bioenergía, el porcentaje de uso de cereal importado o nacional es variable y dependiente del precio del mismo. En la planta de Bioetanol Galicia el trigo usado es fundamentalmente importado de países europeos, aunque se pretende contratar la máxima superficie posible de producción de trigo nacional en tierras de retirada. En el caso de Ecocarburantes, la cebada usada es en gran porcentaje de origen nacional procedente del cultivo en tierras de retirada de toda la geografía española, aunque una parte también es cebada de origen europeo.

**En este estudio de ACV se considera que se utiliza un 100% de cereal nacional. Posteriormente se ha hecho un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de considerar el uso de cereal importado.**

La localización de las plantas de producción de etanol de Abengoa Bioenergía, en zonas costeras próximas a grandes puertos, sugiere que el abastecimiento de materia prima es fundamentalmente por vía marítima, por lo que en principio parece que estuvieran diseñadas para operar con materia prima importada. Es por esto que la consideración de un escenario de abastecimiento en un 100% de cereal nacional es poco realista, ya que las distancias de transporte serían demasiado largas. Es por eso que, en el estudio de sensibilidad, se ha pretendido evaluar la influencia del parámetro de distancia de transporte. Para ello,

**se ha estudiado un escenario alternativo hipotético en el que las plantas de producción de etanol están localizadas más cercanas a las zonas de producción del cereal.**

##### 1.1.2 Fuentes de datos

Las etapas agrícolas son etapas muy importantes en cuanto a su contribución a los resultados de los estudios de ACV de biocombustibles tal y como puede constatarse en

los estudios relevantes consultados (Gover et al, 1996; ECOBILAN, 2002; General Motors, 2002). Debido a ello se ha tomado especial cuidado en la selección de los datos agrícolas a utilizar en el presente estudio de ACV.

Para el estudio de la **producción nacional de trigo y cebada** se han utilizado los datos proporcionados por el Laboratorio de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal y Botánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. Estos datos están basados en la práctica real del cultivo de cereal en la zona de Castilla y León que se ha considerado que sería la zona productora de cereal nacional para ambas plantas "Bioetanol Galicia" en Curtis (A Coruña) y "Ecocarburantes" en Cartagena. Se ha considerado esta zona por ser la zona de mayores producciones de cereal entre las que tenemos datos disponibles. Se ha considerado que este cereal se transporta en camiones hasta las plantas de producción de etanol.

Los datos obtenidos de los cultivos de trigo y cebada son datos referidos a la práctica habitual de estos cultivos en la zona productora considerada. La menor productividad observada en comparación con zonas cerealistas europeas, hace que se minimicen las prácticas culturales y los aportes de agroquímicos con el objetivo de reducir al máximo los gastos de los cultivos.

En este estudio se ha optado por considerar la práctica habitual en cuanto a laboreo, tratamientos y fertilizaciones de la zona productora frente a otras prácticas más acordes con las condiciones teóricas de producción, por considerar que esto refleja mejor las condiciones reales de producción de los cereales para bioetanol en España.

Para el estudio de sensibilidad sobre el origen del cereal, los datos de **producción del trigo importado** se ha tomado los datos obtenidos por Audsley et al( 1997) para el cultivo intensivo de trigo en Gran Bretaña. Estos datos se basan en la producción en régimen intensivo de trigo con altos insumos de fertilización y tratamientos fitosanitarios, representativos de la producción en Gran Bretaña. En este sistema el 40% de la paja se embala y el resto se incorpora al suelo. El rendimiento en grano es de 8t/ha. Para el caso de la **producción de cebada importada** se han tomado los datos existentes en la base de datos LCAFOOD (Halberg, N y P. Nielsen, 2003). Esta base de datos describe la producción de estos cultivos en las condiciones de cultivo danesas. Los datos se basan en la producción de ocho fincas agropecuarias con producción ganadera y agrícola con diferentes tipos de suelo y técnicas de producción representativas de la producción agropecuaria danesa. Los rendimientos agrícolas varían entre 5 y 7,9 t/ha de trigo y entre 3,7 y 5,9 t/ha de cebada.

### **1.1.3 Escenario de referencia**

A la hora de determinar las cargas ambientales atribuibles a la producción de grano de cereal para producción de bioetanol es necesario definir el destino alternativo de las tierras cultivadas con este objetivo en el caso de que no existiera esta producción de bioetanol.

**En este estudio de ACV el escenario de referencia considerado consiste en dejar la tierra en retirada.**

Se ha considerado que la demanda de cereal permanece fija y que la instalación de plantas de producción de bioetanol produce una demanda adicional de grano por la cual tierras que antes eran dejadas en retirada son puestas en cultivo.

En estas tierras de retirada se realizan dos labores de cultivador anuales, cuyas cargas ambientales se restan a las cargas de nuestros sistemas agrícolas para obtener las cargas ambientales netas de los mismos.

#### 1.1.4 **Modelización de la fijación de CO<sub>2</sub> por la biomasa**

El crecimiento del cultivo supone un importante sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico debido a la fijación de este gas en el proceso de fotosíntesis de las plantas para formar compuestos de carbono orgánicos utilizados en su crecimiento. El CO<sub>2</sub> fijado en la parte del cultivo que se exporta del terreno tiene dos destinos finales. La parte fijada en el grano se transformará a su vez en 1) etanol que se quemará en el motor del vehículo considerado emitiendo entonces las correspondientes cantidades de CO<sub>2</sub>, 2) CO<sub>2</sub> liberado en el proceso de fermentación y 3) C contenido en los DDGS (Distilled Dried Grains and Solubles).

Para tener en cuenta que este CO<sub>2</sub> se ha fijado previamente en el cultivo, las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas provenientes de la combustión del etanol, de la fermentación y del uso de los DDGS no se han contabilizado como emisiones y se han considerado como cero.

Por otra parte, la paja tiene uso como alimento del ganado, de forma que todo el C fijado en ella termina al final mineralizado en forma de CO<sub>2</sub>. La fijación de C en esta parte del cultivo no se ha considerado, pero tampoco se ha considerado una emisión del proceso al ser un carbono fijado previamente.

El CO<sub>2</sub> se fija tanto en la parte del cultivo que se cosecha (grano y paja) como en aquellas partes que quedan en el terreno (rastros y raíces). Después de la cosecha, los residuos de los cultivos se mineralizan en gran parte y vuelven a la forma de CO<sub>2</sub>, pero una parte del carbono absorbido por las plantas se transfiere al suelo en forma de rizodepósitos. Estos depósitos son formas inmovilizadas de C que no se transforman de nuevo en CO<sub>2</sub> y por tanto se consideran como una fijación neta de CO<sub>2</sub> atmosférico por el cultivo.

Para cuantificar esta cantidad de carbono fijado en el suelo se han usado resultados de estudios experimentales en cereales de invierno. Una revisión de estos estudios se puede encontrar en Kuzyakov y Domanski, (2000). De esta revisión se concluye que como media los cereales transfieren un 20-30% del carbono asimilado al suelo. La mitad de este C forma parte de las raíces y se transforma al final en CO<sub>2</sub>. Una tercera parte es emitida desde el suelo por la respiración de las raíces y por la utilización microbiana de sustancias orgánicas de las raíces. El resto se incorpora al suelo- adsorbido en los minerales arcillosos, en la materia orgánica o en los microorganismos del suelo- como una fijación neta de CO<sub>2</sub> atmosférico. Como media, esa fijación permanente de C es alrededor de 250 kgC/ha para productividades de cereal de 6 t/ha, por lo que el C fijado en el suelo es alrededor de 41,67 kgC/t biomasa.

En estudios realizados en condiciones españolas en cultivo de sorgo se han obtenido valores de fijación de C en el suelo de 30 kg C/t de biomasa (Fernández, et al, 2003).

**Como escenario base se ha considerado que existe una fijación neta de CO<sub>2</sub> en el suelo de 41,67 kgC/t de biomasa, y como escenario alternativo para análisis de sensibilidad se ha considerado que no existe tal fijación neta de C.**

Teniendo en cuenta las productividades de los cultivos de trigo y cebada considerados, la fijación de CO<sub>2</sub> en forma de rizodepósitos en el suelo se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3. Fijación de C en rizodepósitos**

	<b>Rendimiento del cultivo (t grano/ha)</b>	<b>C fijado en rizodepósitos (kg C/ha)</b>	<b>CO<sub>2</sub> fijado en rizodepósitos (kg CO<sub>2</sub>/ha )</b>
Trigo	3,409	142,05	520,86
Cebada	2,97	123,76	453,79

En los sistemas agrícolas considerados existen emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de las labores realizadas en los cultivos y en la producción y transporte de los diferentes insumos agrícolas. Estas emisiones son las que se han contabilizado como emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas agrícolas considerados.

### **1.1.5 Balances energéticos. Cálculo de la energía primaria**

Los balances energéticos de los sistemas estudiados se han determinado en función de uso de energía primaria. Para hacer la transformación a energía primaria de la energía eléctrica usada en los procesos considerados se han realizado las siguientes consideraciones:

- la energía hidráulica y eólica se consideran energía primaria y el factor de conversión a energía primaria se considera 1.
- Las centrales de carbón se ha considerado que tienen un rendimiento eléctrico de un 35,5% (IDAE, 2002) y por tanto su factor de conversión a energía primaria es de 2,82
- Para las centrales nucleares se considera un rendimiento de un 33% (IDAE, 2002) y por tanto su factor de conversión a energía primaria es de 3,03.
- Las centrales de fuel y gas convencionales tienen un rendimiento de alrededor de un 37% (IDAE, 2002) y por tanto su factor de conversión a energía primaria es de 2,70
- Las centrales de ciclo combinado tienen un rendimiento de alrededor de un 51% (IDAE, 2002) y por tanto se ha considerado un factor de conversión de 1,96.

Teniendo en cuenta la proporción en que cada una de estas fuentes entra en la producción de energía eléctrica en España (Red Electrica, 2002) y en Europa (Frischknecht et al, 1996) se han obtenido los factores de conversión de energía primaria para la electricidad producida en España y en Europa. Estos factores son los siguientes:

**Tabla 4. Factores de conversión a energía primaria para la electricidad**

	<b>Factor de conversión</b>
España	2,39
Europa	2,60

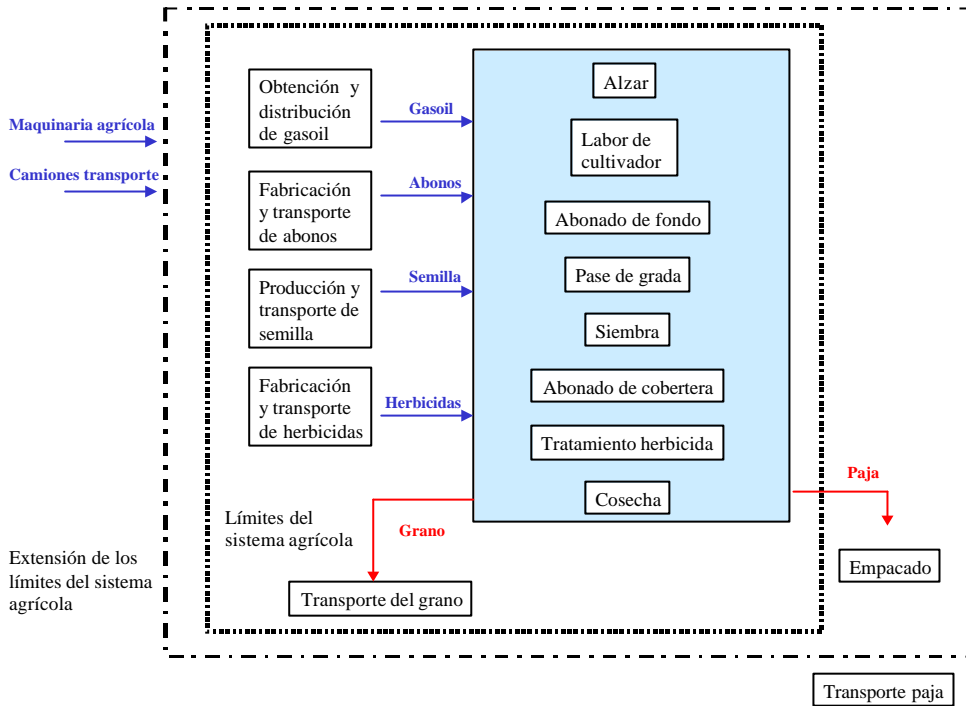
Estos factores de conversión a energía primaria se han usado para convertir la electricidad en energía primaria en todos los balances energéticos de todos los procesos considerados en este estudio de ACV.

## **1.2 Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso**

En la Figura 2 se muestra un esquema de las actividades consideradas en los sistemas agrícolas estudiados. Dentro de los límites del sistema incluimos todas las labores agrícolas que se realizan en el cultivo así como todos los procesos de producción de los diferentes insumos agrícolas: gasoil, herbicidas, abonos y semilla. Dado que el proceso tiene un co-producto con valor y uso en el sistema económico que es la paja, incluimos también los procesos de empacado de la paja para luego asignar las diferentes cargas del

sistema total a los dos co-productos en base a reglas de asignación que se discuten posteriormente.

Fuera de los límites del sistema quedan los procesos de fabricación de maquinaria agrícola y camiones de transporte y el transporte del grano hasta la planta de producción de bioetanol, así como el transporte de la paja hasta su uso final.



**Figura 2.** Esquema de las actividades de la producción agrícola en los sistemas considerados

En la Figura 3 y Figura 4 se muestran diagramas del proceso de producción de trigo y cebada con las entradas de materia y energía referidas a una hectárea de cereal, trigo o cebada respectivamente.

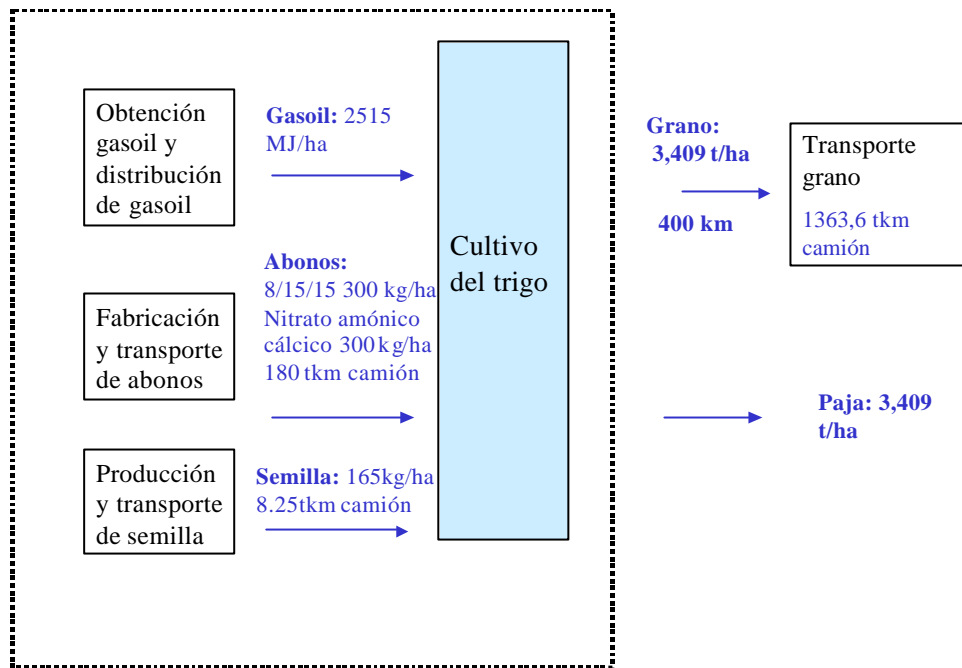


Figura 3. Diagrama del proceso de producción de trigo

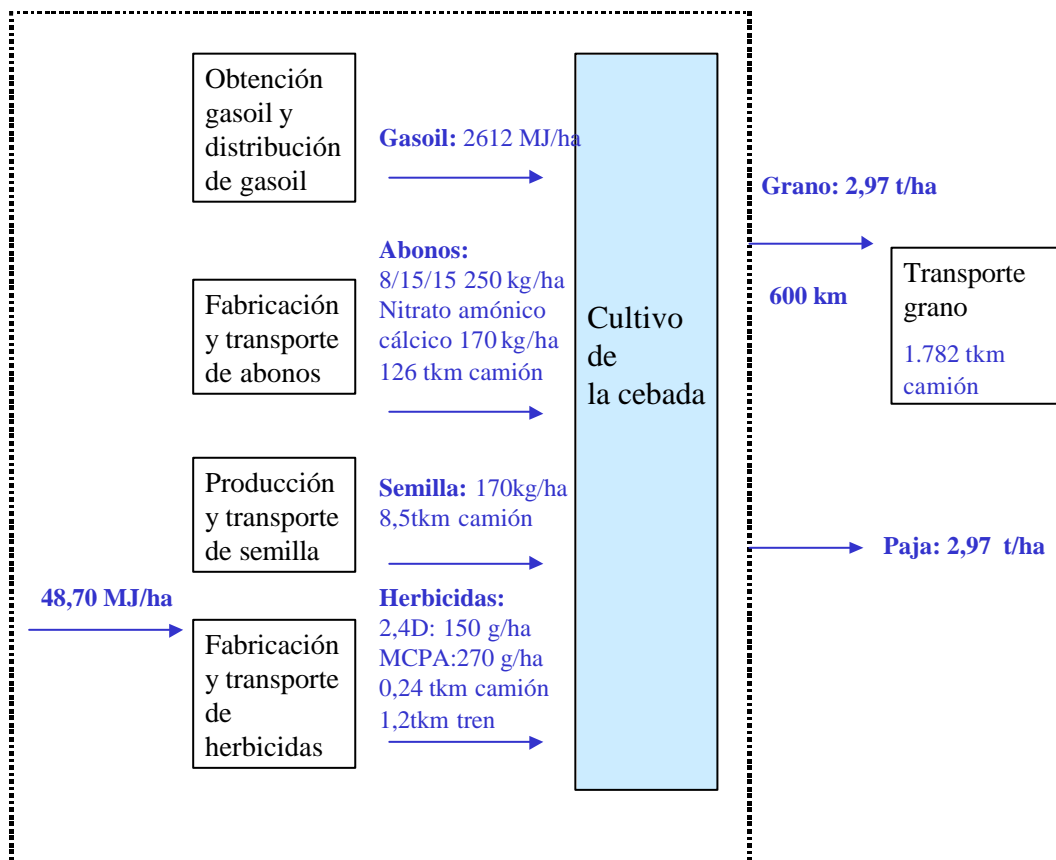


Figura 4. Diagrama del proceso de producción de cebada

Las entradas de energía y materias primas de los procesos de obtención de gasoil, fertilizantes y transportes se han obtenido de bases de datos que se han detallado anteriormente y no están especificadas en estos diagramas.

### **1.3 Procedimientos de cálculo**

#### **1.3.1 Producción y transporte de la semilla de siembra**

La producción de semilla de siembra se ha considerado en todo similar a la producción de trigo o de cebada de los sistemas que se están estudiando. Únicamente se ha considerado un menor rendimiento por ha (80%). La superficie necesaria para producir la semilla de siembra (0,06 has para el sistema trigo, y 0,07 has para el sistema cebada) se añade al área necesaria de producción de trigo o cebada. De esta forma las cargas ambientales de la producción de trigo o cebada se multiplicarán por los factores siguientes: 1,06 para trigo y 1,07 para la cebada, para permitir la producción de la cantidad necesaria de semilla de siembra.

#### **1.3.2 Producción de fertilizantes**

La producción de fertilizantes, especialmente los nitrogenados, es una de las etapas de la actividad agrícola que más peso tiene en los análisis de inventario de producción de cereales suponiendo un porcentaje elevado, 40-70%, en los estudios relevantes consultados (Audsley et al, 1997; Gover et al, 1996; ECOBILAN 2002).

Por esta razón se ha tomado especial cuidado en la toma de datos relativos a la producción de fertilizantes. Los datos de materias primas, energía y emisiones de los procesos de producción de estos fertilizantes se han obtenido de la Asociación Europea de fabricantes de fertilizantes (EFMA, 2000a, 2000b) y son los relativos a las mejores técnicas disponibles para la producción de estos compuestos. Los datos sobre emisiones relacionadas con el uso de energía en la fabricación de los fertilizantes se han obtenido de la base de datos ETH (Frischknecht et al, 1996) .

#### **1.3.3 Producción de herbicidas**

La energía necesaria para los procesos de fabricación de estos herbicidas se han estimado utilizando el método propuesto por Audsley et al (1997) basado en los datos publicados por Green (1987).

Los datos sobre emisiones relacionadas con el uso de energía en la fabricación de los herbicidas se han obtenido de la base de datos ETH (Frischknecht et al, 1996) .

#### **1.3.4 Transporte de los insumos agrícolas**

En el análisis de inventario se incluyen las etapas de transporte de los distintos insumos agrícolas desde los centros de producción hasta la parcela de cultivo. Las cargas ambientales de este transporte se han obtenido usando la base de datos BUWAL (BUWAL 250).

#### **1.3.5 Uso de energía y emisiones asociadas a las labores agrícolas**

En el análisis de inventario se incluyen las labores agrícolas y los consumos de combustible diesel asociados a ellas. Las cargas ambientales asociadas a la extracción, refinado y transporte del combustible diesel de la maquinaria usada se han obtenido de la base de datos BUWAL (BUWAL 250). Las emisiones de la combustión del diesel en los tractores se han estimado utilizando los factores de emisión propuestos por Weidema y Mortensen (1995) usado por Audsley et al (1997).

### **1.3.6 Emisiones de N<sub>2</sub>O desde el suelo agrícola**

Estas emisiones suponen una fuente importante de gases de efecto invernadero. Su cuantificación es extremadamente incierta puesto que son muy variables dependiendo de las condiciones concretas de humedad y temperatura del terreno en cada momento.

Para estimar las cantidades de óxido nitroso emitidas al aire existen varias metodologías.

En primer lugar está la metodología propuesta por el IPCC (IPCC, 1996) que estima que las pérdidas de N en forma de óxido nitroso son un  $(1,25 \pm 1)\%$  del nitrógeno aplicado. Este rango engloba el 90% de los valores de emisión obtenidos en campo y publicados por Bouwman (1994).

Skiba et al (1996) realizaron ensayos de medida de las emisiones de óxido nitroso en cereales de invierno en el Reino Unido y los resultados fueron de un 0,5% de las aportaciones de N en fertilización. Este valor está dentro del rango propuesto por el IPCC.

Kaiser et al (1998) realizaron ensayos en Alemania durante un periodo de 33 meses y observaron pérdidas de N<sub>2</sub>O entre un 0,7% y un 4,1% del N aportado en la fertilización, correspondiendo los valores más bajos al trigo de invierno.

La metodología propuesta por Audsley et al (1997) se basa en valores derivados por Armstrong-Brown en función del tipo de fertilizante y la época de aplicación. En nuestro caso se aplica un fertilizante compuesto cuyo nitrógeno está en forma amoniacal como fertilización de fondo en septiembre-octubre al que le corresponde unas pérdidas de N en forma de óxido nitroso de un 0,5% y nitrato amónico cálcico en cobertera en febrero-marzo al que le corresponden unas pérdidas de un 1,05%. Ambos valores están también dentro del rango contemplado por el IPCC.

La metodología desarrollada por Freibauer (2002) está basada en factores de regresión obtenidos a partir de una revisión de estudios de campo de emisiones de N<sub>2</sub>O en Europa. Esta metodología diferencia entre suelos oceánicos y bajos de clima templado, y suelos prealpinos, alpinos y subboreales. El estudio reconoce que existen muy pocos estudios en suelos mediterráneos y sugiere aplicarles los mismos factores que a los suelos oceánicos. Se aplicó la fórmula de regresión propuesta a una muestra de 114 suelos de las zonas de Guadalajara, Badajoz y Albacete (Obrador, 1993; Lechón, 1996) con contenidos de carbono orgánico comprendidos entre 0,5 y 0,8% y contenidos de arena entre 35 y 54%, y los resultados obtenidos variaron entre -69 y 8,6 kgN/ha con una media alrededor de -22 kgN/ha para ambos cultivos, lo que da una idea de la poca adecuación de la fórmula de regresión propuesta a las situación de los suelos españoles con contenidos de carbono orgánico extremadamente bajos. Por ello esta metodología no ha sido considerada.

Algunas experiencias realizadas en España (Vallejo, 2003) en cereales de invierno en secano dan valores que oscilan entre un 0,56 y un 1,36% del N aportado en la fertilización. Son estos valores, al haber sido obtenidos en las condiciones de cultivo de los cereales españoles, los que consideramos se adecuan más a los valores que se puedan estar produciendo en los cultivos de trigo y cebada para producción de etanol en nuestro país.

**Como valor de referencia para las emisiones de óxido nitroso de este estudio de ACV se ha tomado el 1% del N aportado en la fertilización, y como valores alternativos para análisis de sensibilidad los valores extremos propuestos por el IPCC que engloban la mayoría de los valores experimentales obtenidos.**

### 1.3.7 Transporte del grano hasta las plantas de etanol

Según información recibida de Abengoa Bioenergía, el cereal de origen nacional se transporta hasta las plantas en camión. Se ha considerado una distancia de transporte media de 400 km para el trigo de Castilla y León que va a la planta de Curtis, y de 600 km para la cebada de Castilla y León que va a la planta de Cartagena.

Para el estudio de sensibilidad, se considera que el trigo importado para la planta de Bioetanol Galicia se transporta 615 km en barco hasta el puerto, que está situado a 65 km de la planta hasta donde se transporta en camiones. La cebada importada para la planta de Ecocarburantes se transporta 1506 km por barco hasta el puerto de Cartagena situado a 7,8 km de la planta. Del puerto a la planta se transporta en camiones.

Se ha considerado que el trigo importado se embarca en el puerto inglés de Southampton y la cebada importada se embarca en el puerto danés de Aalborg y se desembarcan en los puertos de A Coruña y Cartagena para las plantas de Bioetanol Galicia y Ecocarburantes respectivamente.

Las cargas ambientales de todos estos transportes se han obtenido usando la base de datos BUWAL (BUWAL 250).

## 1.4 Reglas de asignación

Los sistemas agrícolas considerados producen, además del grano, otro producto con valor comercial y con uso fuera del sistema, que es la paja del cereal. La paja del cereal se vende para su uso como alimento del ganado y por tanto, según señala la norma UNE-EN-ISO 14040, “los flujos de materia y energía así como las emisiones al medioambiente asociadas se deberán asignar a los diferentes co-productos de acuerdo con procedimientos claramente establecidos, que serán documentados y justificados”.

Son varios los métodos de asignación que pueden aplicarse a un problema de co-producción como el que nos ocupa pero la norma UNE-EN-ISO 14040 señala una jerarquía clara:

- 1) Siempre que sea posible se evitará la asignación por medio de:
  - a) La **división del proceso en dos o más subprocesos** y la recogida de los datos de entrada y salida relacionadas con estos subprocesos. En el caso que nos ocupa está subdivisión no es posible.
  - b) La ampliación del sistema producto hasta incluir las funciones adicionales relacionadas con los co-productos. Es lo que se denomina evitar la **asignación por extensión de los límites del sistema**. Este método consiste en tener en cuenta las cargas ambientales correspondientes a la paja y restar las cargas ambientales que se producen en un sistema alternativo que proporciona el mismo servicio que el que proporciona la paja.
- 2) Cuando no se pueda evitar la asignación, ésta se realizará de forma que refleje las relaciones físicas existentes entre los diferentes co-productos. Este método de asignación deberá reflejar la forma en que las entradas y salidas del sistema se ven modificadas por cambios cuantitativos de los productos o funciones generadas por el sistema. Este método se denomina **asignación en base a relaciones físicas o asignación marginal**. Este método de asignación consiste en medir los efectos en las cargas del sistema de cambiar en una pequeña cantidad la salida de un co-producto (grano) manteniendo el otro (paja) constante. Cualquier cambio que se produzca en las cargas del sistema, se asignará al co-producto que cambia (en nuestro caso al grano).
- 3) Cuando no sea posible concretar una relación física se deben asignar las entradas entre los distintos co-productos de forma que reflejen las otras relaciones que guardan entre sí. Ejemplos de este tipo de asignación serían:

- a) **la asignación en base a la composición.** En este método se determina una propiedad común de los co-productos que es representativa de su función y las cargas ambientales se reparten en función de los valores relativos de esta propiedad. En nuestro caso es difícil elegir una propiedad común ya que la función de cada subproducto es diferente: el grano se empleará para producir etanol, para lo cual se podría usar el contenido de almidón y azúcares como parámetro relevante, y la paja para alimentación animal, en cuyo caso parámetros relevantes podrían ser la energía metabolizable o la proteína digestible. La elección del parámetro no es obvia y este sistema de asignación se ha descartado.
- b) **la asignación en base al valor económico.** En este método se eligen los valores económicos de los distintos subproductos en el punto en que se separan en el sistema. Sería el valor del grano cosechado y el valor de la paja sin empacar en el campo.

**El método de asignación de extensión de los límites del sistema es el que se ha usado en nuestro estudio.**

Sin embargo, tal y como señala la norma UNE-EN-ISO 14041, ya que existen varios métodos alternativos que en teoría son aplicables, también se han utilizado en un análisis de sensibilidad para conocer qué consecuencias conllevaría el hecho de desviarse del método seleccionado.

**El método alternativo que se ha usado es la asignación en base al valor económico.**

#### **1.4.1 Asignación por extensión de los límites del sistema.**

Este método consiste en tener en cuenta las cargas ambientales correspondientes a la paja y restar las cargas ambientales que se producen en un sistema alternativo que proporciona el mismo servicio que el que proporciona la paja. Este servicio, en nuestro caso es la alimentación animal. Como sistema alternativo a la paja hemos considerado la producción de heno de alfalfa. El uso de la paja del trigo o la cebada de nuestros sistemas permite reducir la cantidad de producción de alfalfa para heno en el sistema económico, por tanto los impactos producidos por estos sistemas se evitan.

El cultivo de alfalfa considerado tiene las siguientes características:

- Duración del cultivo: 4 años
- Labores realizadas:
  - Año de implantación:
    - Alzar
    - Enmienda caliza (2 t cal apagada/ha)
    - Abonado de fondo (20kg N/ha; 175kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; 250kg K<sub>2</sub>O/ha)
    - Tratamiento herbicida presiembra (Benfluralina 18% p/v 6,5l/ha)
    - 3 Pase de grada
    - Pase de rodillo
    - Siembra (Dosis:16kg/ha)
    - Tratamiento herbicida postemergencia (Propizamida 50% PM 1,5kg/ha)
    - Cosecha ( 6 cortes con segadora acondicionadora) Producción en verde (80% humedad): 44,56 t/ha y año
    - Empacado del heno. Producción en heno (18% humedad): 29,21 t/ha y año

- 2º-4º año  
Fertilización de cobertera (150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha; 200 kgK<sub>2</sub>O/ha)  
Tratamiento herbicida postemergencia (Propizamida 50% PM 1,5kg/ha)  
Cosecha ( 7 cortes con segadora acondicionadora) Producción en verde (80% humedad): 44,56 t/ha y año  
Empacado del heno. Producción en heno (18% humedad): 34,08 t/ha y año

La metodología seguida para calcular las cargas ambientales de este cultivo es igual a la seguida para el cálculo de las cargas ambientales del cultivo de trigo y cebada.

#### 1.4.2 Asignación en base al valor económico

Este método de asignación consiste en tomar como parámetro relevante para realizar la asignación de las cargas ambientales, el valor económico de los co-productos en el momento en que se separan en el sistema. Sería por tanto el valor económico del grano cosechado en campo y el valor económico de la paja en campo antes de empacar.

El precio del cereal en origen se ha obtenido de los datos de la Lonja de Toledo ([www.agrodigital.com](http://www.agrodigital.com)) para la última campaña. Los datos de los precios de la paja a pie de finca sin empacar se han obtenido de la cátedra de Producción Vegetal de la ETSIA de Madrid. Estos precios se detallan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Precio del grano y de la paja en Euros/t a utilizar en el método de asignación en base al valor económico.

	Grano	Paja
Trigo	125	30
Cebada	110	30

Asignando las cargas ambientales en función de los valores económicos relativos de los subproductos, los factores de asignación que se obtienen para los dos sistemas estudiados son los siguientes:

**Tabla 6.** Factores de asignación entre grano y paja para los dos sistemas estudiados según el método de asignación en base a los valores económicos.

	Grano	Paja
Trigo	0,81	0,19
Cebada	0,79	0,21

### 1.5 Balance energético.

Se ha realizado un balance de energía de los procesos de producción agrícola de cereal considerados. Los resultados se muestran en las tablas Tabla 7 y Tabla 8.

El uso de energía por tonelada de grano de trigo o cebada se ha calculado utilizando el método de asignación de extensión de los límites del sistema según se ha explicado en secciones anteriores. El uso de energía total se ha estimado en 2426,96 MJ/t de trigo y 2066,05 MJ/t de cebada. Las referencias publicadas dan valores de consumos energéticos similares: 1833 MJ/t trigo (Ademe, Ecobilan Direm, 2002), 2300 MJ/t (Gover, 1996), 2834-3265 MJ/t (Audsley et al, 1997).

Vemos en ambos casos cómo el proceso de fabricación de fertilizantes es el proceso que más contribuye al uso de energía en la producción agrícola. Esto coincide con los resultados obtenidos en otros estudios de producción de cereales. En el estudio realizado por Audsley et al (1997) de producción de trigo en Reino Unido, la producción de fertilizantes supone un 40-49% frente a un 26-36% que suponen las labores agrícolas.

En el estudio realizado por Gover et al (1996) también para la producción de trigo en Inglaterra, la producción de fertilizantes supone un 59% del uso total de energía en la producción de trigo, y las labores agrícolas suponen un 23%.

En el estudio realizado por Ademe (Ademe, Ecobilan, Direm, 2002) de la producción de trigo en Francia la fabricación de fertilizantes supone un 70% del uso energético frente a un 29% que suponen las labores agrícolas que es del orden de los resultados obtenidos en el presente estudio.

En cuanto a los cereales importados considerados para el estudio de sensibilidad, el uso de energía se sitúa en 3265MJ/t trigo y 2470 MJ/t cebada que son datos acordes con los datos publicados en la literatura. El uso energético en la fabricación de fertilizantes es un 52% en el caso del trigo y un 59% en el caso de la cebada del uso total de energía, mientras que las labores suponen un 37 y 41% respectivamente.

**Tabla 7.** Balance de energía de la producción de trigo

	MJ/ha	MJ/ha del barbecho	MJ/ha evitados por la paja	MJ/ha después de asignación	MJ/tm.s. trigo.	Contribución relativa (%)
<b>Labores agrícolas</b>	<b>2285,21</b>	<b>-278,60</b>	<b>-222,97</b>	<b>1783,64</b>	<b>523,21</b>	<b>21,56</b>
Alzar	408,26					
Abonado de fondo	204,59					
Pase de grada	204,59					
Pase de cultivador	237,47					
Fertilización de cobertera	204,59					
Siembra	150,70					
Tratamiento						
Cosecha	657,61					
Empacar	223,77					
<b>Fabricación fertilizantes</b>	<b>6176,92</b>		<b>-198,96</b>	<b>5977,96</b>	<b>1753,58</b>	<b>72,25</b>
<b>Fabricación pesticidas</b>	<b>0,00</b>		<b>-9,20</b>	<b>-9,20</b>	<b>-2,70</b>	<b>-0,11</b>
<b>Transportes insumos</b>	<b>574,69</b>		<b>-53,59</b>	<b>521,10</b>	<b>152,86</b>	<b>6,30</b>
<b>TOTAL</b>	<b>8758,22</b>	<b>-278,60</b>	<b>-484,73</b>	<b>8273,50</b>	<b>2426,96</b>	
<b>Transporte del grano a la planta de etanol</b>					<b>1670,40</b>	
<b>TOTAL incluido transporte del grano</b>					<b>4097,36</b>	

**Tabla 8.** Balance de energía de la producción de cebada

	MJ/ha	MJ/ha del barbecho	MJ/ha evitados por la paja	MJ/ha después de asignación	MJ/tm.s. cebada	Contribución relativa (%)
<b>Labores agrícolas</b>	<b>2153,86</b>	<b>-278,60</b>	<b>-194,26</b>	<b>1681,00</b>	<b>565,99</b>	<b>27,40</b>
Alzar	492,33					
Abonado de fondo	77,44					
Pase de grada	206,52					
Pase de cultivador	143,83					
Fertilización de cobertera	77,44					
Siembra	172,41					
Tratamiento	103,26					
Cosecha	663,81					

Empacar	225,88				
<b>Fabricación fertilizantes</b>	<b>4194,71</b>	<b>-173,34</b>	<b>4021,37</b>	<b>1354,00</b>	<b>65,54</b>
<b>Fabricación pesticidas</b>	<b>72,94</b>	<b>-6,39</b>	<b>64,92</b>	<b>21,86</b>	<b>1,06</b>
<b>Transportes insumos</b>	<b>415,55</b>	<b>-46,69</b>	<b>368,86</b>	<b>124,20</b>	<b>6,01</b>
<b>TOTAL</b>	<b>6558,46</b>	<b>-278,60</b>	<b>-422,30</b>	<b>6136,16</b>	<b>2066,05</b>
<b>Transporte del grano a la planta de etanol</b>				<b>2851,2</b>	
<b>TOTAL incluido transporte del grano</b>				<b>4917,25</b>	

## 1.6 Vinculación de los datos con la unidad funcional

Según información recibida de ABENGOA, las cantidades de grano de trigo y cebada necesarias para producir un kg de etanol son las siguientes:

- Trigo: 3,28 kg trigo 16,5% de humedad por kg de etanol
- Cebada: 3,84 kg cebada 16,5% de humedad por kg de etanol

Traducido a cantidades de materia seca de grano:

- Trigo: 2,8 kg ms trigo por kg de etanol
- Cebada: 3,3 kg ms cebada por kg de etanol

Teniendo en cuenta el peso específico del etanol (0,794kg/l), en cada unidad funcional hay las siguientes cantidades de etanol:

- Sistema A1: 0,0686 kg etanol
- Sistema A2: 0,0048 kg etanol
- Sistema B: 0,0018 kg etanol

La producción relativa de etanol de las dos plantas consideradas es de un 56% la planta de Bioetanol Galicia, que usa trigo como materia prima, y un 44% la planta de Ecocarburantes, que usa cebada como materia prima. Por tanto para obtener 1 UF de cada combustible se han usado las siguientes cantidades de trigo y cebada:

**Sistema A1: 1 UF contiene 0,1082 kg trigo (m.s.) y 0,0995 kg de cebada (m.s.)**  
**Sistema A2: 1 UF contiene 0,0076 kg trigo (m.s.) y 0,0070 kg de cebada (m.s.)**  
**Sistema B: 1 UF contiene 0,0029 kg trigo (m.s.) y 0,0027 kg de cebada (m.s.)**

## 2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN A ETANOL.

### 2.1 Principales hipótesis y limitaciones

#### 2.1.1 Fuentes de datos

Se ha considerado el proceso de producción de etanol a partir del almidón del grano de cereal mediante un proceso de hidrólisis, fermentación y destilación. El proceso está basado en el desarrollado en las plantas de etanol: Ecocarburantes en Cartagena, y Bioetanol Galicia en A Coruña.

Los datos se han obtenido directamente de Abengoa Bioenergía.

### 2.1.2 **Participación en la producción de etanol**

Se han considerado que ambas plantas de producción contribuyen a la producción del etanol en un porcentaje acorde a sus volúmenes de producción. Bioetanol Galicia contribuye un 56% y Ecocarburantes un 44%. Posteriormente se ha hecho un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de esta contribución.

### 2.1.3 **Emisiones de CO<sub>2</sub>**

En el proceso de fermentación se origina una corriente de CO<sub>2</sub> producida durante la transformación de la glucosa en etanol. En la planta de Ecocarburantes este CO<sub>2</sub> se recoge y se vende como un subproducto a empresas de producción de bebidas carbonatadas. En el caso de la planta de Curtis, no existe un uso para este CO<sub>2</sub> y se emite a la atmósfera. Sin embargo, este CO<sub>2</sub> ha sido previamente fijado en el proceso de formación del grano de cereal y por tanto no ha sido tenido en cuenta en ninguno de los dos casos como emisión del proceso de producción de etanol.

En ambas plantas existen plantas de cogeneración que usan gas natural y emiten CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Este CO<sub>2</sub> si se considera como una emisión del proceso de producción de etanol.

## 2.2 **Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso**

En la Figura 5 se muestra un esquema de las actividades implicadas en la producción de etanol en las plantas consideradas.

En la Tabla 9 se resumen las cifras de producción de etanol y otros subproductos de ambas plantas.

**Tabla 9. Principales cifras de producción de las plantas de bioetanol**

	Ecocarburantes	Bioetanol Galicia
Producción de etanol (t/año)	78900	100000
Producción de electricidad (GWh/año)	170,288	156,376
Producción de DDGS (t/año)	120000	122000
Uso de cereal (t/año)	302976	328000
Producción CO <sub>2</sub> (subproducto) (t/año)	80000	-
Uso gas natural (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> N/año)	55	71,69

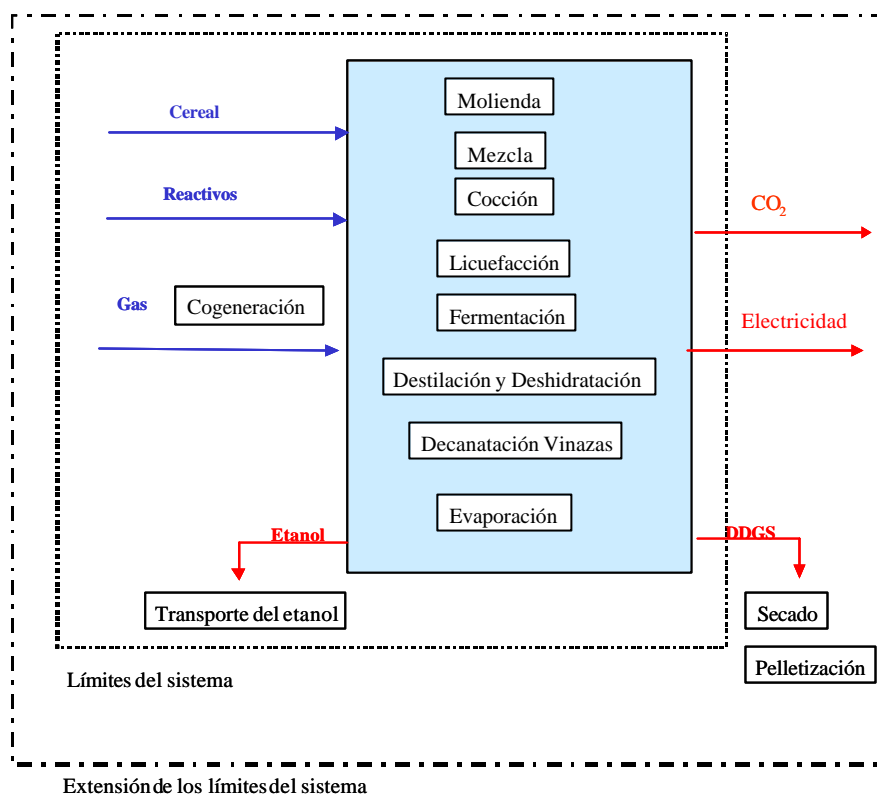


Figura 5. Esquema de las actividades implicadas en la producción de etanol

### 2.2.1 Planta de Ecocarburantes

La planta de Ecocarburantes Españoles ubicada en Cartagena es explotada en proceso continuo produciendo 78900 toneladas anuales de bioetanol deshidratado al 99,75%, procesando 302976 toneladas al año de cebada. La planta produce también 120000 toneladas de DDGS (alimento proteico para la alimentación animal); 184,5 millones de kWh de energía eléctrica generada a partir del gas natural; y 80000 toneladas de CO<sub>2</sub> empleado para fabricar carbonato de estroncio y bebidas carbónicas.

La planta dispone de un grupo de generación de energía eléctrica producida en una turbina que trabaja con gas natural y que tiene una producción de 176 GWh y un rendimiento eléctrico equivalente del 34,5%. El consumo de gas natural es de 55 millones de Nm<sup>3</sup> al año. Se exporta a la red nacional el 68 % de estos kW producidos, y el 32% restante se emplea en el consumo propio.

La turbina alimenta una caldera cuya producción es de 31t/h de vapor a 9 bar y que tiene la misión de aportar todo el vapor necesario para el proceso de la planta, así como la generación de aire caliente para el proceso de secado (evaporación de 27 t/h de agua) de los DDGS.

### 2.2.2 Planta de bioetanol Galicia

La planta de Bioetanol Galicia produce 100000 toneladas anuales de alcohol etílico deshidratado al 99,75%, procesando 338000 toneladas/año de trigo. El proceso consiste en la transformación del almidón contenido en los granos de cereal en azúcares fermentables, utilizando el proceso de molienda en seco, sacarificación y fermentación simultánea SSF, que se lleva a cabo en batch o lotes en los tanques de fermentación. Los líquidos resultantes de la sacarificación y fermentación del cereal son destilados

para la obtención del bioetanol. La destilación se efectúa en cascada, de manera que se aprovechan al máximo los calores residuales de la planta. Tras la destilación, las vinazas libres de etanol son procesadas para producir DDGS.

La planta incorpora una central de cogeneración formada por turbina de gas de 24,8 MW y caldera de recuperación que produce 45 t/h de vapor a 12 bar(g), suficiente para cubrir todas las necesidades del proceso. La planta produce 214 GWh/año, de los que alrededor del 20% cubren la demanda eléctrica de la planta y el resto se exportan a la red.

Los gases de salida de la caldera se emplean en el secadero para bajar el contenido de agua de la corriente líquida que sale del evaporador (que lleva los sólidos solubles procedentes de la fermentación), y el de la corriente sólida que sale de las centrífugas. La mezcla de ambas corrientes, una vez seca y procesada, constituye los DDGS, con un contenido del 32% en proteínas, que previa peletización, para facilitar su manejo y transporte, se utiliza para alimentación animal. La planta de Bioetanol Galicia produce 122000 t/año de DDGS en forma de pelets.

### **2.2.3 Producción de DDGS**

Los DDGS se producen después de la sacarificación, fermentación y destilación de los cereales para la obtención del bioetanol. El proceso consiste en convertir los almidones y azúcares del cereal en bioetanol debido a lo cual se reduce significativamente en los DDGS el contenido en hidratos de carbono no estructurales, almidón y azúcares, y se concentra proporcionalmente el porcentaje del resto de nutrientes (entre 2 y 3 veces) respecto al cereal de partida. Esto origina que de una materia prima que se emplea principalmente como fuente de energía, el cereal, se obtenga un subproducto que se emplea principalmente como fuente de proteína con un contenido de hasta un 32% de proteína bruta.

El proceso de obtención incorpora además un tratamiento térmico para la desecación del producto (menos del 10% de humedad) y posterior peletización que optimiza su manipulación, transporte y conservación.

Dado que la mayor parte del almidón desaparece en el proceso y se concentra el resto de nutrientes, los DDGS son una fuente de proteína, fibra, y grasa. Además tienen un alto contenido en levaduras, minerales y vitaminas del grupo B.

## **2.3 Procedimientos de cálculo**

### **2.3.1 Planta de cogeneración**

Tanto en Bioetanol Galicia como en Ecomarburantes existen plantas de cogeneración alimentadas con gas natural que cubren las necesidades térmicas y eléctricas del proceso de producción de etanol. Estas plantas están dimensionadas para la producción de la energía térmica necesaria en el proceso y producen un exceso de electricidad que se vierte a la red. Esta producción de electricidad se considera un co-producto.

Las emisiones atmosféricas de esta planta de cogeneración se han calculado utilizando los factores de emisión propuestos en el documento de la EPA AP-42 (EPA, 2003) en el capítulo dedicado a turbinas de gas estacionarias.

Los factores de emisión considerados para las dos plantas de cogeneración son los siguientes:

**Tabla 10. Factores de emisión de las plantas de cogeneración**

	g/GJ gas natural
CO <sub>2</sub>	4,73 10 <sup>4</sup>
N <sub>2</sub> O	1,29
CH <sub>4</sub>	3,70

Fuente: AP-42

### 2.3.2 Materias primas necesarias en el proceso productivo

#### *Levaduras*

La levadura utilizada para la producción de bioetanol es la *Saccharomices cerevisiae*. En Cartagena, donde el proceso es en continuo, el medio para las levaduras es el propio medio de la fermentación, por lo que no se necesita añadir materias primas, además el cereal usado es la cebada que no tiene carencia de nutrientes para las levaduras.

En Curtis se utiliza levadura liofilizada y el proceso de fermentación es en batch ya que el riesgo de contaminación es menor y más fácilmente controlable. Como el trigo es deficiente en nitrógeno se añade urea como nutriente para las levaduras a razón de 0,001kg/kg etanol.

Las cargas ambientales y uso de energía en la producción de la urea se tomarán de la base de datos de ETH (Frischknecht et al, 1996).

Puesto que en Curtis la levadura se compra liofilizada, para esta planta hemos incluido el consumo energético utilizado en el proceso de liofilización. Se ha contactado con diferentes empresas de liofilización y se cifra en 12kWh/kg levadura. Esta energía procede de la red eléctrica, por lo que en el inventario se ha tenido en cuenta el mix energético español para su conversión a energía primaria.

#### *Enzimas*

Previo al proceso de fermentación se produce la licuefacción del caldo donde se le añaden las enzimas que catalizan la hidrólisis de determinados enlaces. Las enzimas utilizadas en la producción del bioetanol son: alfa-amilasa (que cataliza la hidrólisis del almidón), glucoamilasa (cataliza la hidrólisis de las dextrinas en glucosas) y celulasa (que cataliza la hidrólisis del material celulósico). No se ha conseguido información sobre materia y energía necesaria para la fabricación de estas enzimas ni tampoco las emisiones que se originan en su producción.

#### *Otras materias primas*

Otras materias primas utilizadas en el proceso productivo de la planta de Ecocarburantes son los ácidos fosfórico y sulfúrico. Las cargas ambientales y uso de energía en la producción de estos compuestos se han tomado de la base de datos de ETH (Frischknecht et al, 1996).

## 2.4 Asignación de cargas a los co-productos

La producción de etanol engloba procesos tanto físicos como biológicos (molienda, hidrólisis, fermentación y destilación) siendo el producto final un alcohol deshidratado con un 99,75% de pureza y existiendo dos co-productos con interés comercial, que son por un lado los DDGS, con interés en el mercado de piensos dada su riqueza en proteína, y por otro lado el CO<sub>2</sub> que se produce en los procesos de fermentación y que encuentra aplicación en la producción de bebidas gaseosas como materia prima (sólo en el caso de Ecocarburantes).

El CO<sub>2</sub> producido en la planta de Eco carburantes se vende a una empresa cercana que lo usa en su totalidad para su proceso productivo sustituyendo a otras posibles fuentes de esta materia prima, por lo que es factible considerarlo como un subproducto con valor comercial en el sistema económico. Sin embargo este mercado de CO<sub>2</sub> se satura con facilidad y es probable que para niveles de producción más altos de etanol no haya mercado para este producto. Por ello, en este ACV no lo hemos considerado como un subproducto al que asignar parte de las cargas. Sin embargo, se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se ha considerado como escenario alternativo un escenario en el que la producción de CO<sub>2</sub> en la planta de Eco carburantes que se vende, substituye a la producción de CO<sub>2</sub> procedente de empresas de producción de amoníaco. Es posible imaginar un escenario en el que alguna de estas empresas haya salido del mercado de CO<sub>2</sub> como consecuencia de la entrada en producción de la planta de etanol, y esta pérdida de beneficios haya hecho que la planta cesara su actividad. En este escenario, es plausible considerar este CO<sub>2</sub> como un producto evitado. Puesto que no pensamos que este vaya a ser el caso general, no lo hemos considerado en el escenario de referencia. Sin embargo, resulta interesante analizar el impacto que esta variable puede tener en los resultados mediante su estudio en un análisis de sensibilidad.

La generación de calor para el proceso de transformación se realiza en una planta de cogeneración con gas natural siendo la electricidad producida considerada como otro co-producto del sistema analizado. La planta de cogeneración forma parte del diseño de la instalación y contribuye a la optimización de su proceso productivo por lo que estimamos justificada la consideración de la electricidad producida como un subproducto del proceso.

**Las cargas ambientales de todos estos procesos se asignarán a los distintos co-productos siguiendo la regla de asignación de extensión de los límites del sistema. El método alternativo que se ha usado es la asignación en base al valor económico.**

#### **2.4.1 Asignación por extensión de los límites del sistema**

Este método consiste en tener en cuenta las cargas ambientales correspondientes a los co-productos y restar las cargas ambientales que se producen en los sistemas alternativos que proporcionan los mismos servicios que los que proporcionan éstos. Estos servicios, en nuestro caso son:

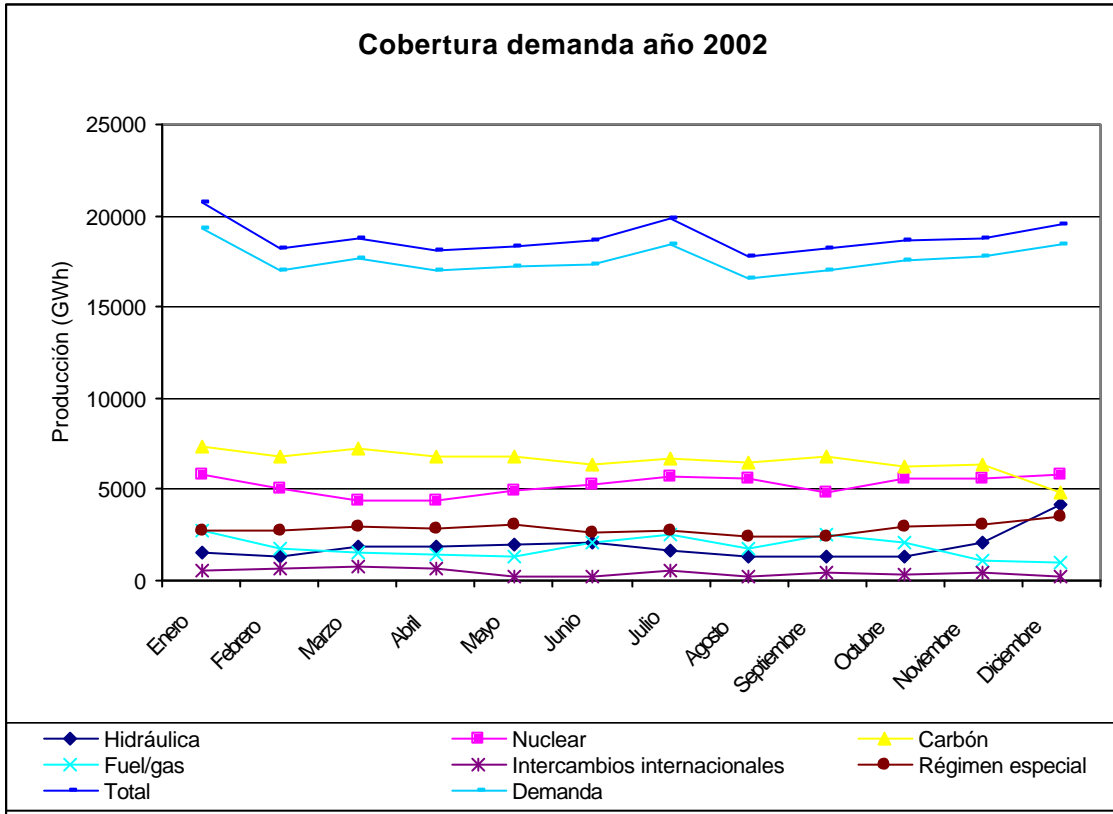
- la alimentación animal para el caso de los DDGS
- la provisión de electricidad para el caso de la electricidad de la planta de cogeneración

Como sistema alternativo a los DDGS hemos considerado la producción de trigo para pienso. El uso de los DDGS de nuestro sistema permite reducir la cantidad de producción de trigo para pienso en el sistema económico, por tanto los impactos producidos por estos sistemas se evitan.

Como sistema alternativo a la electricidad producida en la planta de cogeneración hemos considerado la producción de electricidad en aquellas plantas que entran a producir cuando existen picos de demanda o bien cuando la electricidad generada por otras fuentes que producen en base no es suficiente para cubrir la demanda.

Analizando la producción mensual de las distintas tecnologías durante los últimos 4 años (ver Figura 6 para el año 2002) podemos observar como las centrales nucleares tiene un patrón de producción bastante estable adecuado a la evolución de la demanda, la generación en régimen especial y la generación hidráulica produce al límite de su potencial en cada momento y su producción por tanto no está afectada por factores externos. Las tecnologías que se adecuan a la evolución de la demanda y de la

producción del resto de las tecnologías son el carbón y las centrales de fuel y gas. Así, vemos cómo al aumentar la producción hidráulica, por incremento de la pluviosidad, las centrales de carbón y de fuel paran su producción; y al revés ocurre cuando la producción hidráulica disminuye.

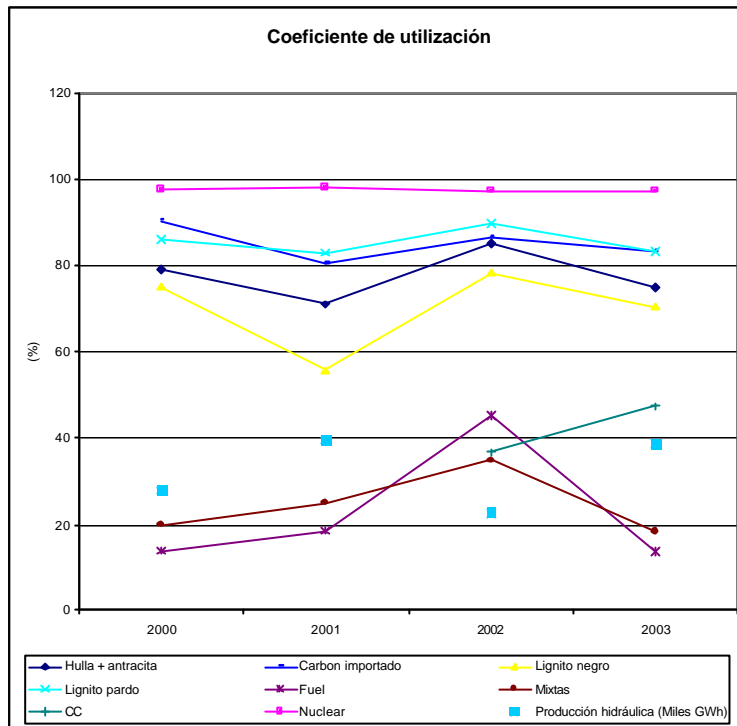


Fuente: REE, 2002

**Figura 6. Evolución mensual de la cobertura de la demanda en el año 2002.**

Si analizamos el coeficiente de utilización de las distintas tecnologías en la cobertura de la demanda (Fuente: REE 2002.

Figura 7) vemos cómo los años de producción hidráulica alta las centrales de carbón y de fuel-gas tienen coeficientes de utilización más bajos. Las centrales de ciclo combinado han aumentado su coeficiente de utilización en los últimos años, a pesar de que el año 2003 fue un año bueno en cuanto a producción hidráulica se refiere, por lo que no consideramos que vayan a entrar en esta generación en punta.



Fuente: REE 2002.

Figura 7. Coeficientes de utilización anuales de las distintas tecnologías de generación eléctrica

**Por tanto, el sistema alternativo de generación de electricidad al que sustituiría la generación marginal de electricidad de la planta de cogeneración, sería la generación de electricidad en plantas de carbón y de fuel-gas en los porcentajes en los que estas tecnologías han participado en la generación eléctrica en el año 2002, año de referencia para los datos de producción eléctrica en este estudio de ACV.**

#### 2.4.2 Asignación por valor económico de los co-productos

Este método de asignación consiste en tomar como parámetro relevante para realizar la asignación de las cargas ambientales, el valor económico de los co-productos en el momento en que se separan en el sistema. Sería por tanto el valor económico de los DDGS en planta y el valor económico de la electricidad suministrada a la red.

Se ha considerado el precio medio de mercado del etanol y de los DDGS. En cuanto al precio de la electricidad se ha considerado el precio medio que recibe la planta por la electricidad producida para el caso del mes de marzo de 2004 según sistema de primas actual (RD 1802/2003 de 27 diciembre) considerando el sistema de primas e incentivos. Estos precios se detallan en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Precio del etanol, los DDGS y la electricidad utilizados en el método de asignación en base al valor económico.

Etanol (Euro/t)	DDGS Trigo (Euro/t)	DDGS Cebada (Euro/t)	Electricidad (Euro/kwh)
670	125	117	0,0447

Asignando las cargas ambientales en función de los valores económicos relativos de los subproductos, los factores de asignación que se obtienen para los dos sistemas estudiados son los siguientes:

**Tabla 12.** Factores de asignación entre los distintos co-productos para las dos plantas estudiadas según el método de asignación en base a los valores económicos.

	Etanol %	DDGS %	Electricidad %
Bioetanol Galicia	74,56	16,97	8,47
Ecocarburantes	73,13	19,42	7,44

## 2.5 Balance energético

Se ha realizado el balance energético del proceso de producción de bioetanol en ambas plantas cuyos resultados se muestran en la Tabla 13 .

**Tabla 13.** Balance energético de la producción de etanol

MJ/kg etanol	Ecocarburantes	Bioetanol Galicia
<b>Energía del proceso</b>		
Gas natural	27,19	27,96
<b>Energía de las materias primas</b>		
Grano cebada	13,51	11,54
Ácido sulfúrico	0,026	-
Ácido fosfórico	0,004	-
Alfa -amilasa	n.d.	n.d.
Glucoamilasa	n.d.	n.d.
Antiespumante	n.d.	n.d.
Celulasa	n.d.	n.d.
Urea	0,023	0,023
Levadura	n.d.	0,0103
<b>TOTAL</b>	<b>40,75</b>	<b>39,53</b>
<b>Productos evitados</b>		
DDGS	-7,87	-6,88
Electricidad	-15,32	-17,10
<b>TOTAL despues de asignación</b>	<b>17,56</b>	<b>15,56</b>

n.d. No disponible

En la Tabla 14 se han reunido los datos publicados sobre balances energéticos de la producción de etanol a partir de trigo. La variabilidad es grande aunque el dato obtenido en este estudio de ACV se acerca al propuesto como valor de referencia europeo por el proyecto VIEWLS (ver referencias). En nuestro caso, los requerimientos energéticos del proceso se reducen considerablemente al tener en cuenta como subproducto del proceso la electricidad generada en la planta de cogeneración.

**Tabla 14. Energía necesaria para la producción de etanol a partir de trigo. Datos publicados**

	<b>MJ/kg etanol</b>
Ecotraffic, 1992	19,26
Gover et al, 1996	26,56
Ademe, Ecobilan, Direm, 2002	10,19
Elsayed et al, 2003	8,06
Concawe, 2003	17,28
Viewls, 2005	15,36

## 2.6 Vinculación con la unidad funcional

La unidad funcional ha sido cuantificada como:

- Sistema A1: 2,24 MJ de la mezcla E85
- Sistema A2: 2,36 MJ de la mezcla E5
- Sistema B: 2,36 MJ de gasolina 95

Esto se corresponde con las siguientes cantidades de mezclas en cada uno de los sistemas:

- Sistema A1: 0,098 l de la mezcla E85
- Sistema A2: 0,0745 l de la mezcla E5
- Sistema B: 0,073 l de gasolina 95

En estas cantidades de mezcla hay las siguientes cantidades de etanol:

- Sistema A1: 0,0686 kg de etanol
- Sistema A2: 0,0048 kg de etanol
- Sistema B: 0,0018 kg de etanol

Como ya se ha comentado, la producción relativa de etanol de las dos plantas consideradas es de un 56% la planta de Bioetanol Galicia y un 44% la planta de Ecocarburantes. Por tanto las cantidades de etanol producidas en cada una de las plantas en cada unidad funcional son las siguientes:

**Sistema A1: 1 UF contiene 0,038 kg de etanol producido en Bioetanol Galicia y 0,030 kg de etanol producido en Ecocarburantes.**  
**Sistema A2: 1 UF contiene 0,002 kg de etanol producido en Bioetanol Galicia y 0,002 kg de etanol producido en Ecocarburantes**  
**Sistema B: 1 UF contiene 0,001 kg de etanol producido en Bioetanol Galicia y 0,0008 kg de etanol producido en Ecocarburantes.**

## 3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE EXTRACCION Y TRANSPORTE DEL CRUDO

### 3.1 Principales hipótesis y limitaciones

#### 3.1.1 Fuentes de datos.

Los datos se han obtenido directamente de la Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP) según un formulario de recogida de datos.

Para elaborar el inventario de la extracción del crudo se han utilizado además datos publicados por la Administración de Información de Energía de Estados Unidos (EIA), la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) y las referencias bibliográficas citadas.

Estos datos reflejan las producciones de crudo mundiales de varios años. Los datos que se han utilizado se refieren a la extracción de crudo en el año 2001.

Se ha considerado el proceso de producción de gasolina en una refinería de tipo FCC (Fluid Catalytic Cracking) que son las refinerías complejas más comunes en España. Se disponía de datos de dos refinerías de este tipo en España, la refinería de Algeciras propiedad de la empresa CEPSA y la refinería de La Coruña de REPSOL YPF. Los datos utilizados corresponden a la refinería de Algeciras de la que se disponía de datos más completos.

### 3.1.2 Origen del crudo procesado

El origen del crudo procesado en la refinería considerada se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15: Origen del crudo procesado en la refinería considerada**

	Refinería de Algeciras
Oriente Medio	47,40%
Sur América	0,29%
Caribe	2,99%
Nigeria	7,89%
Resto del Oeste de África	3,47%
Norte de África	10,73%
Rusia (Báltico)	23,43%
Rusia (Mar Negro)	2,61%
Otros (Francia)	1,19%

La cantidad total de crudo procesado por esta refinería es de 10357300 t.

### 3.1.3 Sistemas de extracción de petróleo.

Dependiendo del origen del crudo se utiliza uno u otro tipo de extracción. Se han utilizado los datos proporcionados por Delucchi (Delucchi 2003) sobre porcentajes de utilización de cada método de extracción para los distintos orígenes que se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16. Porcentajes de utilización de los distintos métodos de extracción de crudo según orígenes**

	Campo petrolífero	Plataformas marinas	Inyección de vapor
Oriente Medio	85	15	0
Sur América	80	20	0
Caribe	40	30	30
Nigeria	80	20	0
Resto del Oeste de África	80	20	0
Norte de África	80	20	0
Rusia (Báltico)	50	50	0
Rusia (Mar Negro)	50	50	0
Mar del Norte	5	95	0
Otros (Francia)	80	20	0

Teniendo en cuenta estos datos y los porcentajes de crudo que viene de cada uno de los orígenes (ver Tabla 15 ), se han calculado los porcentajes globales de cada tipo de extracción. Estos porcentajes son los siguientes:

- extracción en campo petrolífero: 73,36%
- extracción en plataforma marina: 25,74%
- extracción con inyección de vapor: 0,90%

### 3.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso

En la Figura 8 se muestra un esquema de los procesos implicados en la extracción y transporte del crudo.

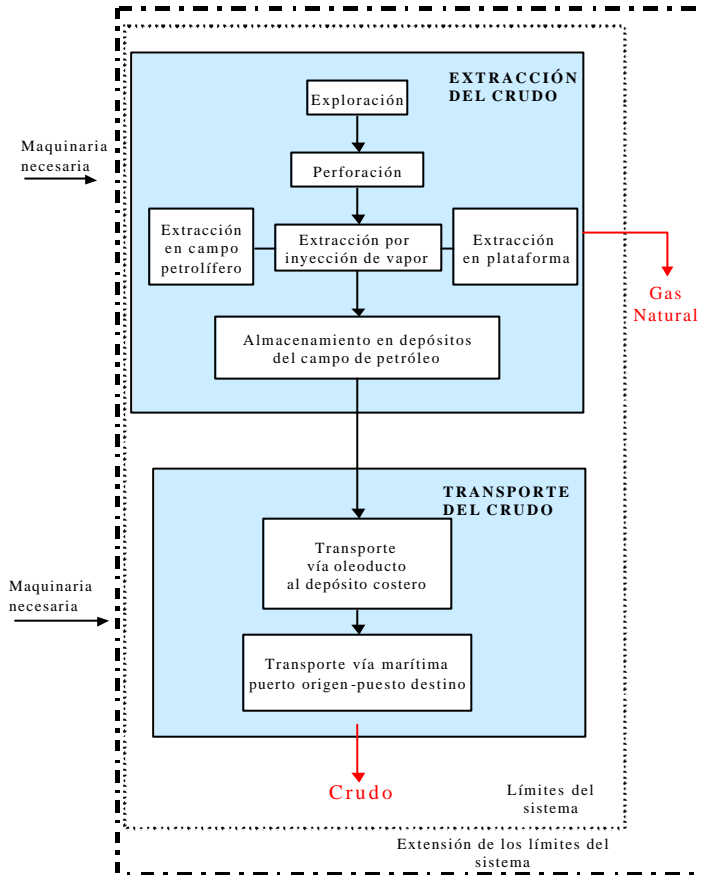


Figura 8. Esquema de los procesos implicados en la extracción y transporte del crudo.

Previa a la extracción del petróleo está la etapa de exploración para descubrir los lugares en los que existen yacimientos. Esta etapa consiste en la realización de estudios geológicos de superficie y del subsuelo. La extracción del petróleo se realiza mediante la perforación de pozos y la extracción del fluido que llena los pozos mediante una tubería de producción o tubing. Este fluido es una mezcla de hidrocarburos líquidos, gases, agua y otras impurezas. Fundamentalmente, el petróleo es separado del agua en instalaciones de acondicionamiento del crudo. Parte del gas que acompaña al petróleo es aprovechado en la propia instalación extractiva como combustible. El resto se puede tratar y canalizar mediante una tubería, quemar, liberar o reinyectar en el pozo dependiendo de las condiciones de los yacimientos. La extracción del petróleo puede realizarse en tierra firme, o en plataformas marinas dependiendo de la localización de los yacimientos. Para aumentar la rentabilidad de un yacimiento se pueden utilizar varios sistemas de inyección, entre ellos la inyección de vapor.

El crudo se transporta de los campos o plataformas marítimas de petróleo a los depósitos portuarios mediante oleoductos. A lo largo del oleoducto hay instaladas estaciones de bombeo, que en condiciones normales se encuentran situadas a 50 kilómetros unas de otras. El diámetro de la tubería de un oleoducto varía entre 10 centímetros y 1 metro. Una vez que el crudo llega al depósito portuario, se embarca en los buques tanque. En España sólo se recibe crudo por vía marítima, incluidas las escasas toneladas de origen nacional que se producen en plataformas marítimas y que son descargadas en barcos cisterna que van y vuelven desde la plataforma a la refinería. El crudo llega a los puertos españoles en distintos tipos de buques tanque. La elección del buque tanque se hace por razones de tipo económico, escogiendo el de mayor capacidad que pueda entrar en el puerto de destino, donde la limitación suele ser el calado. En el caso de la refinería de Algeciras y según datos proporcionados por AOP el tamaño de los buques tanque es de 320000 t. Cuando el buque tanque llega al puerto de destino se realiza la descarga. La refinería está en la costa y tiene un muelle donde se realiza la descarga del buque tanque. Una vez realizada la descarga, se ha considerado que los buques tanque vuelven al puerto de procedencia sin crudo ni otros productos. Fuera de los límites del sistema quedan los procesos de fabricación de toda la maquinaria utilizada para la extracción y transporte del crudo.

### 3.3 Procedimientos de cálculo

#### 3.3.1 Exploración y perforación de los pozos

Se ha tenido en cuenta la energía necesaria para la exploración y la perforación de los pozos, que ha sido estimada en un 0,75% de la energía contenida en el crudo extraído en el caso de la extracción en campo petrolífero y un 7,5% en el caso de la extracción en plataformas marinas (Sheehan, J. et al, 1998).

#### 3.3.2 Uso de energía y emisiones en la extracción del petróleo en campo petrolífero.

##### *Energía*

La energía requerida para la extracción en campo petrolífero está basada en un estudio realizado por el Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (Sheehan, J. et al, 1998). La energía utilizada proviene de dos fuentes:

- Electricidad: 78,6764 Kwh./ t de crudo utilizada para el bombeo
- Gas Natural: 38,2353 MJ/ t de crudo utilizada para la recuperación del crudo

##### *Emisiones al aire*

Las emisiones al aire que se producen en la extracción tienen diferentes orígenes:

- la combustión del gas natural para obtener la energía necesaria para el proceso de separación del gas natural y el crudo
- el gas natural que bien se libera o se quema

El factor de emisión en el caso de la combustión del gas natural se estima utilizando los factores de emisión de las calderas industriales propuestos por la EPA (EPA AP-42).

A partir de estimaciones de Delucchi (Delucchi, 2003) sobre las cantidades de gas que se quema y se libera para cada país por cantidad de crudo producido se obtienen los datos sobre el gas quemado y gas liberado. Se asume que todo el gas natural que se libera es metano. Las emisiones debidas a la quema de gas natural se basan en los factores de emisión de los quemadores industriales propuestos por la EPA(EPA AP-42).

Las emisiones debidas a la volatilización del crudo durante la extracción se han estimado mediante factores de emisión propuestos por la EPA (EPA 1990) y teniendo en cuenta una productividad media de los pozos de 1555 kg de crudo por día y por pozo (EIA 1995b).

### **3.3.3 Uso de energía y emisiones en la extracción del petróleo en plataformas marinas**

#### ***Energía***

El Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía de los Estados Unidos estimaron mediante el estudio de 18 plataformas los siguientes consumos energéticos que se han utilizado para este estudio:

- Gas Natural: 285,294 MJ/ t de crudo utilizado para la recuperación del crudo
- Gas Natural: 710,294 MJ/ t de crudo utilizado para electricidad, bombeo, etc.

#### ***Emisiones al aire***

Respecto a las emisiones al aire debidas a la extracción se pueden diferenciar las debidas a:

- la combustión de gas natural en separadores de gas y crudo
- la combustión de gas natural para generación de electricidad en las turbinas
- el gas natural que se libera y el que se quema

Las emisiones en el caso de la combustión del gas natural se estiman utilizando el factor de emisión de las calderas industriales (EPA AP-42).

Para el cálculo de las emisiones debidas al uso de gas natural para la producción de electricidad en las turbinas se han utilizado los factores de emisión de las turbinas de gas (EPA AP-42)

Las emisiones debidas al quemado del gas y al que se libera son las mismas que para la extracción en tierra. A partir de la cantidad anual de crudo y gas natural producido por cada país (<http://www.eia.doe.gov>) se obtiene una relación entre la cantidad de gas natural producida y la cantidad de crudo extraído. DeLucchi estimó las fracciones de gas que se quema y las fracciones de gas que se libera para cada país. Aplicando dichas fracciones a las cantidades reales de gas producidas se obtienen los datos sobre el gas quemado y gas liberado. Se asume que todo el gas natural que se escapa es metano. Las emisiones debidas a la quema de gas natural se basan en los factores de emisión de los quemadores industriales propuestos por la EPA(EPA AP-42).

### **3.3.4 Uso de energía y emisiones en la extracción del petróleo por inyección de vapor**

#### ***Energía***

El gasto energético necesario para la extracción de crudo por inyección de vapor ha sido estimado según el DOE en:

- Electricidad: 83,088 kWh/ t de crudo utilizada para bombeo
- Gas Natural: 7250 MJ/ t de crudo utilizado para la recuperación de crudo y para la caldera de vapor

Se supone que todo el vapor se produce en las calderas de gas natural cuyo combustible es el gas natural asociado.

### ***Emisiones al aire***

Las emisiones al aire producidas durante la extracción por inyección de vapor provienen de la combustión del gas natural en las calderas que se estiman utilizando los factores de emisión de la EPA para calderas industriales (EPA, AP-42)

#### **3.3.5 Uso de energía y emisiones asociadas al transporte de crudo vía oleoducto del campo de petróleo al puerto de origen**

El consumo de energía en el transporte por oleoductos se debe principalmente a las estaciones de bombeo, el resto de componentes de los oleoductos suponen una mínima parte. El combustible utilizado por las bombas suele variar en función del país de origen del crudo. Para nuestro estudio se ha supuesto que la fuente de energía para el bombeo es la electricidad.

De acuerdo con GEMIS (GEMIS, 2002), se ha estimado un consumo medio energético para el transporte de crudo vía oleoducto de 0,016667 kWh/t.km.

La longitud de la red de oleoductos de los países miembros de la OPEC se ha obtenido en la página web [www.opec.org](http://www.opec.org). En los casos en los que no ha sido posible conocer las longitudes de los oleoductos, se ha realizado una estimación de la distancia existente entre el campo de extracción del crudo y el puerto de origen.

El uso de electricidad da lugar a emisiones que se han tenido en cuenta al utilizar la base de datos ETH (Frischknecht et al, 1996).

Además, en los oleoductos, de manera habitual, se producen pérdidas de crudo. Estas pérdidas tienen origen en la corrosión, el uso frecuente o los accidentes. Un estudio realizado por CONCAWE (CONCAWE, 2002) estima en un 0,0002% el porcentaje de pérdidas de crudo en los oleoductos.

#### **3.3.6 Uso de energía y emisiones asociadas al transporte de crudo vía marítima del puerto de origen al puerto destino**

Para calcular las emisiones derivadas de esta fase y el consumo de energía se ha seguido la metodología simplificada propuesta en el proyecto MEET “Methodology for calculating transport emissions and energy consumption” (Hickman, 1999).

Las emisiones se obtienen a partir de:

$$E_i = \sum_{j,k,l} E_{i,j,k,l}$$

$$E_{i,j,k,l} = S_{j,k} (GT) t_{j,k,l} F_{i,j,l}$$

donde:

- i: es el contaminante
- j: es el combustible utilizado
- k: es el tipo de buque
- l: es el tipo de motor
- $E_i$  : es el total de emisiones del contaminante  $i$
- $E_{i,j,k,l}$  : es el total de emisiones del contaminante  $i$  debido al uso del combustible  $j$  en un buque de la clase  $k$  con un motor tipo  $l$
- $S_{jk} (GT)$ : es el consumo diario de combustible  $j$  en un buque de la clase  $k$  en función de la carga transportada (GT)
- $t_{jkl}$ : es el número de días de navegación del buque clase  $k$  con el motor tipo  $l$  utilizando el combustible  $j$

$F_{ijl}$ : es el factor de emisión media para el contaminante  $i$  del combustible  $j$  en motores tipo  $l$ .

Los puertos de origen del crudo recibido en el puerto de Algeciras han sido facilitados por las autoridades portuarias. En los casos en los que sólo se informó del país de procedencia, se ha tomado como referencia el puerto más importante del país con terminal para carga de crudo.

Las distancias recorridas por los buques tanque han sido calculadas utilizando la herramienta disponible en <http://www.distances.com>. Conociendo la capacidad de carga del buque (320000 t) y las toneladas de crudo recibidas se ha estimado el número de buques tanque que llegan al puerto de Algeciras en función de su origen. Tomando como velocidad media 14 nudos se calculan los días de navegación necesarios para el transporte de crudo.

### ***Cálculo del consumo de combustible***

El combustible utilizado por el buque tanque es el fuel oil residual. En el estudio se tiene en cuenta que los buques tanque hacen un viaje de ida con carga y un viaje de vuelta sin carga. Para la ida se considera que el consumo de combustible varía en función de la carga, mientras que para la vuelta, se ha tomado el consumo medio para este tipo de tanques, 41,15 t de combustible/ día ya que vuelven siempre vacíos. El consumo de combustible en el caso del viaje de ida se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S_{jk} \text{ (GT)} = C_{jk} \text{ (GT)} 0,8$$

con:  $C_{jk} \text{ (GT)} = 14,685 + 0,00079 \text{ GT}$

donde:

$C_{jk} \text{ (GT)}$ : es el consumo de combustible  $j$  en t. de combustible/ día en función de la carga considerando que el buque tipo  $k$  viaja siempre a la velocidad máxima.

### ***Emisión de contaminantes derivados del uso del combustible.***

Los factores de emisión de  $\text{CO}_2$  han sido tomados de los propuestos por Hickman, (Hickman, 1999), estimados en 3200 kg  $\text{CO}_2$ /t fuel oil.

Para la estimación de las emisiones producidas por el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{N}_2\text{O}$  se han utilizado los factores de emisión propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 1996). Los factores de emisión se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17: Factores de emisión IPCC**

EMISIÓN	F. Emisión (Kg/ TJ de crudo)
$\text{CH}_4$	5
$\text{N}_2\text{O}$	0,6

**Tabla 18: Cantidad emitida de cada contaminante en el transporte de crudo vía marítima al puerto de Algeciras**

Cantidad emitida (kg/ t de crudo)	
CO <sub>2</sub>	19,6351
CH <sub>4</sub>	0,0012
N <sub>2</sub> O	0,0001

***Emisiones debidas a la producción del combustible***

La producción del combustible, fuel oil residual, lleva asociadas unas emisiones de contaminantes y consumos de energía. Estos resultados se han obtenido de la base de datos ETH (Frischknecht et al, 1996).

**3.4 Reglas de asignación**

En el proceso de extracción del crudo se obtienen dos productos:

- el crudo
- el gas natural

**La asignación de cargas entre estos productos se ha hecho utilizando dos métodos:**  
**- asignación en base al contenido energético**  
**- asignación en base al valor económico de los productos.**

**3.4.1 Asignación en base al contenido energético**

La cantidad de gas comercializado por tonelada de crudo varía en función de los orígenes del mismo. El origen del crudo para la refinería considerada se muestra en la Tabla 15.

La cantidad de gas comercializado (excluyendo los consumos propios y las pérdidas en la extracción) en cada uno de los orígenes por cada kg de crudo producido, obtenida de datos proporcionados por la EIA ( <http://www.eia.doe.gov>) se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 19: Cantidad de gas natural producido por kg de crudo**

Gas natural comercializado (kg/kg crudo)	
Oriente Medio	0,0716
Sur América	0,6166
Caribe	0,4220
Nigeria	0,0928
Norte de África	0,5697
Rusia (Báltico)	5,6356
Rusia (Mar Negro)	0,0391
Mar del Norte	0,0025
Otros (Francia)	0,3165

Considerando un contenido energético de 57,27 MJ/kg para el gas natural y de 42,54 MJ/kg para el crudo se obtienen los porcentajes de asignación entre el gas natural y el crudo para la extracción del crudo. Estos porcentajes de asignación son los siguientes:

**Tabla 20: Porcentajes de asignación para el gas natural y el crudo procesado según el método de asignación en base al contenido energético**

Crudo	Gas natural
68,28	31,72

### 3.4.2 **Asignación en base al valor económico**

El valor económico del crudo y del gas natural se ha obtenido de los datos publicados por la EIA en su “Annual Energy Outlook 2004 with Projections to 2025” ([www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/gas.html#ngc](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/gas.html#ngc)), tomando una media de los precios en pozo desde el año 2000 hasta el año 2005 que es el horizonte temporal de nuestro estudio. Estos precios son los siguientes:

- Crudo: 0,185 Euros/kg
- Gas natural: 0,019 Euros/kg

Tomando en consideración estos precios y los datos proporcionados en la sección anterior sobre el origen del crudo procesado y la cantidad de gas natural comercializado por kg de crudo producido en cada origen se han obtenido los porcentajes de asignación que a continuación se detallan.

**Tabla 21: Porcentajes de asignación para el gas natural y el crudo procesado según el método de asignación en base al precio**

Crudo	Gas natural
90,11	9,89

Como vemos los porcentajes de asignación varían considerablemente al utilizar uno u otro método de asignación.

### 3.5 **Balance energético**

Se ha realizado el balance energético de los procesos de extracción y transporte del crudo hasta la refinería. Los resultados (después de realizar la asignación) se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 22. Balance energético de los procesos de extracción y transporte del crudo (MJ/kg crudo)**

Etapa	Energía utilizada (MJ/kg crudo)
Extracción (incluida exploración y perforación)	0,63
Energía perdida en la quema o liberación del gas natural	1,84
<b>Total extracción</b>	<b>2,46</b>
Transporte por oleoducto desde el campo petrolífero al puerto de origen	0,16
Transporte por barco desde el puerto de origen hasta el puerto de destino	0,08
<b>Total transporte</b>	<b>0,23</b>
<b>Total extracción y transporte</b>	<b>2,89</b>

Los valores publicados en la literatura científica para el consumo energético en la extracción del crudo oscilan entre 0,85 MJ/kg de crudo considerados por el modelo GREET (Wang et al, 1999) y 2,67 MJ/kg de crudo considerados por Sheehan (Sheehan et al, 1998) para la extracción del crudo importado en Estados Unidos. En cuanto al consumo energético en el transporte del crudo, los valores publicados van desde 0,22 MJ/kg crudo en el modelo GREET (Wang et al, 1999) hasta el valor de 1,09 MJ/kg de crudo considerados por Sheehan (Sheehan et al, 1998) para la extracción del crudo importado en Estados Unidos. Nuestros resultados por tanto se encuadran bien dentro del rango de los valores considerados en otros estudios.

### 3.6 **Vinculación con la unidad funcional**

La unidad funcional ha sido cuantificada como:

- Sistema A1: 2,24 MJ de la mezcla E85
- Sistema A2: 2,36 MJ de la mezcla E5

- Sistema B: 2,36 MJ de gasolina 95

Esto se corresponde con las siguientes cantidades de mezclas en cada uno de los sistemas:

- Sistema A1: 0,098 l de la mezcla E85
- Sistema A2: 0,0745 l de la mezcla E5
- Sistema B: 0,073 l de gasolina 95

En estas cantidades de mezcla hay las siguientes cantidades de gasolina 95:

- Sistema A1: 0,015 l de gasolina
- Sistema A2: 0,071 l de gasolina
- Sistema B: 0,073 l de gasolina

Teniendo en cuenta que la refinera considerada procesa 5,394 kg de crudo por cada litro de gasolina producido, las cantidades de crudo que entran en cada sistema son las siguientes:

**Sistema A1: 1 UF contiene 0,076 kg de crudo**  
**Sistema A2: 1 UF contiene 0,365 kg de crudo**  
**Sistema B: 1 UF contiene 0,377 kg de crudo**

## 4 ANALISIS DE INVENTARIO DEL PROCESO DE REFINO DEL CRUDO

### 4.1 Principales hipótesis y limitaciones

#### 4.1.1 Fuentes de datos.

Los datos se han obtenido directamente de la Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP).

Se ha considerado el proceso de producción de gasolina en una refinera de tipo FCC (Fluid Catalytic Cracking) que son las refineras complejas más comunes en España. Se disponía de datos de dos refineras de este tipo en España, la refinera de Algeciras propiedad de la empresa CEPSA y la refinera de La Coruña de REPSOL YPF. Los datos utilizados corresponden a la refinera de Algeciras de la que se disponía de datos más completos.

### 4.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso

En la Figura 9 se muestra un esquema de los procesos implicados en el refino del crudo. Fuera de los límites del sistema quedan los procesos de fabricación de toda la maquinaria y equipamiento necesarios en esta fase.



- Unidades catalíticas: permiten obtener compuestos más ligeros a partir de cargas pesadas, así como modificar la proporción de familias de hidrocarburos de acuerdo con los requerimientos de los combustibles a fabricar. Como unidad más importante destaca la **unidad de craqueo catalítico** que recibe los gasóleos de vacío para producir gasolina y compuestos base para la petroquímica (propileno, etc.),
- Unidad Hidrotratadora de destilados medios: está diseñada para procesar diesel pero también se utiliza para procesar queroseno.
- Unidad de reformado catalítico: en la zona de destilados ligeros, aumenta el contenido de productos aromáticos con alto octanaje en la nafta, produciendo hidrógeno como subproducto.
- Unidad de alquilación: permite convertir olefinas ligeras en componentes más valiosos de las gasolinas por su mayor octano y menor presión de vapor.
- Unidad de producción de ETBE. La gasolina producida en la refinería contiene ETBE (4.2% en peso). La refinería dispone de una unidad de producción de ETBE a partir de isobutileno y etanol. Este etanol se supone producido en las plantas de etanol consideradas en este estudio.

### 4.3 Procedimientos de cálculo

#### 4.3.1 Calculo de emisiones y uso de energía en el proceso de refino.

La mayoría de los análisis de ciclo de vida de productos petrolíferos consultados (General Motors Corporation, Argonne National Laboratory, BP, ExxonMobil, Shell (2001); Wang (1999); Delucchi, 1993; Gover et al, 1996) utilizan modelos de programación lineal de la refinería para estimar los consumos energéticos y las emisiones de la misma. En nuestro caso no disponemos de estos modelos de programación lineal pero, alternativamente, disponemos de datos globales de los distintos insumos de crudo, otras materias primas y fuentes de energía, así como de las salidas de los distintos productos y de las emisiones. De esa manera podemos calcular la eficiencia energética y las cargas ambientales globales de la refinería.

Las entradas y salidas de energía y materia de la refinería se resumen en la

Tabla 24.

La eficiencia energética del proceso de refino calculada tomando en consideración estos datos es de un 89,97%.

La refinería obtiene la mayor parte de su energía del propio crudo. El uso de energía interna, tal y como se ve en la Tabla 23 ,es de  $3,31 \cdot 10^{10}$  MJ/año.

**Tabla 23. Uso de energía interna en la refinería**

Energía interna	t/año	MJ/año
Propano	1631,25	$7,28 \cdot 10^7$
Fuel oil	356540,9	$1,43 \cdot 10^{10}$
Gas	272012,34	$1,31 \cdot 10^{10}$
Coke	121421,61	$3,76 \cdot 10^9$
Hidrógeno	14987,09	$1,80 \cdot 10^9$
<b>Total</b>		<b><math>3,31 \cdot 10^{10}</math></b>

La refinería importa energía externa en forma de electricidad y gas natural. Las importaciones de energía ascienden a  $5,74 \cdot 10^9$  MJ/año.

**Tabla 24. Entradas y salidas de materia y energía a la refinería**

	Entradas		Salidas	
	t/año	MJ/año	t/año	MJ/año
Crudo	10357300	4,41 10 <sup>11</sup>	GLP	248500
Energía externa			Naftas	385300
Electricidad		4,14 10 <sup>9</sup>	Gasolinas	1509200
Gas natural		1,61 10 <sup>9</sup>	Keroseno	1032100
		<b>5,74 10<sup>9</sup></b>	Gasóleos	3262900
Materias primas			Fuelóleos	2534100
Catalizadores	1402	5,61 10 <sup>7</sup>	Bases lubricantes	96900
Otros	26774	1,26 10 <sup>8</sup>	Parafinas	21800
Etanol para ETBE	28524	1,50 10 <sup>9</sup>	Benceno	177600
		<b>1,68 10<sup>9</sup></b>	Otros aromáticos	358000
<b>Total</b>		<b>4,48 10<sup>11</sup></b>	Disolventes	145400
			Propileno	73800
				<b>4,02 10<sup>11</sup></b>
			Emisiones atmosféricas	
			CO2	2352490,82
			N2O	51,90

#### 4.4 Reglas de asignación

El proceso de refino del crudo da lugar a una larga lista de co-productos además de la gasolina como puede observarse en la

Tabla 24. Una vez calculadas las cargas totales del proceso de refino se ha procedido a asignarlas a los distintos co-productos.

**La asignación de cargas entre estos co-productos se ha hecho utilizando dos métodos:**

- asignación en base al contenido energético
- asignación en base al valor económico de los productos.

##### 4.4.1 Asignación en base al contenido energético

Los contenidos energéticos de los distintos co-productos y los porcentajes de asignación correspondientes se resumen en la Tabla 25.

**Tabla 25. Asignación por contenidos energéticos**

	Toneladas	PCI MJ/kg	MJ	Asignación (%)
GLP	248500	47,31	1,18 10 <sup>10</sup>	2,93
Naftas	385300	37,44	1,44 10 <sup>10</sup>	3,59
Gasolinas	1509200	42,90	6,47 10 <sup>10</sup>	16,12
Keroseno	1032100	40,27	4,16 10 <sup>10</sup>	10,35
Gasóleos	3262900	40,26	1,31 10 <sup>11</sup>	32,70
Fuelóleos	2534100	40,53	1,03 10 <sup>11</sup>	25,57
Bases lubricantes	96900	40,19	3,89 10 <sup>9</sup>	0,97
Parafinas	21800	40,19	8,76 10 <sup>8</sup>	0,22
Benceno	177600	40,19	7,14 10 <sup>9</sup>	1,78

Otros aromáticos	358000	40,19	$1,44 \cdot 10^{10}$	3,58
Disolventes	145400	40,19	$5,84 \cdot 10^9$	1,45
Propileno	73800	40,19	$2,97 \cdot 10^9$	0,74

Fuente: IEA, 2002; AOP; Concawe

#### 4.4.2 Asignación en base al valor económico de los productos

Los precios de los distintos co-productos y los correspondientes porcentajes de asignación se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26. Asignación por valor económico de los co-productos

	Toneladas	Precio Euro/t	Euros	Asignación (%)
GLP	248500	77,75	$1,93 \cdot 10^{10}$	0,58%
Naftas	385300	236,80	$9,12 \cdot 10^{10}$	2,74%
Gasolinas	1509200	403,48	$6,09 \cdot 10^{11}$	18,27%
Keroseno	1032100	222,75	$2,30 \cdot 10^{11}$	6,90%
Gasóleos	3262900	366,13	$1,19 \cdot 10^{12}$	35,85%
Fuelóleos	2534100	287,68	$7,29 \cdot 10^{11}$	21,88%
Bases lubricantes	96900	1450,00	$1,41 \cdot 10^{11}$	4,22%
Parafinas	21800	2200,00	$4,80 \cdot 10^{10}$	1,44%
Benceno	177600	354,11	$6,29 \cdot 10^{10}$	1,89%
Otros aromáticos	358000	359,20	$1,29 \cdot 10^{11}$	3,86%
Disolventes	145400	301,52	$4,38 \cdot 10^{10}$	1,32%
Propileno	73800	480,30	$3,54 \cdot 10^{10}$	1,06%

Fuentes: [www.mineco.es](http://www.mineco.es); [www.icislor.com](http://www.icislor.com); [www.mtas.es](http://www.mtas.es); [www.refinor.com](http://www.refinor.com); Repsol-YPF

#### 4.5 Balance energético

El balance energético realizado se resume en la Tabla 27.

Tabla 27. Balance energético de la producción de gasolina

	MJ/año	% asignación	Producción de gasolina (t)	MJ/kg	MJ/l
<b>Consumos propios</b>					
Propano	$7,28 \cdot 10^7$				
Fuel oil	$1,43 \cdot 10^{10}$				
Gas	$1,31 \cdot 10^{10}$				
Coke	$3,76 \cdot 10^9$				
Hidrógeno	$1,80 \cdot 10^{10}$				
	<b><math>3,31 \cdot 10^{10}</math></b>				
<b>Energía de las materias primas</b>	$1,82 \cdot 10^8$				
<b>Consumos externos</b>					
Electricidad	$4,14 \cdot 10^9$				
Gas natural	$1,61 \cdot 10^9$				
	<b><math>5,74 \cdot 10^9</math></b>				
<b>SubTotal consumo energético</b>	<b><math>3,90 \cdot 10^{10}</math></b>	<b>16,12</b>	<b>1509200</b>	<b>4,32</b>	<b>3,25</b>
Energía en el etanol	$1,50 \cdot 10^9$	100	1509200	1	0,75

				<b>5,16</b>	<b>3,88</b>
Energía en el crudo	4.08E+11	16,12	1509200	43,53	32,73
<b>Total consumo energético</b>	<b>4.48E+11</b>			<b>48,69</b>	<b>36,61</b>

Las referencias publicadas dan valores alrededor de 4 MJ/kg de gasolina (Gover et al, 1996, Concawe, 2003, Ademe, 2002) hasta alrededor de 6 MJ/kg gasolina (Wang, 1999; Delucchi, 1991). Los valores obtenidos se hallan dentro del rango de los valores publicados.

En este balance energético no se ha incluido la energía del propio crudo que entra a formar parte de la gasolina producida. Teniendo en cuenta esta energía, la energía primaria total necesaria para producir un kg de gasolina asciende a 48,69 MJ/kg de gasolina.

#### 4.6 Vinculación con la unidad funcional

La unidad funcional ha sido cuantificada como:

- Sistema A1: 2,24 MJ de la mezcla E85
- Sistema A2: 2,36 MJ de la mezcla E5
- Sistema B: 2,36 MJ de gasolina 95

Esto se corresponde con las siguientes cantidades de mezclas en cada uno de los sistemas:

- Sistema A1: 0,098 l de la mezcla E85
- Sistema A2: 0,0745 l de la mezcla E5
- Sistema B: 0,073 l de gasolina 95

En estas cantidades de mezcla hay las siguientes cantidades de gasolina:

**Sistema A1: 1 UF contiene 0,015 l de gasolina**  
**Sistema A2: 1 UF contiene 0,071 l de gasolina**  
**Sistema B: 1 UF contiene 0,073 l de gasolina**

## 5 ANALISIS DE INVENTARIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS MEZCLAS

### 5.1 Principales hipótesis y limitaciones

#### 5.1.1 Fuentes de datos.

Los datos utilizados en este inventario han sido proporcionados por el Grupo Cepsa, CLH y Abengoa Bioenergía.

### 5.2 Descripción cuantitativa y cualitativa del proceso

En el escenario que estamos considerando el etanol producido se mezcla con gasolina al 15% en las propias plantas de producción de etanol. Este etanol desnaturalizado con el 15% de gasolina se transporta por camión cisterna hasta los centros de distribución. En el caso del sistema A1, el etanol desnaturalizado con el 15% de gasolina se transporta directamente desde los centros de distribución hasta las estaciones de servicio en camiones cisterna. En el caso del sistema A2, se adiciona más gasolina hasta obtener la mezcla E5 en los centros de distribución y se distribuye hasta las estaciones de servicio en camiones cisterna. Una vez que la gasolina se ha producido en la refinería ésta tiene que ser transportada hasta las estaciones de servicio. La gasolina se transportará vía oleoducto hasta centros de almacenamiento y distribución desde donde se hará llegar a

las estaciones de servicio por carretera. El esquema general de los transportes considerados para las mezclas consideradas se muestran en la Figura 10.

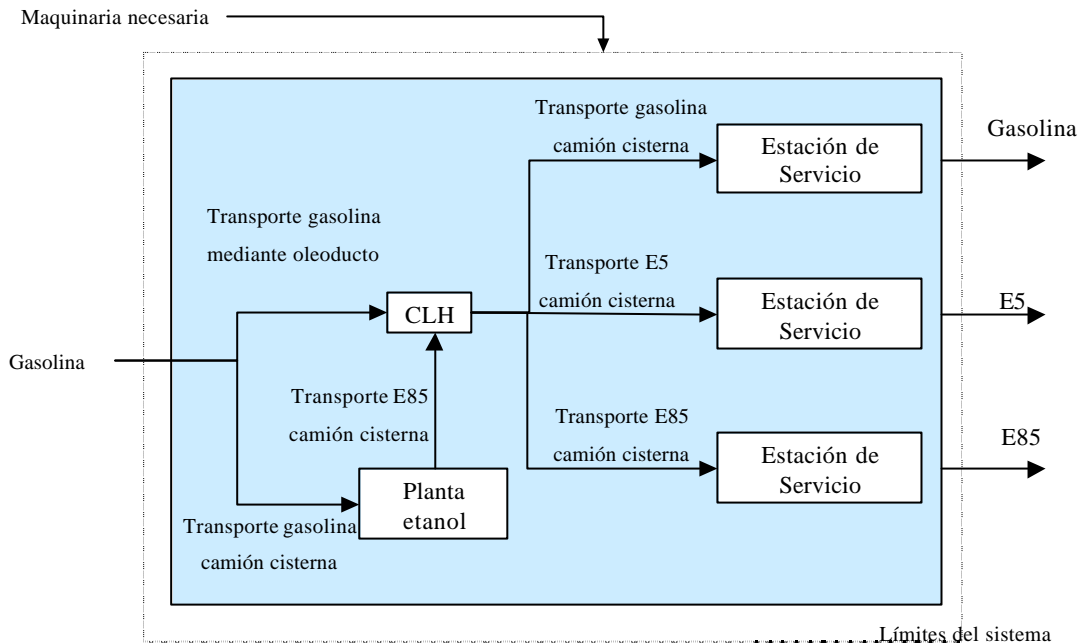
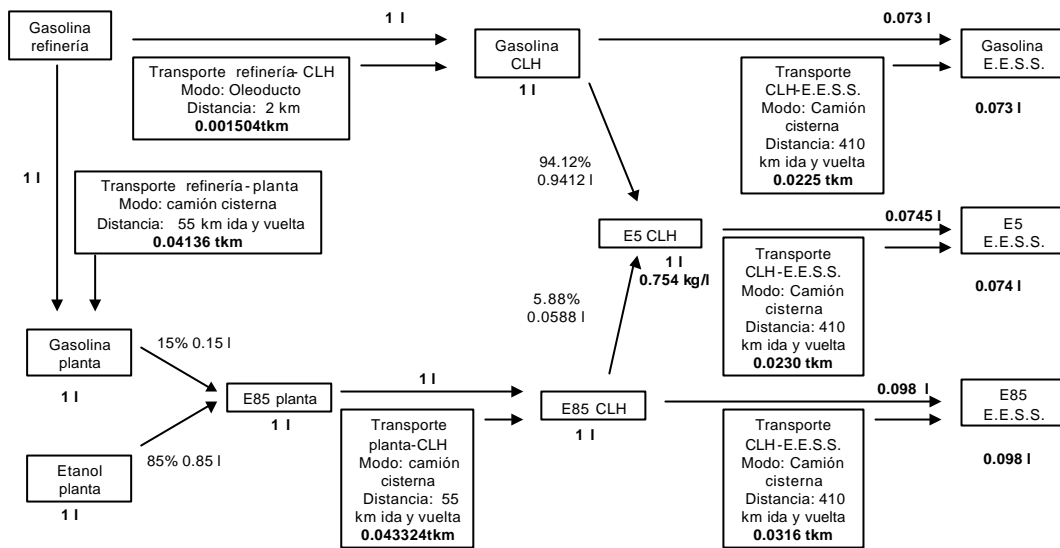


Figura 10. Esquema del transporte de los combustibles

### 5.3 Procedimientos de cálculo

#### 5.3.1 Cálculo del uso de energía y las emisiones producidas en la distribución de los combustibles

Las necesidades de transporte de los distintos combustibles y mezclas en el escenario considerado se han calculado teniendo en cuenta las distancias de transporte y los volúmenes a transportar, según se ve en la Figura 11.



**Figura 11. Cuantificación de las necesidades de transporte en la etapa de distribución de las mezclas**

El uso de energía necesario en este transporte se ha obtenido usando la base de datos BUWAL (BUWAL 250) que proporciona datos de energía usada por cada tonelada transportada un kilómetro en cada medio de transporte.

Las emisiones producidas en esta etapa son las siguientes:

1. las emisiones derivadas de la provisión de energía como es el caso de las derivadas por la generación de la electricidad necesaria para operar los oleoductos.
2. Las emisiones del tubo de escape de los camiones cisterna usados en los transportes por carretera

Las emisiones se han obtenido de la base de datos BUWAL (BUWAL 250) y la base de datos ETH (Frischknecht et al. 1996).

### 5.4 Balance energético

El balance energético realizado da los siguientes resultados expresados por unidad funcional y por kg de cada una de las mezclas.

	MJ/UF	MJ/kg
Gasolina	0,1051	1,181
E5	0,0669	1,191
E85	0,0648	1,362

Los valores publicados para la distribución de la gasolina son extremadamente variables en este punto. Así, se encuentran valores desde 0,063 MJ/kg de gasolina (Ademe, 2002) hasta 0,858 MJ/kg de gasolina (Concawe, 2003). Los valores obtenidos en este estudio se sitúan por encima del rango de valores publicados. Probablemente sea debido a que en el caso del transporte desde el centro de distribución hasta las estaciones de servicio, se ha adoptado una posición conservadora y se han considerado las distancias máximas a las que se transportan los combustibles.

## 5.5 Vinculación con la unidad funcional

La unidad funcional ha sido cuantificada como:

- Sistema A1: 2,24 MJ de la mezcla E85
- Sistema A2: 2,36 MJ de la mezcla E5
- Sistema B: 2,36 MJ de gasolina 95

Esto se corresponde con las siguientes cantidades de mezclas en cada uno de los sistemas:

**Sistema A1: 1 UF contiene 0,098 l de la mezcla E85**  
**Sistema A2: 1 UF contiene 0,0745 l de la mezcla E5**  
**Sistema B: 1 UF contiene 0,073 l de gasolina 95**

## 6 ANALISIS DE INVENTARIO DEL USO FINAL DE LOS COMBUSTIBLES ESTUDIADOS

### 6.1 Principales hipótesis y limitaciones

#### 6.1.1 Fuente de los datos

Los datos de consumos de combustible del vehículo seleccionado usando gasolina 95 y la mezcla E85, así como algunos de los gases contaminantes emitidos por el escape se han obtenido de Ford. Asimismo se ha realizado una revisión bibliográfica que ha permitido estimar los datos no proporcionados por Ford y necesarios para el estudio.

#### 6.1.2 Mezclas

Antes de que se produzca la combustión en un motor de combustión interna, es necesario que el combustible esté vaporizado. A bajas temperaturas es muy difícil vaporizar el etanol puro debido a su baja presión de vapor y a su alto calor latente de vaporización. Debido a ello es necesario implementar algún sistema de ayuda al encendido. La forma más sencilla es la mezcla con gasolina en diferentes porcentajes según las necesidades.

Las mezclas al 85% con gasolina (E85) se vienen usando en los Estados Unidos para automóviles y furgonetas. Estos combustibles se utilizan en vehículos de combustible flexible (FFV) que pueden quemar o bien gasolina o bien la mezcla de etanol y gasolina dependiendo de la disponibilidad del combustible.

Estos vehículos requieren tan sólo unas pequeñas modificaciones respecto a los vehículos de gasolina. Estas modificaciones son el uso en el motor de materiales resistentes al alcohol, añadir un sensor para el combustible y cambiar el sistema que regula la mezcla de combustible para adecuarlo al combustible que se use en cada momento. Existe en Estados Unidos un extensivo programa de testado de rendimiento y

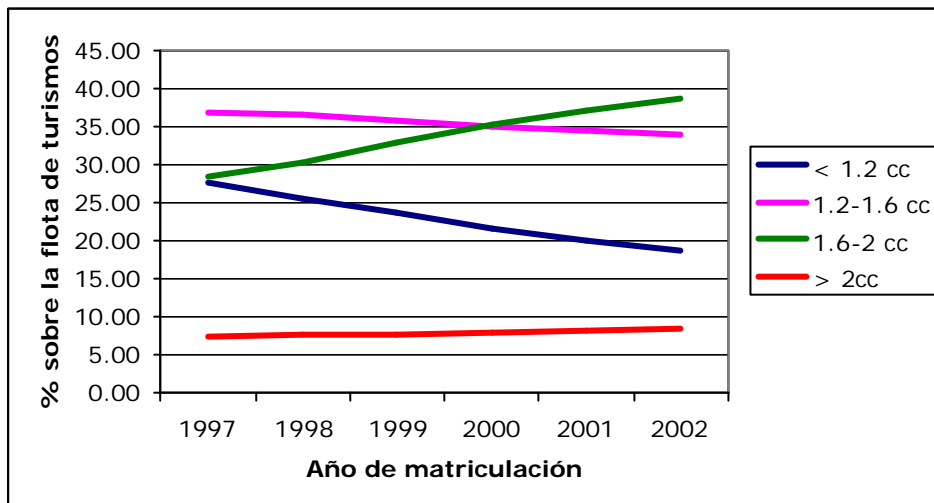
emisiones de este tipo de vehículos en comparación con los vehículos convencionales y una importante base de datos al respecto ([www.afdc.nrel.gov](http://www.afdc.nrel.gov)).

Los vehículos de combustible flexible son similares en todo a los vehículos convencionales y están disponibles casi al mismo precio en varias marcas comerciales. Recientemente Ford ha comercializado el Focus Flexifuel que se vende en Suecia a un precio muy similar al equivalente de gasolina ([www.ford.se](http://www.ford.se)). En España existe un proyecto del Ayuntamiento de Valencia en colaboración con Ford y BP para la introducción de una flota de vehículos de este tipo.

Otra opción es el uso de mezclas a bajo porcentaje con gasolina como el E5 (5% etanol, 95% gasolina) que puede utilizarse en cualquier tipo de vehículo de gasolina sin ninguna modificación.

### 6.1.3 Vehículo de referencia

Estudiando la evolución porcentual de la composición de la flota en los últimos años reflejada en la Figura 12 vemos como el tipo de vehículo mayoritario en la flota de turismos es, de forma creciente, un vehículo de cilindrada comprendida entre 1,6 y 2 cc.



**Figura 12.** Evolución de la composición porcentual de la flota de turismos en España. Fuente: DGT.

En el marco de este estudio se ha considerado que el Ford Focus de cilindrada 1,6 cc es un vehículo representativo del vehículo mayoritario en el que se va a consumir la gasolina 95 en el ámbito temporal de este estudio.

En cuanto a los vehículos de combustible flexible, el vehículo que se ha considerado más adecuado es el Ford Focus FFV ya que está ya introducido en Europa y pronto estará en España, donde se prevé comercializar 10000 unidades al año (Luna, 2003).

Con el objeto de poder comparar los distintos combustibles estudiados en las mismas condiciones de uso, se ha decidido usar el mismo vehículo de referencia en todos los casos. El vehículo elegido deberá ser capaz de consumir tanto gasolina 95 como las mezclas E5 y E85 y estar comprendido en un rango de cilindradas entre 1,6 y 2cc.

El vehículo de referencia en el que se usarán los combustibles estudiados será el vehículo de combustible flexible FFV Ford Focus 1.6i 16V Zetec Flexifuel de 5 puertas.



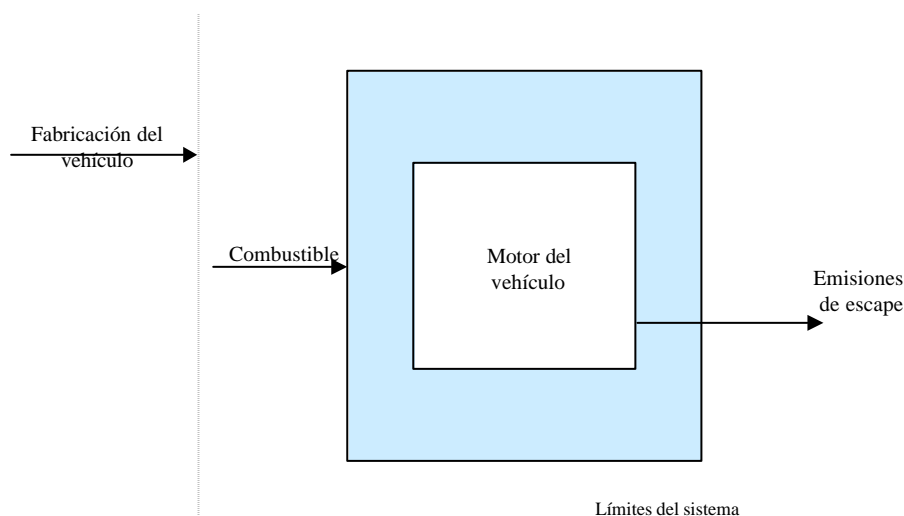
**Figura 13.** Vehículo de referencia. Ford Focus FFV

Las prestaciones del vehículo son las siguientes:

- Aceleración 0-100 km/h: 11,2 s
- Aceleración en 4ª velocidad 50-100 km/h: 15,5 s
- Velocidad máxima : 185 km/h
- Peso del vehículo: 1169 kg
- Peso máximo: 1592 kg
- Peso máximo remolcable: 1200 kg
- Potencia máxima: 75 kW(102CV) a 6000 rpm
- Par máximo: 148 Nm a 4000 rpm
- Consumos de combustible (pruebas oficiales según la directiva 93/116/CEE) válido cuando el vehículo usa gasolina: 7,3 l/100km
- Emisiones de CO<sub>2</sub>: 173 g/km

## 6.2 Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

En la Figura 14 se muestra el esquema del proceso de uso de combustible. Fuera de los límites del sistema quedan los procesos de fabricación del vehículo ya que son los mismos en los tres sistemas.



**Figura 14:** Entradas y salidas para el sistema estudiado

El motor genera la potencia necesaria para mover el vehículo e incluye equipos de lubricación para cada pieza, de enfriamiento para prevenir el sobrecalentamiento, de combustión para suministrarlo, de admisión y escape para hacer la mezcla de aire-combustible, de arranque para el motor, sistemas de generación de electricidad, elementos de purificación de gases de escape y otros dispositivos.

Además, actualmente todos los vehículos están equipados con al menos un sistema de control de emisiones. El vehículo de referencia tiene incorporados al menos los siguientes dispositivos para el control de emisiones.

1. Sistema de Control de Emisión de Combustible Evaporado o canister

En este sistema, se usa un depósito de carbón para absorber los gases que se han evaporado del tanque de combustible y de la cámara del flotador del carburador, para prevenir que se escapen a la atmósfera.

2. Sistema de Catalizador de Tres Vías

Convierte CO, HC y NOx en sustancias no contaminantes. El NO y O<sub>2</sub>, componentes oxidantes, y CO y HC, componentes reductores, reaccionan para formar componentes inactivos como N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, y CO<sub>2</sub>.

### 6.3 Procedimientos de cálculo

#### 6.3.1 Revisión bibliográfica

En la Tabla 28 y Tabla 29 se han reunido los datos publicados sobre emisiones de vehículos de pasajeros con E5 y de vehículos de combustible flexible con E85 respectivamente expresados como porcentaje de diferencia frente a las emisiones de vehículos de pasajeros con gasolina.

Los datos publicados de E5 son menos numerosos debido a que en Estados Unidos se mezcla la gasolina con etanol a un porcentaje mayor. El estudio más completo es el realizado por IDIADA (IDIADAa, 2003) y es en el que hemos basado las estimaciones de emisiones de nuestro vehículo de referencia con E5.

**Tabla 28. Variabilidad de los datos de emisiones de E5 en las referencias publicadas**

Emisiones del tubo de escape	IDIADA	LIPMAN AND DELUCCHI		DELUCCHI AND LIPMAN		WTW CONCAWE 2003
		DELUCCHI, 2003	DELUCCHI, 2002	LIPMAN 1997	DELUCCHI, 1991	
CO2	-1%					
CH4	0%	25%	25%	-3%	-2%	0%
N2O	-54%	0%	0%	0%	0%	0%



Aumento



Sin efecto



Disminución

Donde no se especifica un valor numérico pero sí código de color se quiere indicar una estimación de tipo cualitativo.

En cuanto a las emisiones de los vehículos de combustible flexible con E85 los datos publicados se han reunido en la Tabla 29

En cuanto a las emisiones de metano parece existir un consenso en que se produce un aumento de al menos un 42% (últimas estimaciones de Delucchi). Respecto a las emisiones de óxido nitroso, éstas no se ven afectadas.

Tabla 29. Variabilidad de datos de emisiones de E85 en las referencias publicadas

Emisiones del tubo de escape (E85-E0)/E0	CH4	N2O	Eficiencia
Delucchi, 2003	42%	0%	
Lipman and Delucchi, 2002	42%	0%	
Delucchi and Lipman 1997	-43%	0%	
Delucchi, 1996	-50%		
Delucchi, 1991	-34%	0%	5%
Winebrake et al, 2000 ARGONNE			
GREET Wang 1999 ARGONNE	50%	0%	5%
Pitstick, 1995 ARGONNE			
Gover et al , 1996 ETSU			
ACUREX, 1996			3-5%
Sheehan et al, 2004 NREL			0%
BATELLE, 1998 NREL	119%		3-4%
NREL Fact Sheet Ford Taurus			
AFDC Advanced Vehicle Testing Activity Ford Taurus	114%		2-3%
AFDC Kelly et al, 1996 Chevrolet Lumina			
AFDC Advanced Vehicle Testing Activity Chevrolet Lumina	117%		1-3%
MEET, 1998			
AUTOOIL 2000			
Faiz et al, 1996 WORLD BANK			100%
Dai, et al, 2003 SAE			3%

 Aumento
  Sin efecto
  Disminución

### 6.3.2 Cálculo de las emisiones del tubo de escape

Para las emisiones del vehículo con gasolina, se han realizado una serie de hipótesis:

- las emisiones de óxido nitroso del vehículo de referencia, un Ford Focus, se han considerado similares a las del vehículo del estudio de IDIADA, un Renault Megane, es decir 0,025 g/km. En general las emisiones del Megane son superiores a las del Focus por lo que esto puede ser una sobreestimación.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> se han estimado considerando el contenido de C del combustible.
- Las emisiones de metano se han estimado usando los mismos porcentajes que estas emisiones representan respecto del total de hidrocarburos en las emisiones del Megane del estudio de IDIADA. Así por ejemplo, si para el Megane el metano es el 5,33% de los hidrocarburos este mismo porcentaje se ha aplicado a las emisiones de hidrocarburos del vehículo de referencia para estimar las emisiones de metano.

En cuanto a las emisiones del vehículo con E5:

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> se han estimado considerando el contenido de C del combustible .

- Las emisiones de N<sub>2</sub>O se han considerado iguales a las del vehículo con gasolina
- Para las emisiones de metano se han tomado los porcentajes de aumento o disminución de emisiones obtenidos en el estudio de IDIADA y se han aplicado a las emisiones del vehículo con gasolina estimadas anteriormente.

Respecto a las emisiones del vehículo con E85:

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> se han estimado considerando el contenido de C del combustible.
- Las emisiones de N<sub>2</sub>O se han considerado iguales a las emisiones del vehículo con gasolina según se concluye de la revisión bibliográfica antes realizada.
- Las emisiones de metano se han considerado un 50% superiores a las del vehículo de gasolina según se concluye de la revisión bibliográfica realizada.

Tomando todo esto en consideración las emisiones para cada uno de los combustibles estudiados son las siguientes:

**Tabla 30. Emisiones del tubo de escape del vehículo de referencia con los distintos combustibles estudiados**

g/km	Gasolina	E5	E85
N <sub>2</sub> O	0,025	0,025	0,025
CO <sub>2</sub>	174,89(169,36)	175,69(161,35)	174,89(20,57)
CH <sub>4</sub>	0,0032	0,0032	0,0048

En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre paréntesis se indican las emisiones provenientes de la fracción de gasolina de la mezcla que son las que se han tenido en cuenta.

#### 6.4 Vinculación de los datos con la unidad funcional

Los datos de emisiones están referidos a cada km recorrido por el vehículo de referencia con cada uno de los combustibles estudiados, por lo que estas emisiones están ya referidas a la unidad funcional.

## SECCIÓN III. RESULTADOS

### 1 INTRODUCCION

Los resultados que se presentan en este documento están relacionados con dos aspectos fundamentales:

- el uso de energía en la producción y distribución de las mezclas estudiadas
- las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de las mezclas consideradas

En cuanto al uso de energía se ha calculado la energía primaria total y la energía fósil extraída en la producción y uso de cada una de las mezclas estudiadas, así como las eficiencias energéticas definidas como:

- eficiencia energética del ciclo de vida: es el ratio entre la energía del producto (en términos del poder calorífico inferior) y la energía primaria total necesaria para producir y distribuir el producto.
- Ratio de energía fósil: es el ratio entre la energía del producto (en términos del poder calorífico inferior) y la energía fósil necesaria para producir y distribuir el producto.

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero se presentan los resultados del inventario realizado para el CO<sub>2</sub>, el óxido nitroso y el metano durante el ciclo de vida de las mezclas estudiadas.

Para el cálculo de las emisiones de este tipo de gases en equivalentes de CO<sub>2</sub> se han utilizado los siguientes factores de caracterización, que expresan el potencial de calentamiento global de cada una de las sustancias consideradas. Estos potenciales describen el forzamiento radiativo de los diferentes gases de efecto invernadero en relación al forzamiento radiativo del CO<sub>2</sub> en función de las propiedades de absorción de los gases y de sus vidas medias.

Los potenciales usados se muestran en la Tabla 31

**Tabla 31. Potenciales de calentamiento global**

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
100 años	1	21	310

Fuente: IPCC (Houghton et al, 1996)

### 2 BALANCES ENERGÉTICOS

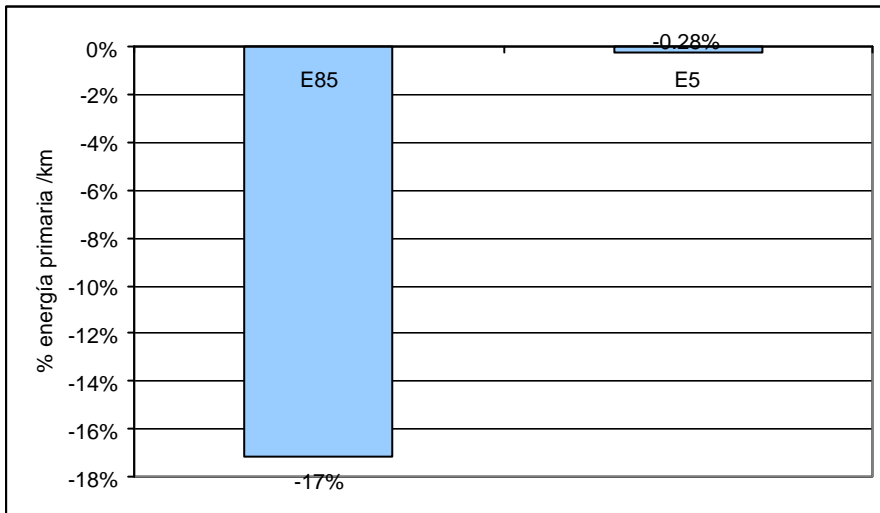
#### 2.1 Energía primaria total

Los resultados de consumos de energía primaria total en la producción y distribución de cada una de las mezclas estudiadas se resumen en la Tabla 32.

**Tabla 32. Energía primaria utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas**

	Energía primaria total (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325
Sistema A2: E5	2,798
Sistema B: Gasolina 95	2,806

Estos resultados indican que la producción y uso de la mezcla E85 supone un ahorro de 0,481 MJ de energía primaria por cada kilómetro recorrido respecto de la producción y uso de gasolina 95, lo que constituye un ahorro de un 17% de energía primaria. En cuanto a la mezcla E5 este ahorro es de 0,008 MJ/km o un 0,28% de energía primaria.



**Figura 15. Ahorro de energía primaria de las mezclas E85 y E5 frente a la gasolina 95.**

## 2.2 Energía fósil

Los resultados de consumos de energía fósil en la producción y distribución de cada una de las mezclas estudiadas se resumen en la Tabla 33.

**Tabla 33. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas**

	Energía fósil (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778
Sistema A2: E5	2,747
Sistema B: Gasolina 95	2,778

Estos resultados indican que la producción y uso de la mezcla E85 supone un ahorro de energía fósil de 1 MJ por cada kilómetro recorrido respecto de la producción y uso de gasolina 95, lo que constituye un ahorro de un 36% de energía fósil. En cuanto a la mezcla E5 este ahorro es de 0,031 MJ/km o un 1,12% de energía fósil.

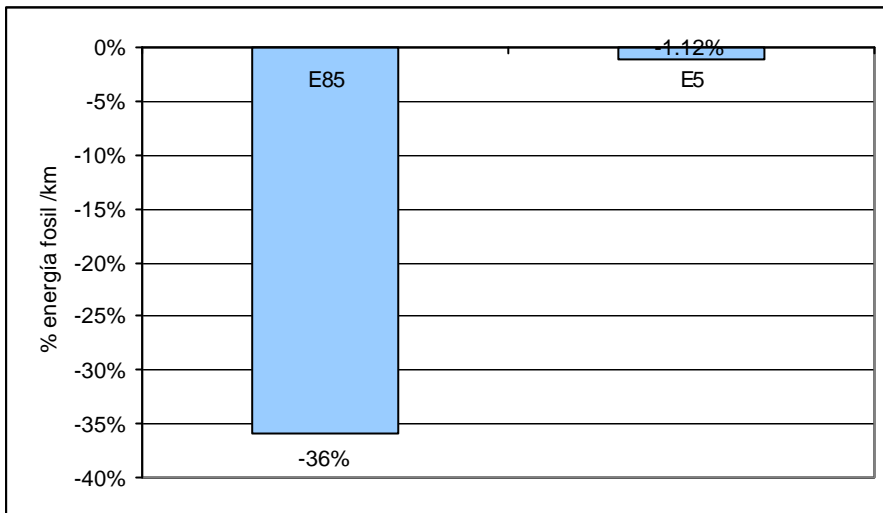


Figura 16. Ahorro de energía fósil de las mezclas E85 y E5 frente a la gasolina 95.

En la Figura 17 y en la Tabla 34 se pueden observar los requerimientos de energía fósil en cada una de las etapas de producción y distribución de las mezclas estudiadas.

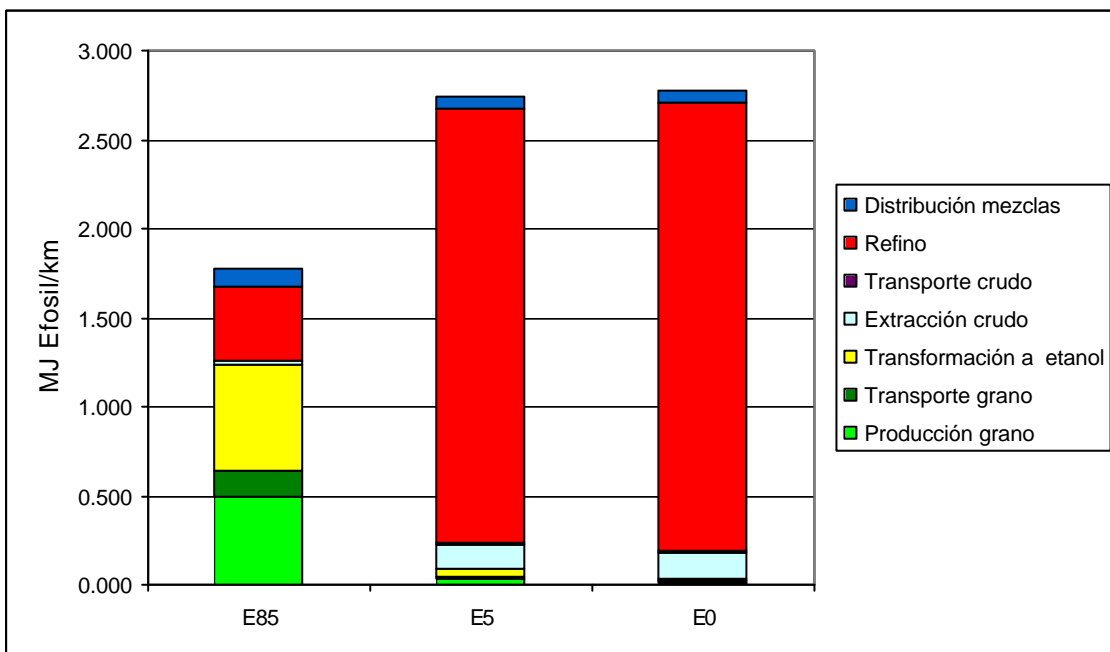


Figura 17. Distribución de la energía fósil necesaria en las distintas etapas de producción y distribución de las mezclas estudiadas.

**Tabla 34. Energía fósil necesaria en las distintas etapas de producción y distribución de las mezclas estudiadas.**

MJ/km	E85	E5	E0
Producción grano	0,497	0,035	0,013
Transporte grano	0,149	0,010	0,004
Transformación a etanol	0,587	0,041	0,016
Extracción crudo	0,023	0,137	0,141
Transporte crudo	0,002	0,012	0,012
Refino	0,414	2,444	2,526
Distribución mezclas	0,105	0,067	0,065

En la producción y distribución de la mezcla E85, la etapa que tiene un mayor consumo de energía fósil es la etapa de transformación del grano a etanol, seguida de la etapa de producción agrícola y posteriormente la etapa de refino de la parte de gasolina que entra en la mezcla. En la producción y distribución de las mezclas E5 y gasolina 95(E0), la etapa con un mayor consumo energético es la de refino.

### 2.3 Ratio de energía fósil de la producción de etanol y gasolina 95

La eficiencia energética y el ratio de energía fósil de la producción (sin incluir la etapa de distribución) de etanol puro y gasolina 95 obtenidas en este estudio de ACV se muestran en la Tabla 35.

**Tabla 35. Eficiencia energética de la producción de etanol puro**

	Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )
Etanol puro	1,49
Gasolina 95	0,848

Los resultados de ratio de energía fósil de la producción de etanol pueden compararse con los datos publicados en la literatura y que se muestran en la Tabla 36. La producción de etanol a partir de trigo tiene en general un balance energético peor que la producción a partir de maíz, salvo excepciones como son el estudio de Ademe (2002) y el de Elsayed (2003), así como algunos sistemas del estudio de LowCVP (2004). El resto de los estudios de producción de etanol a partir de trigo dan ratios de energía fósil alrededor de 1. En nuestro caso el ratio de energía fósil obtenido es sustancialmente mejor, 1,49, aunque dentro del rango de los estudios publicados.

**Tabla 36. Ratio de energía fósil de la producción de etanol publicados en la literatura**

Estudio	Materia prima	Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )
Ecotrafic, 1992	Trigo	0,93
Gover et al, 1996	Trigo	1,02
Ademe, 2002	Trigo	2,05
Elsayed et al, 2003	Trigo	2,16
Concawe, 2004	Trigo	1,00
LowC <sup>VP</sup> , 2004	Trigo	0.68-2,22
Ho, 1989	Maiz	0,95
Marland y Turhollow, 1990	Maiz	1,31
Pimentel, 1991 y 2001	Maiz	0,69
Keney y DeLuca, 1992	Maiz	0,90

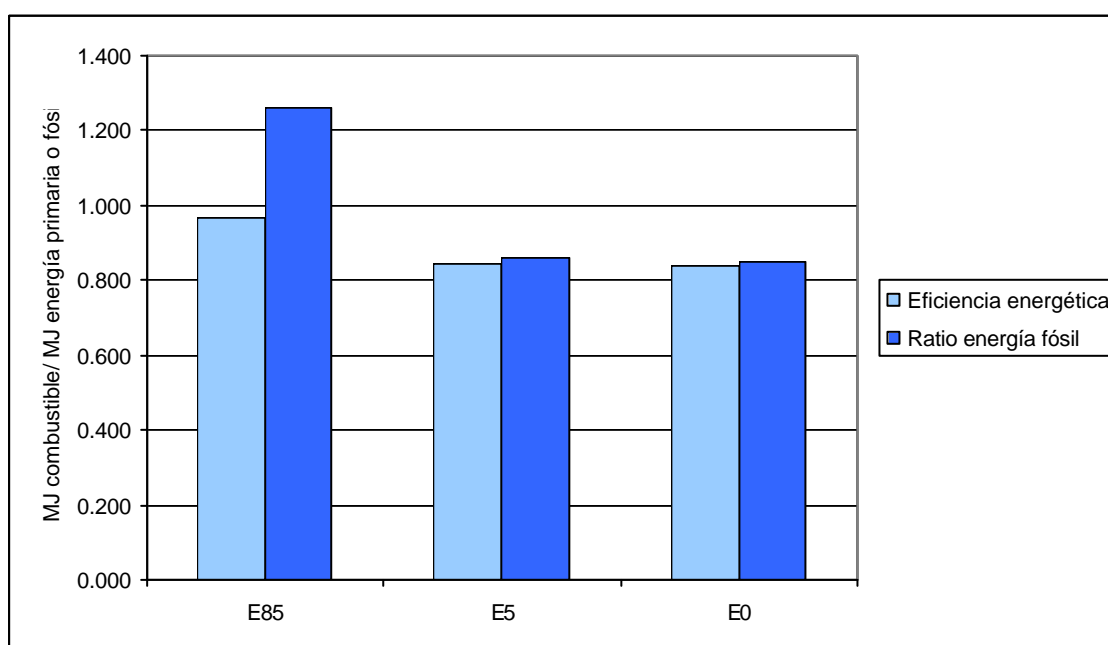
Lorenz y Morris, 1995	Maiz	1,38
Shapouri, 1995	Maiz	1,27
Wang et al, 1999	Maiz	1,42
Agri y AgriFood Canada, 1999	Maiz	1,64
GM WTW America, 2001	Maiz	1,96
Graboski, 2002	Maiz	1,96
Wang en Andress 2002	Maiz	1,32
Shapouri et al, 2002	Maiz	1,34

## 2.4 Eficiencias energéticas de la producción y distribución de las mezclas estudiadas

Las eficiencias energéticas calculadas para las mezclas estudiadas se muestran en la Tabla 37. En todos los casos la energía primaria que hay en el combustible es menor que la energía primaria total necesaria para producirlo y distribuirlo aunque en el caso de las mezclas que contienen etanol las eficiencias son mayores a medida que aumenta el porcentaje de etanol en la mezcla. En el caso de la energía fósil, la mezcla con mayor porcentaje de etanol, la mezcla E85, muestra un ratio de energía fósil mayor que 1 indicando que se consume menos energía fósil en producir y distribuir esta mezcla que la energía que hay en el combustible.

**Tabla 37. Eficiencias energéticas del ciclo de vida y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas**

	Eficiencia energética del ciclo de vida (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )	Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )
Sistema A1: E85	0,965	1,262
Sistema A2: E5	0,844	0,860
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,848



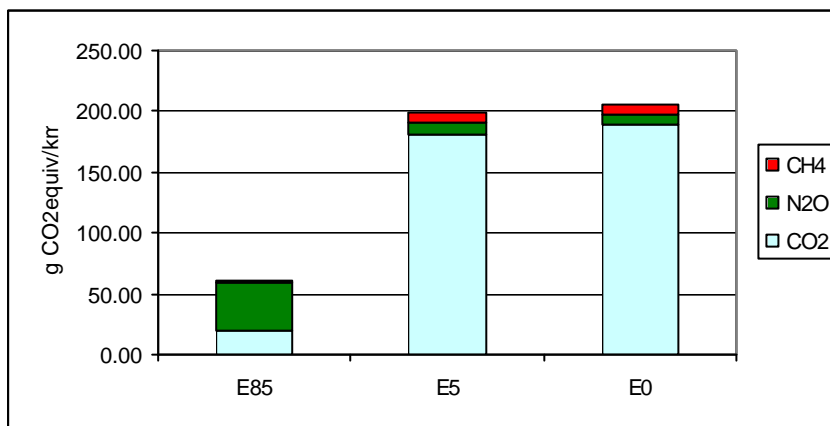
**Figura 18. Eficiencia energética y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas**

### 3 CAMBIO CLIMATICO

Se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero originadas en la producción, distribución y uso de las mezclas estudiadas. Los resultados se muestran en la Tabla 38 y en la Figura 19 expresados en g de CO<sub>2</sub> equivalentes por kilómetro recorrido.

**Tabla 38. Emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de las mezclas estudiadas (g CO<sub>2</sub> equiv/km)**

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Total GEI
Sistema A1: E85	19,55	39,40	2,49	61
Sistema A2: E5	181,16	9,37	7,92	198
Sistema B: Gasolina 95	189,49	7,96	8,13	206



**Figura 19. Emisiones de gases de efecto invernadero por km.**

Según se puede observar en la Figura 20, en términos de CO<sub>2</sub>, la producción y uso de E85 evita la emisión de **170 g** por cada km recorrido en comparación con la producción y uso de gasolina, lo que supone un **90%** de ahorro; y la producción y uso de E5 permite evitar la emisión de **8 g** de CO<sub>2</sub> por cada km recorrido lo que supone un **4%** de reducción de emisiones.

Si tenemos en cuenta las emisiones de todos los gases de efecto invernadero se obtiene que, la producción y uso del **E85** permite ahorrar **144 g** de CO<sub>2</sub> equiv por cada km recorrido en comparación con la producción y uso de gasolina 95, lo que supone un ahorro de un **70%**. En cuanto a la mezcla E5, este ahorro se reduce a **7 g** de CO<sub>2</sub> equiv por km recorrido, lo que supone un **3 %** de ahorro.

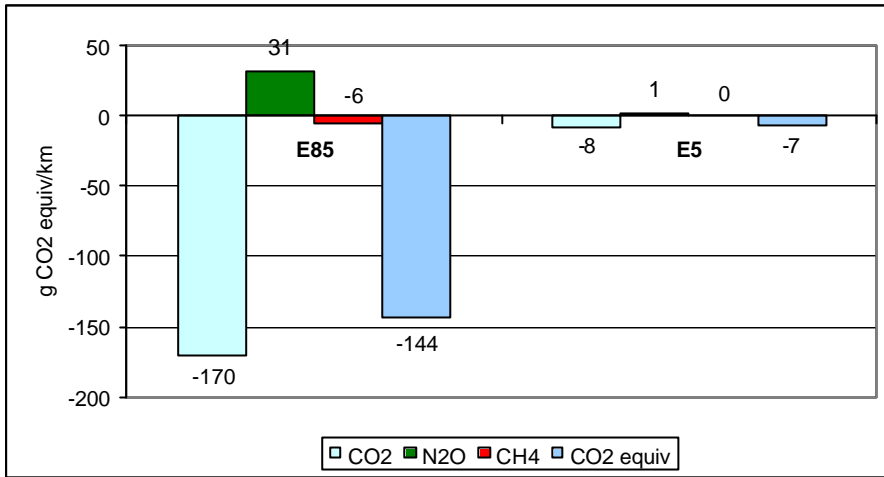


Figura 20. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 estudiadas en comparación con la gasolina

La distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en las distintas etapas del ciclo de vida de las mezclas estudiadas se puede observar en la Figura 21 y en la Tabla 39.

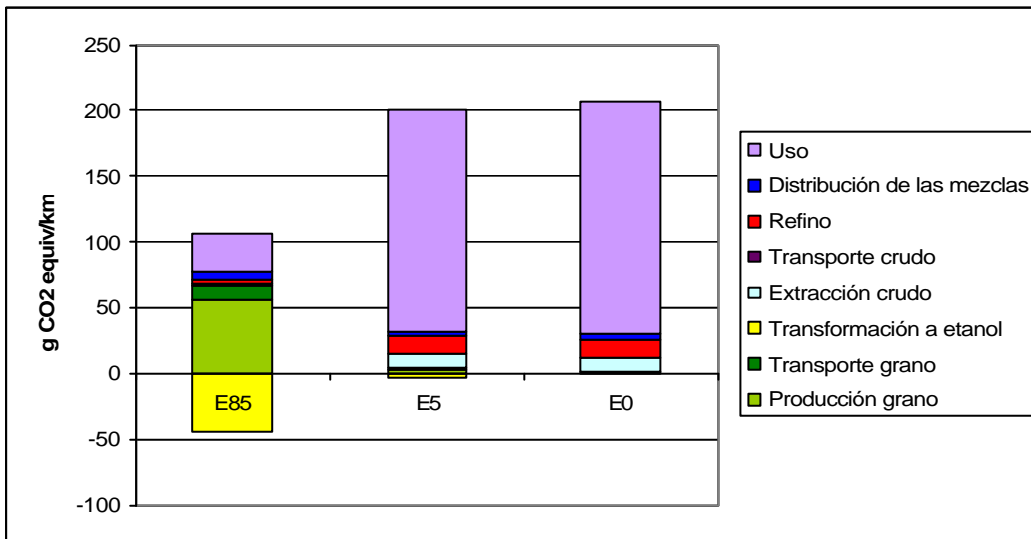


Figura 21. Distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en las distintas etapas del ciclo de vida de las mezclas estudiadas.

Tabla 39. Emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub> equiv/km) en las distintas etapas del ciclo de vida de las mezclas estudiadas

g CO <sub>2</sub> equiv/km	Producción grano	Transporte grano	Transformación a etanol	Extracción crudo	Transporte crudo	Refino	Distribución de las mezclas	Uso
E85	6,19	0,98	15,15	2,04	0,18	2,77	5,72	28,45
E5	0,37	0,06	0,90	9,83	0,85	13,33	3,64	168,85
E0	0,10	0,02	0,24	10,14	0,88	13,75	3,53	177,47

En el ciclo de vida de la mezcla E85 las mayores emisiones de gases de efecto invernadero se producen en la etapa de uso debido a la combustión de la parte de gasolina que entra a formar parte de la mezcla, seguido de la etapa de transformación a

etanol debido a la combustión del gas natural en la planta de cogeneración. Se producen también importantes emisiones en la producción agrícola del grano de cereal debido sobre todo a las altas emisiones de óxido nítrico originadas por el uso de fertilizantes nitrogenados y en menor medida a las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en la combustión del gasoil en los tractores agrícolas y a las emisiones derivadas del uso de energía en la producción de fertilizantes. En los otros dos carburantes las emisiones de gases de efecto invernadero tienen lugar mayoritariamente en la etapa de uso del combustible al ser quemado dentro del motor del vehículo, seguido de la etapa de refinado y la extracción del crudo.

Para tener en cuenta la fijación de CO<sub>2</sub> en la etapa agrícola del cultivo se ha considerado que las emisiones en la etapa de uso que provienen de la combustión del etanol de la mezcla son cero. En efecto, todo el CO<sub>2</sub> emitido en esta etapa ha sido previamente fijado en la etapa de crecimiento del cultivo. Sin embargo, estas emisiones tienen lugar y lo que realmente se produce es un sumidero de CO<sub>2</sub> en la etapa de crecimiento del cultivo. En la Figura 22 podemos observar este efecto sumidero del cultivo de cereal en la etapa de producción agrícola. En esta figura se han distribuido las emisiones de gases de efecto invernadero entre las etapas de producción (producción agrícola, transporte del grano y extracción y transporte del crudo), transformación (transformación a etanol, y refinado) distribución y uso. La fijación de CO<sub>2</sub> en la etapa agrícola se ha considerado como una emisión negativa en esta etapa y en la etapa de uso se han considerado las emisiones totales de CO<sub>2</sub> (las que provienen de la gasolina y las que provienen del etanol). Como se puede observar en la etapa de producción de E85 se fija más CO<sub>2</sub> que se emite por lo que podría considerarse como un sumidero de CO<sub>2</sub>. El resto de las etapas son emisoras netas de gases de efecto invernadero. En conjunto, la producción y uso de las mezclas estudiadas produce emisiones netas de gases de efecto invernadero.

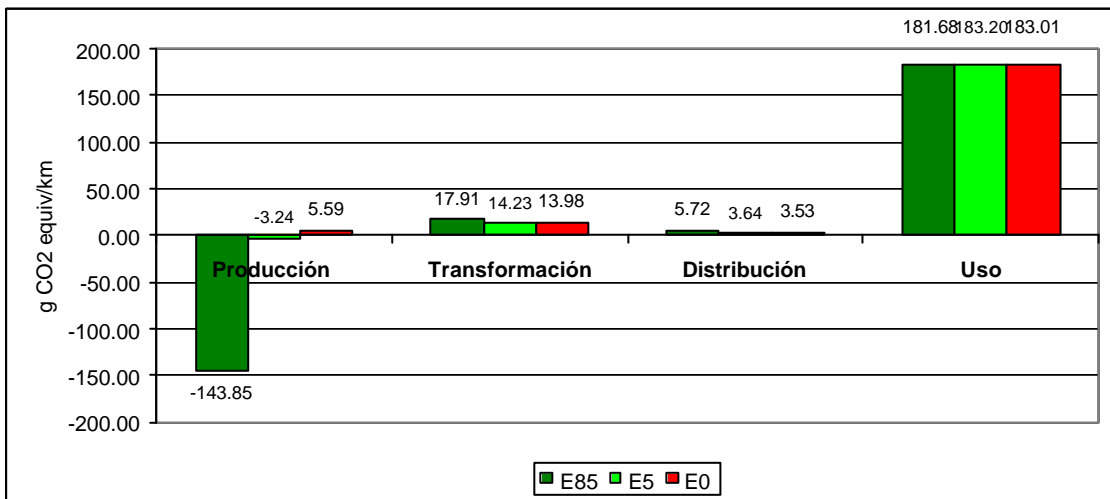


Figura 22. Emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas estudiados teniendo en cuenta la fijación de CO<sub>2</sub> en la etapa de producción agrícola.

#### 4 ESCENARIO DE INTRODUCCIÓN DE E5 Y E85

Se han evaluado las consecuencias en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero de un escenario de introducción de vehículos con etanol en la flota de turismos en el año 2010, con el objetivo de evaluar el potencial de ahorro de emisiones

de CO<sub>2</sub> que estas medidas de introducción de biocombustibles podrían suponer de cara al cumplimiento de los objetivos de reducción de Kioto.

#### 4.1 Descripción del escenario analizado

Partiendo de la evolución del parque de turismos español en los últimos 10 años (DGT, 2003) se ha hecho una previsión de dicho parque para el año 2010, extrapolando los datos de crecimiento observado de turismos diesel y gasolina utilizando regresión lineal. Esta previsión se puede observar en la Figura 23. La flota de vehículos de gasolina prevista para el año 2010 se estima alrededor de 12800000 vehículos. Esta situación se considera como el escenario de referencia sin introducción de turismos con bioetanol.

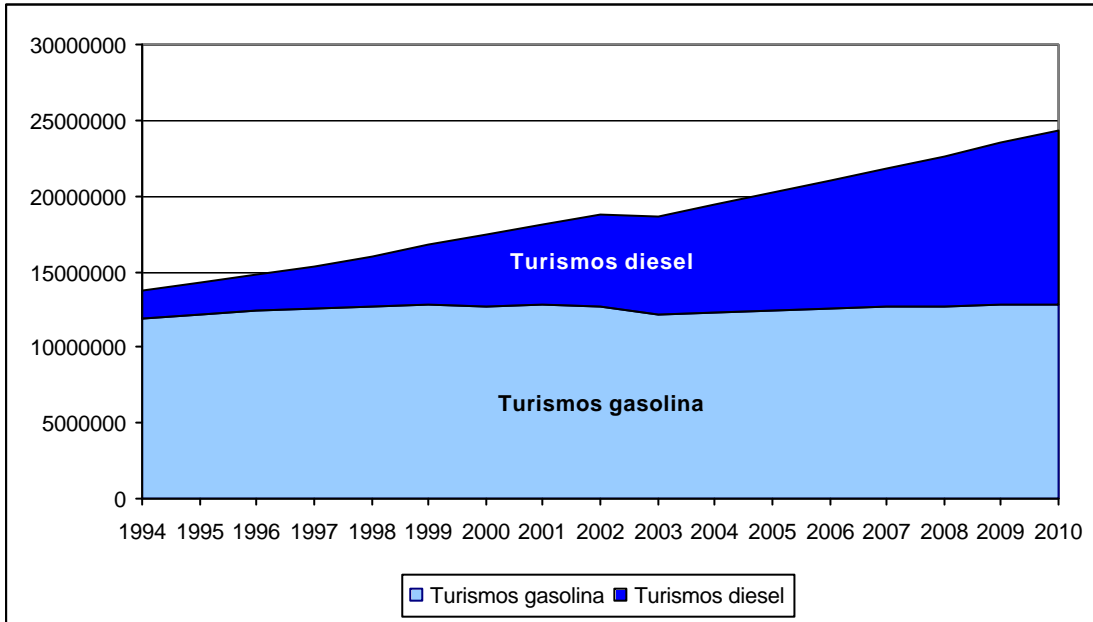


Figura 23. Previsiones de crecimiento de la flota de turismos hasta el año 2010.

El escenario de introducción de turismos con bioetanol analizado es el siguiente:

- se considera la introducción gradual de vehículos de combustible flexible (FFV) que consumen la mezcla E85 en flotas cautivas alcanzando una flota de 1050000 unidades en el año 2010. Estos vehículos FFV sustituyen a nuevas matriculaciones de turismos de gasolina.
- El resto de la flota de turismos de gasolina utilizan la mezcla E5. La flota estimada de vehículos de gasolina en el año 2010 es de alrededor de 11760000

El escenario de introducción de vehículos con bioetanol se puede observar en la Figura 24.

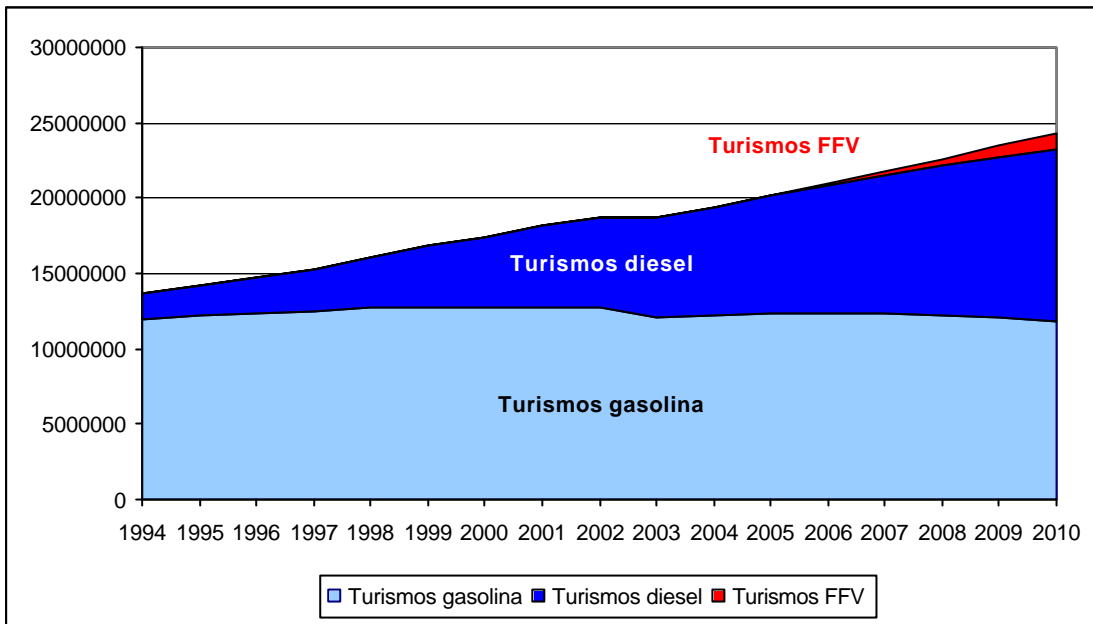


Figura 24. Escenario de introducción de vehículos de bioetanol

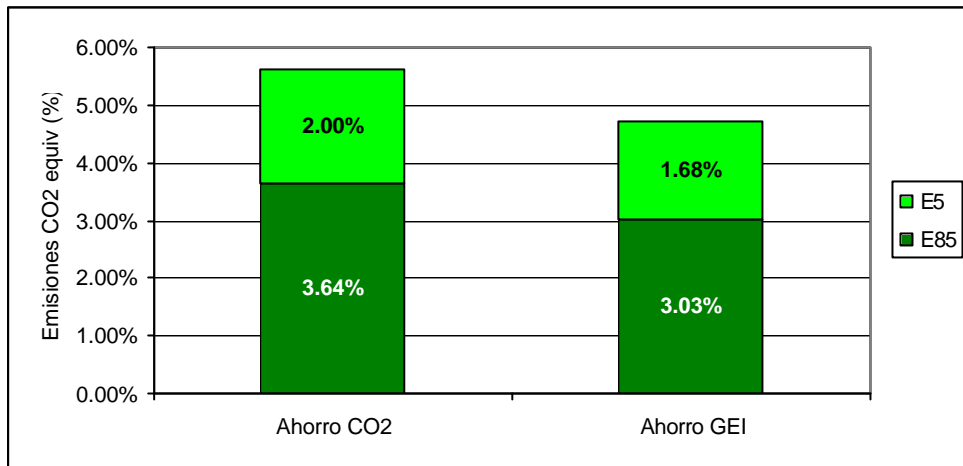
#### 4.2 Ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero

Teniendo en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero (GEI) calculadas en la sección anterior para los vehículos que utilizan las distintas mezclas estudiadas se pueden cuantificar las emisiones de los dos escenarios considerados y el ahorro producido por la introducción de bioetanol. Para este cálculo se ha considerado un kilometraje anual de los turismos de 11723 km/año (Hickman, 1999)

Tabla 40. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios analizados

Escenario		Número de vehículos flota 2010	Emisiones CO <sub>2</sub> g/km	Emisiones GEI g/km	Emisiones CO <sub>2</sub> 2010 (t)	Emisiones GEI 2010 (t)	Ahorro CO <sub>2</sub> (t)	Ahorro GEI (t)
Introducción bioetanol	E85	1050000	20	61	240644	756274	<b>32396412756621</b>	
	E5	11760642	181	198	24976668	27360440		
Referencia	Gasolina 95	12810642	189	206	28456953	30873335		

El total de emisiones del sector del transporte en el año 1990, año de referencia para la reducción de emisiones del protocolo de Kioto, es de 57.496,5 kt de CO<sub>2</sub> y 58.505,85 kt de GEI expresados en kt equivalentes de CO<sub>2</sub>. El ahorro de emisiones producido por la introducción de bioetanol en el escenario considerado supone un **5,63%** de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 1990 y **4,71%** de las emisiones de GEI de 1990. La contribución de cada una de las dos medidas consideradas (introducción de FFV con E85 e introducción de E5 en toda la flota de turismos de gasolina) se puede observar en la Figura 25.



**Figura 25. Ahorro de CO<sub>2</sub> y GEI conseguido con la introducción de bioetanol.**



## SECCIÓN IV. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 1 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS ANALIZADOS

Se han elegido una serie de variables sobre las que se realizará un análisis de sensibilidad de los resultados del ACV. Estas variables se han elegido en función de los resultados obtenidos en estudios similares descritos en la bibliografía. Las variables elegidas para realizar análisis de sensibilidad son las siguientes:

- **AS1. Fijación de C en el suelo en forma de rizodepósitos.** Como escenario base se ha considerado que existe una fijación de C en el suelo de 41,67kgC/t grano de cereal, y como escenario alternativo se ha considerado que no existe tal fijación.
- **AS2. Emisiones de N<sub>2</sub>O de la agricultura.** Las emisiones de óxido nitroso procedentes de los cultivos agrícolas contribuyen de forma notable a los resultados de impactos sobre el calentamiento global en varios de los estudios de ACV considerados (Ademe, Ecobilan PriceWaterhouseCoopers, Direm (2002), General Motors Corporation, Argonne National Laboratory, BP, ExxonMobil, Shell (2001)), y son una variable sobre la que se ha realizado un estudio de sensibilidad utilizando como valor de referencia las emisiones medidas en condiciones de cultivo de cereales españoles (Vallejo, 2003), y como valores alternativos los extremos del rango recomendado por el IPCC (IPCC, 1996).
- **AS3. Origen del cereal.** Como caso base se ha elegido un escenario en el que el 100% del cereal es nacional. Como caso alternativo se ha elegido una distribución al 50% entre el cereal importado y el nacional
- **AS4. Distancia de transporte del grano.** El escenario elegido como de referencia no está optimizado en cuanto a la distancia de transporte del grano hasta las plantas de producción puesto que hemos considerado que el 100% del cereal es nacional cuando las plantas están situadas lejos de las zonas cerealistas y cerca de puertos marítimos. Para analizar la importancia de la distancia de transporte en los resultados vamos a considerar como escenario alternativo el que las plantas de producción estuvieran situadas cercanas a las zonas de producción de la materia prima, disminuyendo las distancias de transporte hasta un máximo de 100 km.
- **AS5. Producción relativa de las plantas de etanol.** Se ha considerado como caso base que Bioetanol Galicia contribuye a la producción total del etanol estudiado en un 56% y Ecocarburantes en un 44%. Se ha hecho un estudio de sensibilidad que evalúe las consecuencias de otros posibles porcentajes de participación. Hemos elegido como casos extremos un escenario en que sólo produce la planta de Bioetanol Galicia y otro escenario en que solo produce la planta de Ecocarburantes.
- **AS6. Consideración del CO<sub>2</sub> producido y vendido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso.** Como ya indicamos en la sección II de Inventario, en el escenario de referencia no se ha considerado esta producción de CO<sub>2</sub> como un co-producto ya que considerábamos que no podría desplazar a la producción de CO<sub>2</sub> que se produce como sub.-producto en las

empresas de fabricación de fertilizantes. Como escenario alternativo consideraremos que esto pueda llegar a producirse para evaluar la influencia de este parámetro.

- **AS7. Sustitución de la electricidad de cogeneración.** Como caso base se ha considerado que la electricidad producida en las plantas de cogeneración de las plantas de producción de bioetanol sustituye de forma marginal a la producción de electricidad en plantas de carbon y fuel. Este parámetro afecta mucho a los resultados y se presentaran los resultados de un escenario alternativo en el que la sustitución de la electricidad de la planta de generación se realiza por electricidad del mix de generación español.
- **AS8. Consumo de combustible de la mezcla E5.** Como se ha indicado en la sección I, existe una controversia importante sobre el efecto de la mezcla de etanol en la gasolina a bajo porcentaje sobre el incremento de eficiencia del motor y por tanto sobre el consumo volumétrico del mismo. En el escenario de referencia se ha considerado que existe un incremento de consumo de un 2% y en el escenario alternativo se considerará que no existe esta penalización de consumo y que el vehículo con E5 consume el mismo volumen de combustible que el vehículo con gasolina.
- **AS9. Reglas de asignación entre los distintos co-productos.** En todos los casos en los que existen co-productos se han aplicado métodos de asignación alternativos para evaluar el efecto del método de asignación en los resultados del ACV realizado. El sistema de asignación alternativo es el de asignación por valor económico de los subproductos.

## 2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 2.1 Fijación de carbono en el suelo en forma de rizodepósitos

Como caso base hemos considerado que existe un fijación neta de C en el suelo en forma de rizodepósitos que, según la revisión bibliográfica realizada, se ha estimado en 41,67 kg C/t de grano cosechado. Como escenario alternativo para análisis de sensibilidad se ha considerado que no existe tal fijación de C en el suelo.

Los resultados del análisis de sensibilidad, que afectan solo a las emisiones de gases de efecto invernadero, se muestran en la Tabla 41.

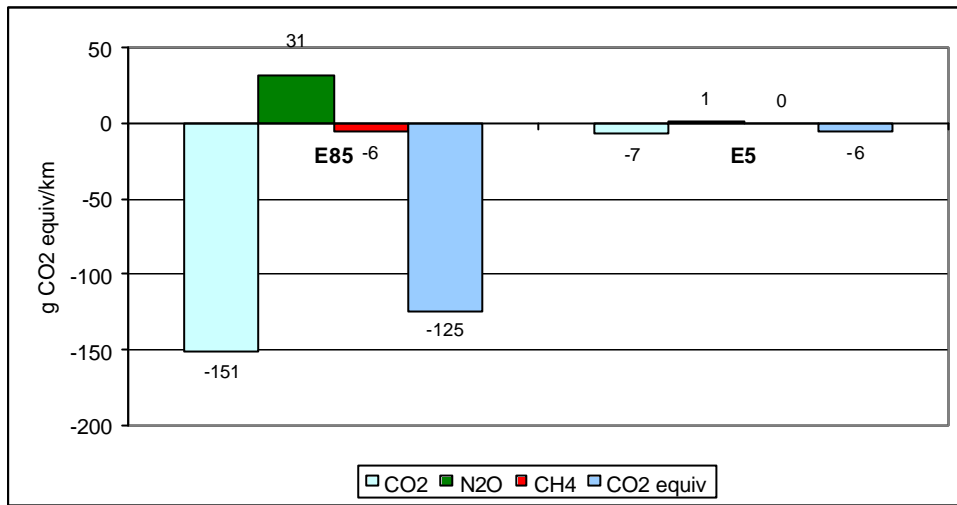
**Tabla 41. Emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de las mezclas estudiadas (gr CO<sub>2</sub> equiv/km) sin tener en cuenta fijación de C en rizodepósitos**

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Total
Sistema A1: E85	38,95	39,40	2,49	81
Sistema A2: E5	182,16	9,37	7,92	199
Sistema B: Gasolina 95	189,49	7,96	8,13	206

Según puede observarse en la Figura 26 las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por la producción y uso de E85 en lugar de gasolina 95 son ahora de **151 gr** por cada km recorrido lo que supone un ahorro de un **79%** de las emisiones de CO<sub>2</sub> por km. En cuanto a la mezcla E5, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas son de **7 gr/km** lo que supone un ahorro de un **4%**.

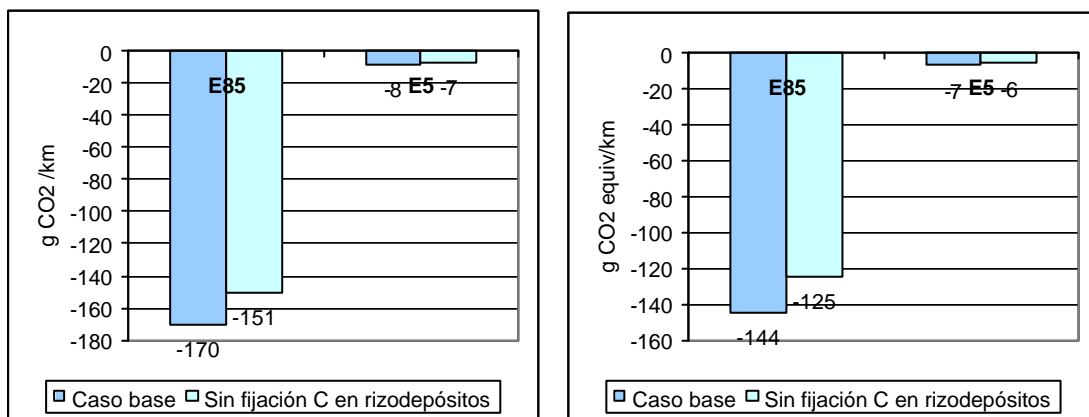
Las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en gr de CO<sub>2</sub> equivalentes también disminuyen considerablemente al sustituir gasolina 95 por E85 aunque en menor medida que en el escenario base considerado, siendo estas emisiones evitadas de

**125 gr por km recorrido lo que constituye un ahorro de un 61%.** En cuanto a la mezcla E5, las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas son de **6 gr/km** lo que supone un ahorro de un **3%**.



**Figura 26. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 estudiadas en comparación con la gasolina**

Las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero (en CO<sub>2</sub> equivalentes) en el escenario base y el escenario alternativo no considerando fijación de C en el suelo en forma de rizodepósitos se muestran en la Figura 27.



**Figura 27. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los dos escenarios considerados**

## 2.2 Emisiones de N<sub>2</sub>O en la etapa de producción agrícola.

Como valor de referencia en el escenario base se han considerado las emisiones medidas en condiciones de cultivo de cereales españoles (Vallejo, 2003), que son como media un 1% del N aplicado en fertilización y como valores alternativos para el análisis de sensibilidad los extremos del rango recomendado por el IPCC (IPCC, 1996). Así, los valores considerados en cada uno de los escenarios de este análisis de sensibilidad son los siguientes:

- Escenario base: 1% del N aplicado en fertilización
- Escenario 1 (valor inferior del rango del IPCC): 0,25% del N aplicado en fertilización

- Escenario 2 (valor superior del rango del IPCC): 1,25% del N aplicado en fertilización

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 42.

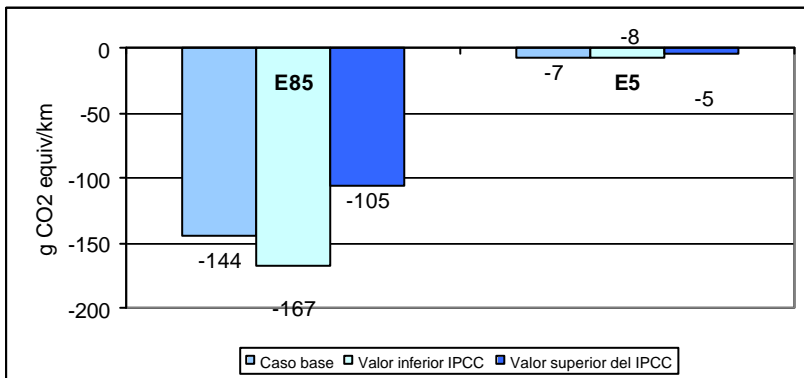
**Tabla 42. Emisiones de N<sub>2</sub>O y gases de efecto invernadero en los escenarios analizados**

	Emisiones de N <sub>2</sub> O (g CO <sub>2</sub> equiv)			Gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> equiv)		
	Caso base	Valor inferior IPCC	Valor superior IPCC	Caso base	Valor inferior IPCC	Valor superior IPCC
Sistema A1:						
E85	39,40	16,10	78,20	61	38	100
Sistema A2: E5	9,37	8,27	11,20	198	197	200
Sistema B:						
Gasolina 95	7,96	7,91	8,06	206	206	206

**2.2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> no se ven afectadas por el cambio realizado. Lo mismo ocurre con las emisiones de metano, no así las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en g de CO<sub>2</sub> equivalentes que disminuyen considerablemente en el escenario en el que se considera el valor inferior del rango del IPCC, pero que aumentan en el escenario en el que se considera el valor superior del rango del IPCC.

Así, como se puede ver en la Figura 28, la sustitución de gasolina por E85 en el escenario 1 permite evitar **167** g de CO<sub>2</sub> equiv por cada km recorrido lo que supone un ahorro de un **81%**, y en el escenario 2 se ahorran **105** g CO<sub>2</sub> equiv por cada km recorrido lo que supone un ahorro de un **51%** por cada km recorrido.



**Figura 28. Emisiones evitadas de gases de efecto invernadero en los escenarios considerados**

Como se puede ver en la Figura 29 la sustitución de gasolina por E85 supone un aumento de 8 g CO<sub>2</sub> equivalentes en forma de óxido nítrico por cada km recorrido en el escenario 1 y de 70 g CO<sub>2</sub> equiv en forma de óxido nítrico por cada km recorrido en el escenario 2.

Respecto a la mezcla E5 los efectos en el escenario 1 apenas son apreciables, ya que la proporción de etanol en la mezcla es muy reducida. En el escenario 2 suponen un aumento de 3g CO<sub>2</sub> equivalentes por cada km recorrido.

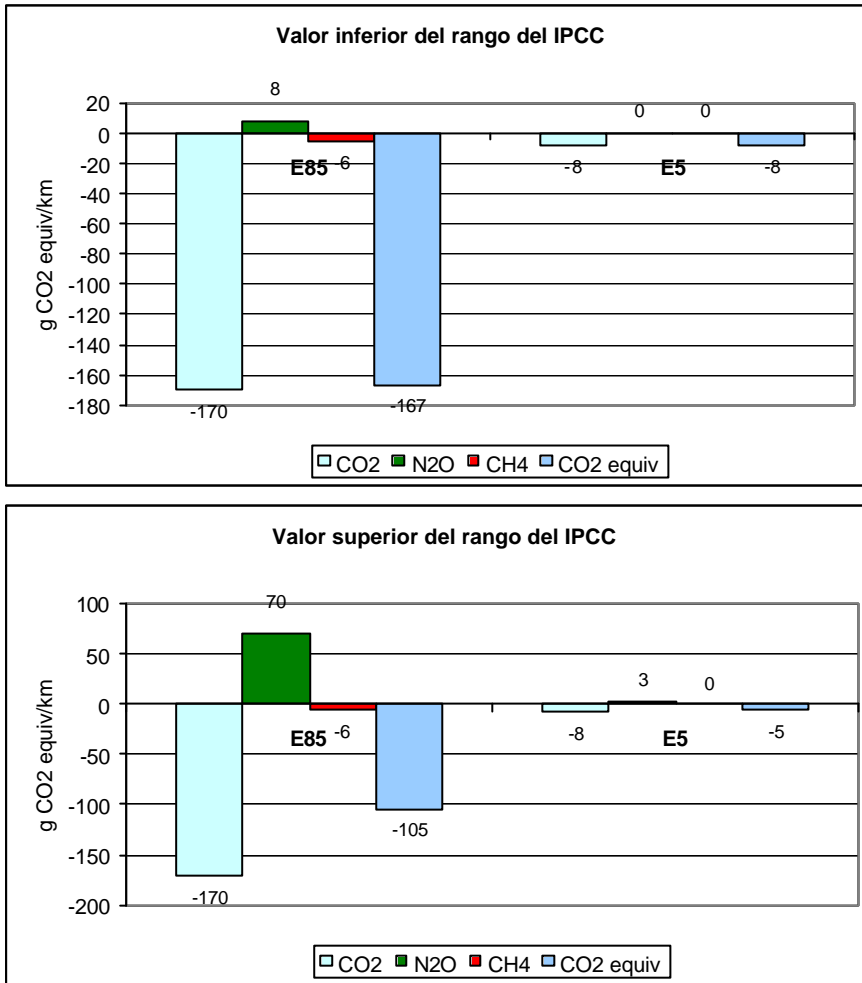


Figura 29. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 estudiadas en comparación con la gasolina en los escenarios 1 y 2.

### 2.3 Origen del cereal

Como caso base se ha elegido un escenario en el que el 100% del cereal es nacional. Como caso alternativo para análisis de sensibilidad se ha elegido una distribución al 50% entre el cereal importado y el nacional.

#### 2.3.1 Uso de energía primaria y energía fósil

El uso de energía primaria total en los dos escenarios analizados se muestra en la Tabla 43. Como puede observarse, la introducción de cereal importado en un 50% aumenta el uso de energía primaria por km recorrido en el caso del E85 en un 1%. En los sistemas A2 y A3, este efecto es inapreciable.

Tabla 43. Energía primaria utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados

	Energía primaria total Escenario base (MJ/km)	Energía primaria total Escenario 50/50 (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325	2,357
Sistema A2: E5	2,798	2,800
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2,807

En cuanto a la energía fósil, tal y como puede observarse en la Tabla 44, se produce un efecto similar. Es decir, la introducción de cereal importado produce un incremento del uso de energía fósil en el sistema A1 de un 2%, y no produce ningún efecto apreciable en el sistema A2.

**Tabla 44. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados**

	Energía fósil Escenario base (MJ/km)	Energía fósil Escenario 50/50 (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778	1,812
Sistema A2: E5	2,747	2,749
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,779

### 2.3.2 Eficiencia energética y ratio de energía fósil

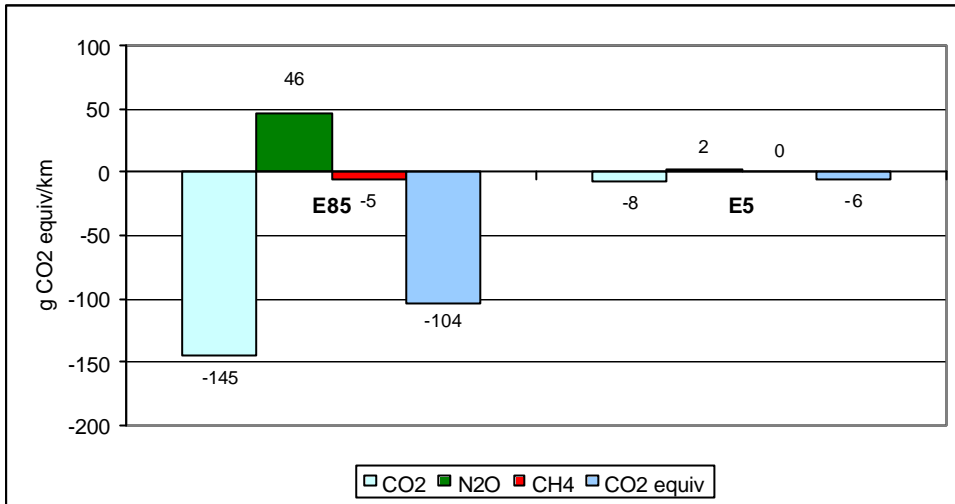
Como puede observarse en la Tabla 45 las eficiencias energéticas empeoran ligeramente en el caso de la mezcla E85 al haberse aumentado los consumos energéticos en el ciclo de vida. El ratio de energía fósil de la producción de etanol en este escenario es ahora de **1,45 MJ etanol/MJ energía fósil**, frente al valor de 1,49 que se obtenía en el escenario de referencia.

**Tabla 45. Eficiencias energéticas del ciclo de vida y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas, en los dos escenarios.**

	Eficiencia energética del ciclo de vida (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )		Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )	
	Escenario base	Escenario 50/50	Escenario base	Escenario 50/50
Sistema A1: E85	0,965	0,952	1,262	1,238
Sistema A2: E5	0,844	0,843	0,860	0,859
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,839	0,848	0,848

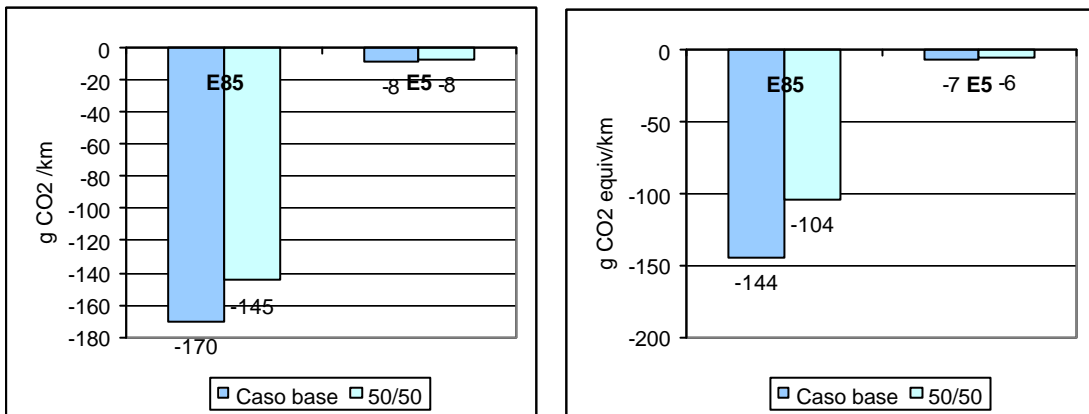
### 2.3.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en este escenario son menores que en el escenario base, como puede observarse en la Figura 30. Así, en este escenario la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la mezcla E85 frente a la gasolina es de **145 g** frente a los 170 g/km del escenario base. En valores porcentuales, este ahorro de CO<sub>2</sub> supone ahora un **76%** frente al 90% del escenario de referencia. El mismo efecto se produce para la mezcla E5.



**Figura 30. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 respecto de la gasolina en el escenario de introducción de cereal importado**

Se produce además un aumento de emisiones de oxido nitroso y de metano por lo que el ahorro de gases de efecto invernadero de la mezcla E85 frente a la gasolina en este nuevo escenario es de **104 g/km (51%)** frente a los 144 g/km (70%) del escenario base. Este efecto puede observarse con mayor claridad en las siguientes figuras.



**Figura 31. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios considerados**

## 2.4 Analisis de sensibilidad de la distancia de transporte del grano.

El escenario elegido como de referencia no está optimizado en cuanto a la distancia de transporte del grano hasta las plantas de producción puesto que hemos considerado que el 100% del cereal es nacional cuando las plantas están situadas lejos de las zonas cerealistas y cerca de puertos marítimos. Para analizar la importancia de la distancia de transporte en los resultados vamos a considerar como escenario alternativo el que las plantas de producción estuvieran situadas cercanas a las zonas de producción de la materia prima, disminuyendo las distancias de transporte hasta un máximo de 100 km.

### 2.4.1 Uso de energía primaria y energía fósil

El uso de energía primaria total en los dos escenarios analizados se muestra en la Tabla 49. Como puede observarse, la introducción de consideración de una menor distancia de transporte para el grano disminuye el uso de energía primaria por km recorrido en el caso del E85 en un 4%. En el sistema A2 el efecto es inapreciable..

**Tabla 46. Energía primaria utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados**

	Energía primaria total Escenario base (MJ/km)	Energía primaria total Escenario menor distancia (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325	2.235
Sistema A2: E5	2,798	2.792
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2.803

En cuanto a la energía fósil, tal y como puede observarse en la Tabla 44, se produce un efecto similar. Es decir, la consideración de una menor distancia de transporte para el grano produce un menor uso de energía fósil en el sistema A1 cifrado en un 5%, y no produce ningún efecto apreciable en el sistema A2.

**Tabla 47. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados**

	Energía fósil Escenario base (MJ/km)	Energía fósil Escenario menor distancia (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778	1,689
Sistema A2: E5	2,747	2,740
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,775

#### 2.4.2 Eficiencia energética y ratio de energía fósil

Como puede observarse en la Tabla 49 las eficiencias energéticas mejoran sensiblemente en el caso de la mezcla E85 al haberse disminuido los consumos energéticos en el ciclo de vida. El ratio de energía fósil de la producción de etanol en este escenario es ahora de **1,6 MJ etanol/MJ energía fósil**, frente al valor de 1,49 que se obtenía en el escenario de referencia.

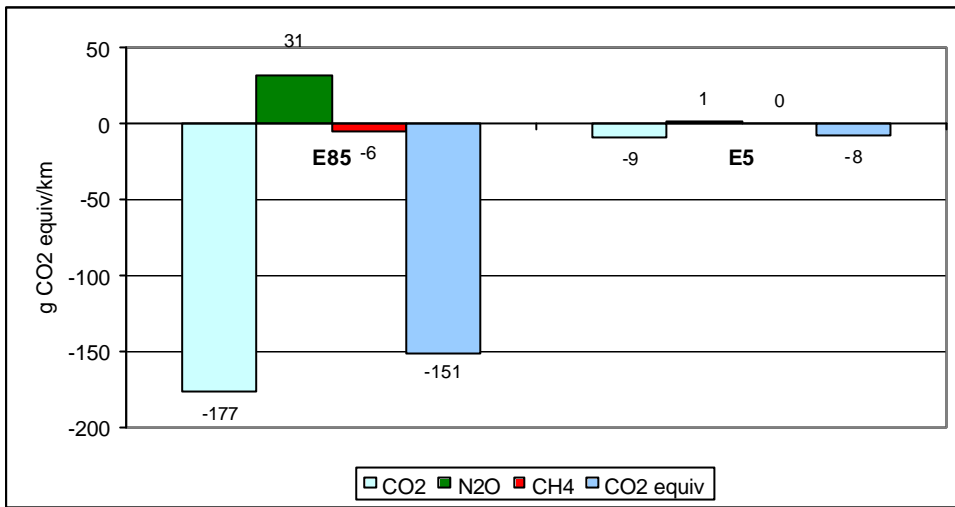
**Tabla 48. Eficiencias energéticas del ciclo de vida y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas, en los dos escenarios.**

	Eficiencia energética del ciclo de vida ( $\text{MJ}_{\text{combustible}}/\text{MJ}_{\text{energía primaria}}$ )		Ratio de energía fósil ( $\text{MJ}_{\text{combustible}}/\text{MJ}_{\text{energía fósil}}$ )	
	Escenario base	Escenario 100km	Escenario base	Escenario 100km
Sistema A1: E85	0,965	1,004	1,262	1,329
Sistema A2: E5	0,844	0,846	0,860	0,862
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,840	0,848	0,849

#### 2.4.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

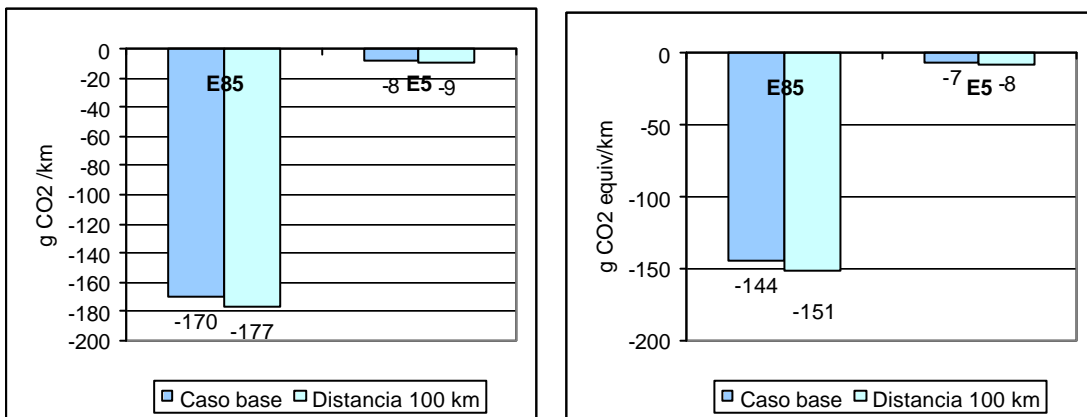
Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en este escenario son mayores que en el escenario base, como puede observarse en la Figura 34. Así, en este escenario la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la mezcla E85 frente a la gasolina es de **177 g** frente a los 170 g/km del

escenario base. En valores porcentuales, este ahorro de CO<sub>2</sub> supone ahora un **93%** frente al 90% del escenario de referencia. El mismo efecto se produce para la mezcla E5.



**Figura 32. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 respecto de la gasolina en el escenario de distancia de transporte de 100 km**

El ahorro de gases de efecto invernadero de la mezcla E85 frente a la gasolina en este nuevo escenario es de **151 g/km** (74%) frente a los 144 g/km (70%) del escenario base. Este efecto puede observarse con mayor claridad en las siguientes figuras.



**Figura 33. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios considerados**

## 2.5 Análisis de sensibilidad de la producción de las plantas de producción de etanol

Se ha considerado como caso base que Bioetanol Galicia contribuye a la producción total del etanol estudiado en un 56% y Ecocarburantes en un 44%. Se ha hecho un estudio de sensibilidad que evalúa las consecuencias de otros posibles porcentajes de participación. Hemos elegido como casos extremos un escenario (escenario 1) en que sólo produce la planta de Bioetanol Galicia y otro escenario (escenario 2) en que solo produce la planta de Ecocarburantes.

### 2.5.1 Uso de energía primaria y energía fósil

El uso de energía primaria total en los dos escenarios analizados se muestra en la Tabla 49 en comparación con el escenario base. Como puede observarse, la producción de etanol únicamente por la planta de Bioetanol Galicia produce un descenso en el consumo de energía primaria en el caso de la mezcla E85 que se cifra en un **9%** frente a

la distribución de producciones considerada en el escenario base. Alternativamente, la producción de etanol exclusivamente por la planta de Ecocarburantes (escenario 2) produce un mayor uso de energía primaria, en el caso de la mezcla E85, que se cifra en un **21%**. En los otros dos sistemas, este efecto es apenas apreciable (menor del 2%).

**Tabla 49. Energía primaria utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía primaria total		
	Escenario base (MJ/km)	Escenario 1 (MJ/km)	Escenario 2 (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325	2,233	2,442
Sistema A2: E5	2,798	2,791	2,806
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2,803	2,809

En cuanto a la energía fósil, tal y como puede observarse en la Tabla 50 se produce el mismo efecto. Es decir, la producción de etanol en la planta de Bioetanol Galicia exclusivamente produce un menor consumo de energía fósil de la mezcla E85 cifrado en un 5%, y la producción de etanol en la planta de Ecocarburantes exclusivamente produce un aumento del uso de energía fósil de un 12%. En el sistema A2 el efecto es apenas apreciable (menor del 1%).

**Tabla 50. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía fósil		
	Escenario base (MJ/km)	Escenario 1 (MJ/km)	Escenario 2 (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778	1,727	1,844
Sistema A2: E5	2,747	2,743	2,751
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,776	2,780

### 2.5.2 Eficiencia energética y ratio de energía fósil

Como puede observarse en la Tabla 51, en el escenario 1, en el que sólo produce etanol la planta de Bioetanol Galicia, la eficiencia energética mejora sensiblemente en el caso de la mezcla E85 al haberse disminuido los consumos de energía primaria en el ciclo de vida. En cuanto al escenario 2, en el que solo produce etanol la planta de Ecocarburantes, la eficiencia energética empeora también sensiblemente al haberse aumentado los consumos de energía primaria respecto del escenario base.

**Tabla 51. Eficiencia energética del ciclo de vida de las mezclas estudiadas en los tres escenarios analizados.**

	Eficiencia energética del ciclo de vida (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )		
	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2
Sistema A1: E85	0,965	1,005	0,919
Sistema A2: E5	0,844	0,846	0,842
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,840	0,838

En cuanto al ratio de energía fósil el efecto observado es el mismo. El ratio de energía fósil de la producción de etanol en el escenario 1 es de **1,299** MJ<sub>etanol</sub>/MJ<sub>energía fósil</sub>,

y en el escenario 2 es de **1,217** MJ<sub>etanol</sub>/MJ energía fósil frente al valor de **1,262** que se obtenía en el escenario de referencia.

**Tabla 52. Ratio de energía fósil del ciclo de vida de las mezclas estudiadas en los tres escenarios analizados.**

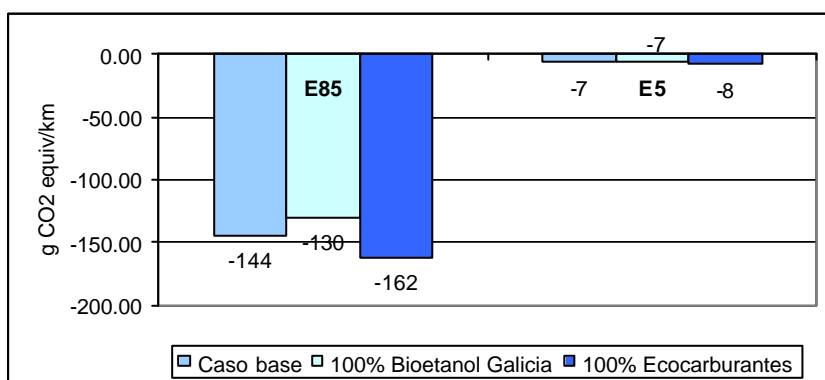
	Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )		
	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2
Sistema A1: E85	1,262	1,299	1,217
Sistema A2: E5	0,860	0,861	0,858
Sistema B: Gasolina 95	0,848	0,848	0,847

### 2.5.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en g de CO<sub>2</sub> equivalentes por km recorrido aumentan considerablemente en el escenario en el que se considera la producción exclusiva con la planta de Bioetanol Galicia, y disminuyen en el escenario en el que se considera la producción exclusiva de bioetanol por la planta de Ecocarburantes.

Así, como se puede ver en la Figura 34, la sustitución de gasolina por E85 en el escenario 1 permite evitar **130** g de CO<sub>2</sub> equiv por cada km recorrido lo que supone un ahorro de un **63%**, y en el escenario 2 se evitan **162** g CO<sub>2</sub> equiv por cada km recorrido lo que supone un ahorro de un **79%** por cada km recorrido.

Según los resultados obtenidos, la producción de bioetanol a partir de cebada en la planta de Ecocarburantes tiene un mejor balance de gases de efecto invernadero que la producción de bioetanol a partir de trigo en la planta de Bioetanol Galicia.



**Figura 34. Emisiones evitadas de gases de efecto invernadero en los escenarios considerados**

## 2.6 Consideración del CO<sub>2</sub> producido y vendido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso

Como ya indicamos en la sección II de Inventario, en el escenario de referencia no se ha considerado esta producción de CO<sub>2</sub> como un co-producto ya que considerábamos que no podría desplazar a la producción de CO<sub>2</sub> que se produce como sub.-producto en las empresas de fabricación de fertilizantes. Como escenario alternativo consideraremos que la producción de CO<sub>2</sub> de la planta de Ecocarburantes desplaza del mercado a la producción de CO<sub>2</sub> de una planta de producción de amoníaco.

### 2.6.1 Uso de energía primaria y energía fósil

El uso de energía primaria total en los dos escenarios analizados se muestra en la Tabla 53. Como puede observarse, la consideración del CO<sub>2</sub> producido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso al que se le asignan parte de las cargas del mismo, disminuye el uso de energía primaria por km recorrido en el caso del E85 en un 12%. En el sistema A2, este efecto es inapreciable.

**Tabla 53. Energía primaria utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados**

	Energía primaria total Escenario base (MJ/km)	Energía primaria total Escenario co-producto (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325	2,039
Sistema A2: E5	2,798	2,778
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2,798

En cuanto a la energía fósil, tal y como puede observarse en la Tabla 54 se produce un efecto similar. Es decir, la consideración del CO<sub>2</sub> producido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso, produce una disminución del uso de energía fósil en el sistema A1 de un 11%, y no produce ningún efecto apreciable en los otros sistemas.

**Tabla 54. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezclas estudiadas en los dos escenarios considerados**

	Energía fósil Escenario base (MJ/km)	Energía fósil Escenario co-producto (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778	1,582
Sistema A2: E5	2,747	2,733
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,773

### 2.6.2 Eficiencia energética y ratio de energía fósil

Como puede observarse en la Tabla 55 las eficiencias energéticas mejoran sensiblemente en el caso de la mezcla E85 al haberse disminuido los consumos energéticos en el ciclo de vida. El ratio de energía fósil de la producción de etanol en este escenario es ahora de **1,77** MJ etanol/MJ energía fósil, frente al valor de 1,49 que se obtenía en el escenario de referencia.

**Tabla 55. Eficiencias energéticas del ciclo de vida y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas, en los dos escenarios.**

	Eficiencia energética del ciclo de vida (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )		Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )	
	Escenario base	Escenario co-producto	Escenario base	Escenario co-producto
Sistema A1: E85	0,965	1,100	1,262	1,418
Sistema A2: E5	0,844	0,850	0,860	0,864
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,842	0,848	0,849

### 2.6.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en este escenario son mayores que en el escenario base, como puede observarse en la Figura 35 . Así, en este escenario la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la mezcla E85 frente a la gasolina es de **179 g** frente a los 170 g/km del escenario base. En valores porcentuales, este ahorro de CO<sub>2</sub> supone ahora un **94%** frente al 90% del escenario de referencia. El mismo efecto se produce para la mezcla E5.

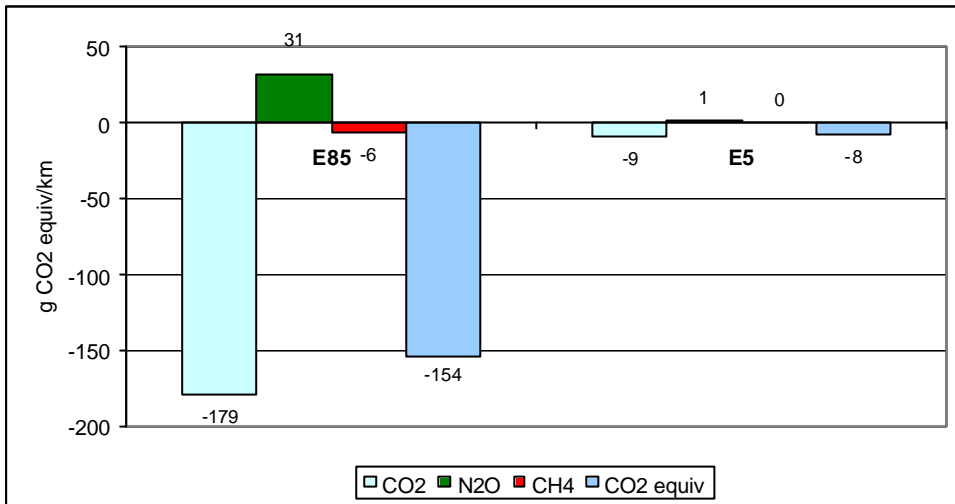


Figura 35. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 respecto de la gasolina en el escenario de CO<sub>2</sub> considerado como co-producto

En cuanto al ahorro de gases de efecto invernadero de la mezcla E85 frente a la gasolina en este nuevo escenario, éste es de 154 g/km (75%) frente a los 144 g/km (70%) del escenario base. Este efecto puede observarse con mayor claridad en las siguientes figuras.

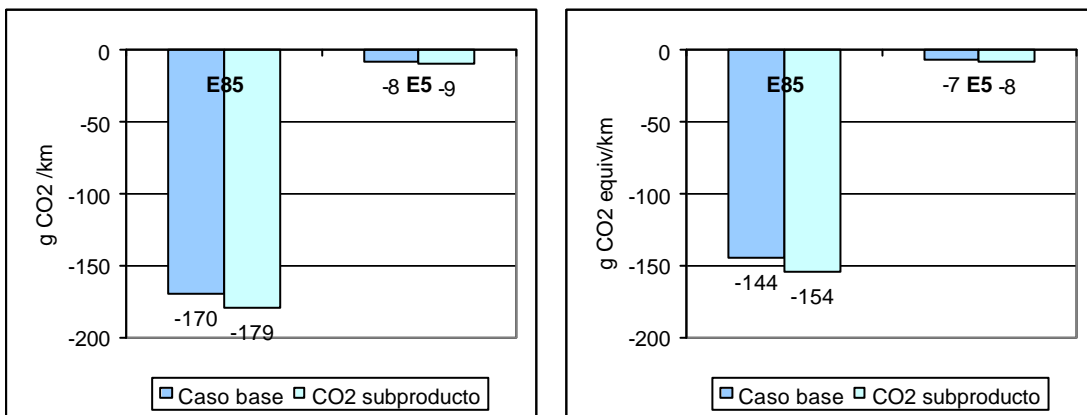


Figura 36. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios considerados

## 2.7 Análisis de sensibilidad de la sustitución de la electricidad de cogeneración.

Como caso base se ha considerado que la electricidad producida en las plantas de cogeneración de las plantas de producción de bioetanol sustituye de forma marginal a la producción de electricidad en plantas de carbón y fuel. Este parámetro afecta mucho a los resultados y se presentaran los resultados de un escenario alternativo en el que la sustitución de la electricidad de la planta de generación se realiza por electricidad del mix de generación español.

### 2.7.1 Uso de energía primaria y energía fósil

El uso de energía primaria total del escenario alternativo analizado se muestra en la Tabla 56 en comparación con el escenario base. Como puede observarse, la sustitución de la electricidad de cogeneración por electricidad del mix nacional produce un incremento en el consumo de energía primaria en todos los casos pero especialmente en el caso de la mezcla E85 en el que este aumento se cifra en un **7%**.

**Tabla 56. Energía primaria total utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía primaria total	
	Escenario base (MJ/km)	Escenario electricidad del mix (MJ/km)
Sistema A1: E85	2,325	2,486
Sistema A2: E5	2,798	2,809
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2,810

En el caso de la energía fósil, la diferencia es algo menor, un 5% en el caso de la mezcla E85, tal y como se puede observar en la Tabla 57.

**Tabla 57. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía fósil	
	Escenario base (MJ/km)	Escenario electricidad del mix (MJ/km)
Sistema A1: E85	1,778	1,862
Sistema A2: E5	2,747	2,752
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,780

### 2.7.2 Eficiencia energética y ratio de energía fósil

Como puede observarse en la Tabla 58 las eficiencias energéticas empeoran sensiblemente en el caso de la mezcla E85 al haberse aumentado los consumos energéticos en el ciclo de vida. El ratio de energía fósil de la producción de etanol en este escenario es ahora de **1,39** MJ etanol/MJ energía fósil, frente al valor de 1,45 que se obtenía en el escenario de referencia.

**Tabla 58. Eficiencias energéticas del ciclo de vida y ratio de energía fósil de las mezclas estudiadas, en los dos escenarios.**

	Eficiencia energética del ciclo de vida (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía primaria</sub> )		Ratio de energía fósil (MJ <sub>combustible</sub> /MJ <sub>energía fósil</sub> )	
	Escenario base	Escenario electricidad del mix	Escenario base	Escenario electricidad del mix
Sistema A1: E85	0,965	0,903	1,262	1,205
Sistema A2: E5	0,844	0,841	0,860	0,858
Sistema B: Gasolina 95	0,839	0,838	0,848	0,847

### 2.7.3 Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en este escenario son menores que en el escenario base, como puede observarse en la Figura 41. Así, en este escenario la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la mezcla E85 frente a la gasolina es de **107 g** frente a los 170 g/km del escenario base. En valores porcentuales, este ahorro de CO<sub>2</sub> supone ahora un **56%** frente al 90% del escenario de referencia. El mismo efecto se produce para la mezcla E5.

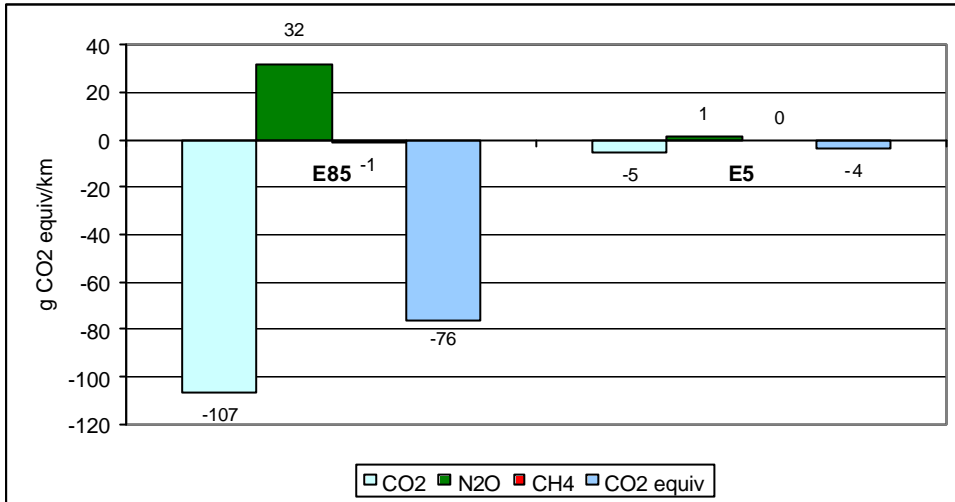


Figura 37. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 respecto de la gasolina en el escenario de que la electricidad de cogeneracion sustituya a electricidad del mix

Se produce además un aumento de emisiones de oxido nitroso y de metano por lo que el ahorro de gases de efecto invernadero de la mezcla E85 frente a la gasolina en este nuevo escenario es de solo **76 g/km** (37%) frente a los 144 g/km (70%) del escenario base. Este efecto puede observarse con mayor claridad en las siguientes figuras.

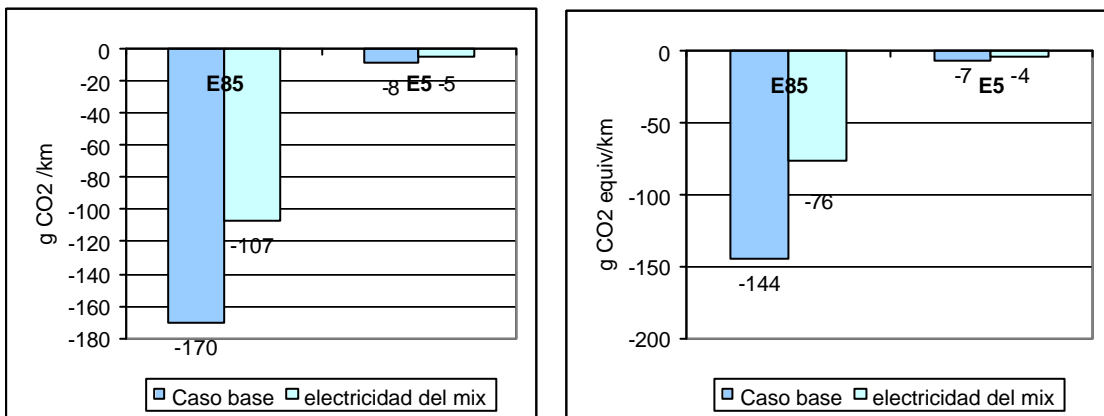


Figura 38. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios considerados

## 2.8 Análisis de sensibilidad del consumo de combustible con la mezcla E5.

Como se ha indicado en la sección I, existe una controversia importante sobre el efecto de la mezcla de etanol en la gasolina a bajo porcentaje sobre el incremento de eficiencia del motor y por tanto sobre el consumo volumétrico del mismo. En el escenario de referencia se ha considerado que existe un incremento de consumo de un 2% y en el escenario alternativo se considerará que no existe esta penalización de consumo y que el vehículo con E5 consume el mismo volumen de combustible que el vehículo con gasolina.

**2.8.1 Uso de energía primaria y energía fósil**

El uso de energía primaria total del escenario alternativo analizado se muestra en la Tabla 59 en comparación con el escenario base. Como puede observarse, considerar un consumo de combustible igual para la mezcla E5 que para la E0, no tiene un efecto observable en el consumo de energía primaria.

**Tabla 59. Energía primaria total utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía primaria total	
	Escenario base (MJ/km)	Escenario igual consumo (MJ/km)
Sistema A2: E5	2,798	2,798
Sistema B: Gasolina 95	2,806	2,806

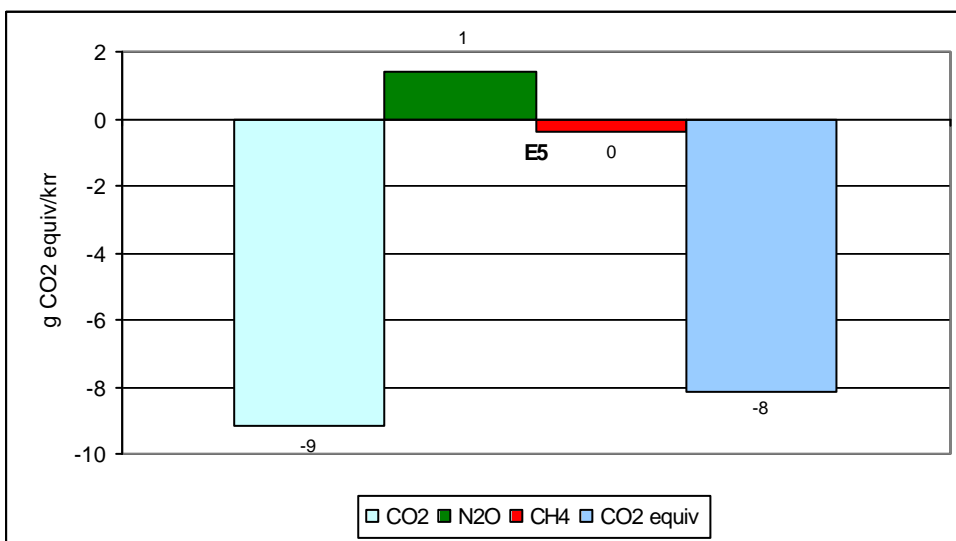
En el caso de la energía fósil, tampoco se observa ningún efecto, tal y como se puede ver en la Tabla 60

**Tabla 60. Energía fósil utilizada para la producción y distribución de las mezcla estudiadas en los tres escenarios considerados**

	Energía fósil	
	Escenario base (MJ/km)	Escenario igual consumo (MJ/km)
Sistema A2: E5	2,747	2,747
Sistema B: Gasolina 95	2,778	2,778

**2.8.2 Emisiones de gases de efecto invernadero**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en este escenario son iguales muy similares a las del escenario base, como puede observarse en la Figura 41. Así, en este escenario la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la mezcla E5 frente a la gasolina es de 9 g frente a los 8 g/km del escenario base.



**Figura 39. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 respecto de la gasolina en el escenario de igual consumo considerado**

El ahorro de gases de efecto invernadero de la mezcla E5 frente a la gasolina en este nuevo escenario es de 8 g/km (4%) frente a los 7 g/km (3%) del escenario base. Este efecto puede observarse con mayor claridad en las siguientes figuras.

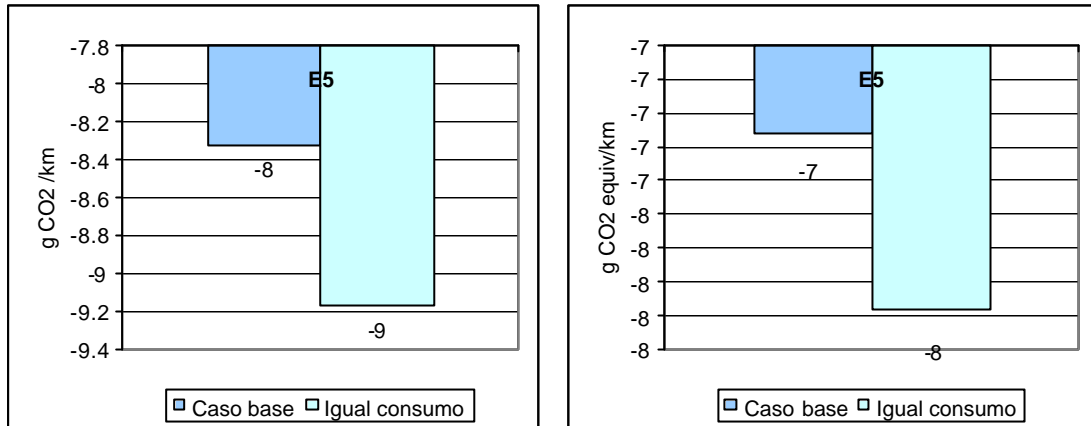


Figura 40. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero en los escenarios considerados

## 2.9 Análisis de sensibilidad del método de asignación

En todos los casos en los que existen co-productos se ha aplicado un método de asignación alternativo para evaluar el efecto del método de asignación en los resultados del ACV realizado. El sistema de asignación alternativo es el de asignación por valor económico de los subproductos. Se han evaluado cinco escenarios:

- Escenario 1: Se ha utilizado el método de asignación por valor económico en la asignación de cargas entre grano y paja en la etapa de producción agrícola, en vez del método de extensión de los límites del sistema. En el resto de los sistemas en los que existen co-productos se ha aplicado el método de asignación original.
- Escenario 2: Se ha utilizado el método de asignación por valor económico en la asignación de cargas entre etanol y los co-productos del proceso de transformación: DDGs y electricidad, en vez del método de extensión de los límites del sistema. En el resto de los sistemas en los que existen co-productos se ha aplicado el método de asignación original.
- Escenario 3: Se ha utilizado el método de asignación por valor económico en la asignación de cargas entre el crudo y el gas natural producido en el proceso de extracción del crudo, en vez del método de asignación por contenido energético. En el resto de los sistemas en los que existen co-productos se ha aplicado el método de asignación original.
- Escenario 4: Se ha utilizado el método de asignación por valor económico para la asignación de cargas entre la gasolina y el resto de los productos de refinería, en vez del método de asignación por contenido energético. En el resto de los sistemas en los que existen co-productos se ha aplicado el método de asignación original.
- Escenario 5: Se ha utilizado el método de asignación por valor económico en todos los procesos en los que hay co-productos.

### 2.9.1 Uso de energía primaria y energía fósil y eficiencia energética y ratio de energía fósil.

Los resultados del análisis de sensibilidad realizado se resumen en la Tabla 61.

**Tabla 61. Energía primaria, energía fósil, eficiencia energética y ratio de energía fósil en los distintos escenarios analizados**

	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
<b>Energía primaria (MJ/km)</b>						
E85	2,325	2,241	3,229	2,333	2,456	3,212
E5	2,798	2,792	2,861	2,843	3,209	3,254
E0	2,806	2,804	2,830	2,852	3,227	3,240
<b>Ahorro de energía primaria (%)</b>						
E85	17%	20%	-14%	18%	24%	1%
E5	0%	0%	-1%	0%	1%	0%
<b>Energía fósil (MJ/km)</b>						
E85	1,778	1,684	2,594	1,786	1,928	2,567
E5	2,747	2,740	2,804	2,790	3,170	3,193
E0	2,778	2,775	2,800	2,823	3,212	3,206
<b>Ahorro de energía fósil (%)</b>						
E85	36%	39%	7%	37%	40%	20%
E0	1%	1%	0%	1%	1%	0%
<b>Eficiencia energética del ciclo de vida</b>						
E85	0,965	1,001	0,695	0,962	0,914	0,698
E5	0,844	0,846	0,825	0,831	0,736	0,726
E0	0,839	0,840	0,832	0,826	0,730	0,727
<b>Ratio de energía fósil</b>						
E85	1,262	1,332	0,865	1,257	1,164	0,874
E5	0,860	0,862	0,842	0,846	0,745	0,740
E0	0,848	0,849	0,841	0,834	0,733	0,735

Según se puede observar en la Figura 41 y en la Figura 42, los consumos de energía primaria y fósil en el sistema E85 son especialmente sensible al cambio de método de asignación en la etapa de transformación a etanol. En cuanto a los otros dos sistemas, los consumos de energía primaria y fósil son sensibles al cambio de método de asignación en la etapa de refino, de forma que la utilización del método de asignación por valor económico aumenta considerablemente estos consumos energéticos.

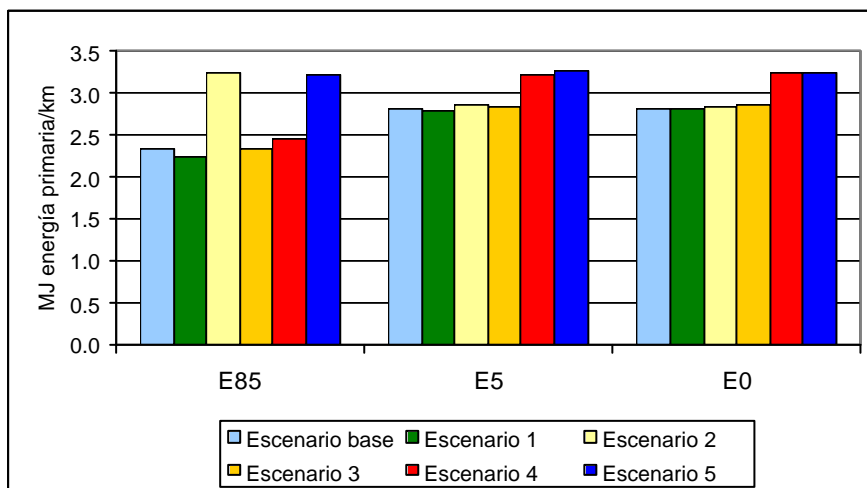


Figura 41. Consumo de energía primaria en la producción y distribución de las mezclas estudiadas, en los distintos escenarios analizados.

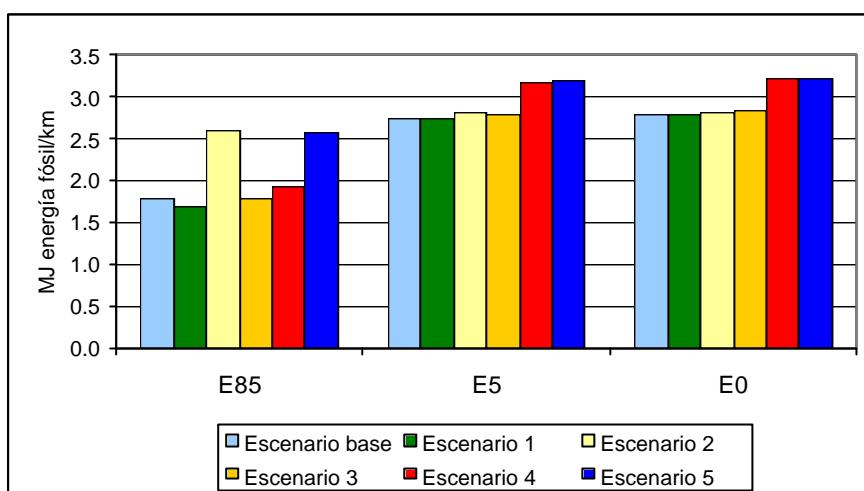


Figura 42. Consumo de energía fósil en la producción y distribución de las mezclas estudiadas, en los distintos escenarios analizados.

## 2.9.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, los resultados obtenidos en los distintos escenarios analizados se resumen en la Tabla 62.

Tabla 62. Emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones evitadas en comparación con la gasolina en los distintos escenarios analizados.

	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
<b>Emisiones CO<sub>2</sub> (g/km)</b>						
E85	20	22	108	20	20	111
E5	181	181	185	181	183	188
E0	189	189	189	190	191	193
<b>Emisiones CO<sub>2</sub> evitadas (g/km)</b>						
E85	170	168	82	171	171	82
E5	8	8	4	9	8	5
<b>Emisiones gases efecto invernadero (g/km)</b>						
E85	61	57	165	62	62	162
E5	198	198	203	201	202	210
E0	206	206	206	209	209	214
<b>Emisiones de gases de efecto invernadero evitadas (g/km)</b>						
E85	144	149	41	147	147	52
E0	7	7	2	8	7	4

Como se puede ver en la Figura 43, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por el uso de E85 o E5 en vez de gasolina son sensibles al cambio de método de asignación en la etapa de transformación a etanol. El resto de los cambios efectuados no modifica sensiblemente la cifra de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas.

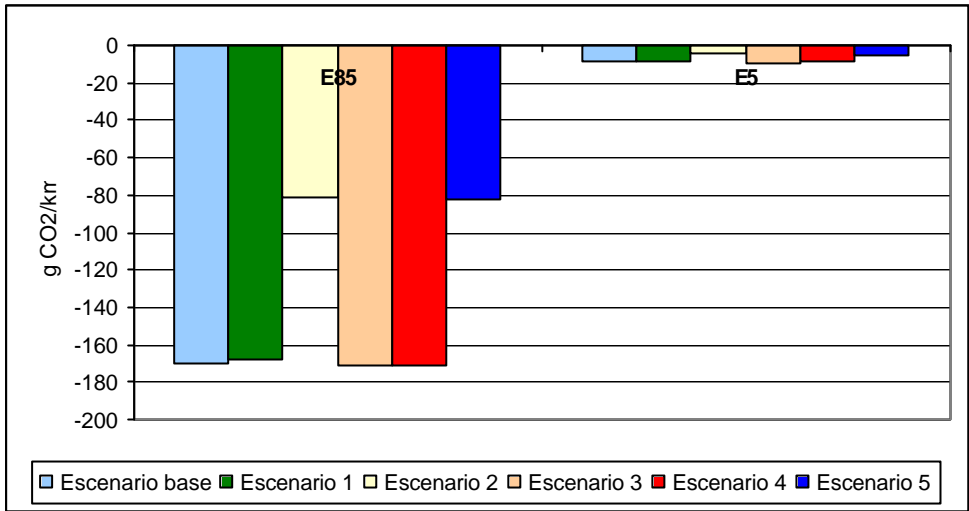


Figura 43. Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> en los distintos escenarios analizados

Si analizamos ahora las emisiones totales de gases de efecto invernadero, se observa el mismo efecto, aunque más acentuado.

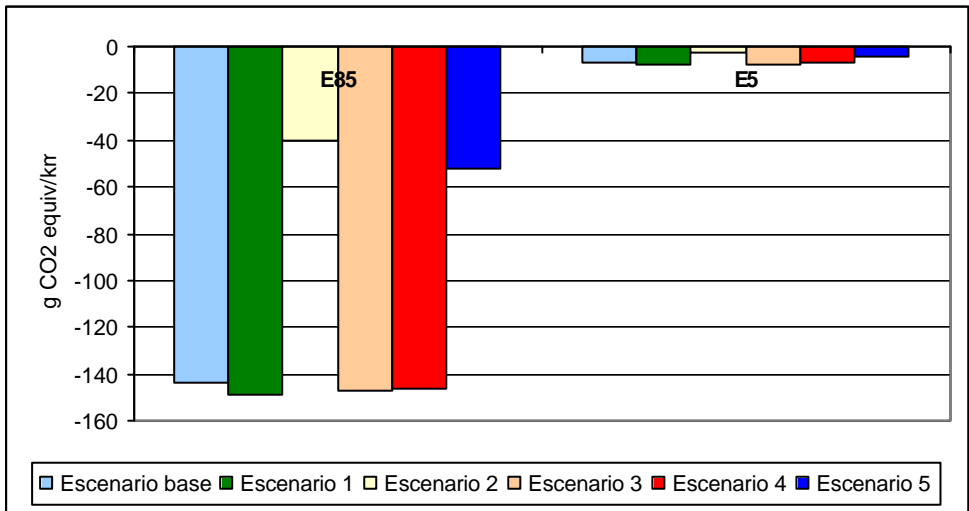


Figura 44. Emisiones evitadas de gases de efecto invernadero en los distintos escenarios analizados

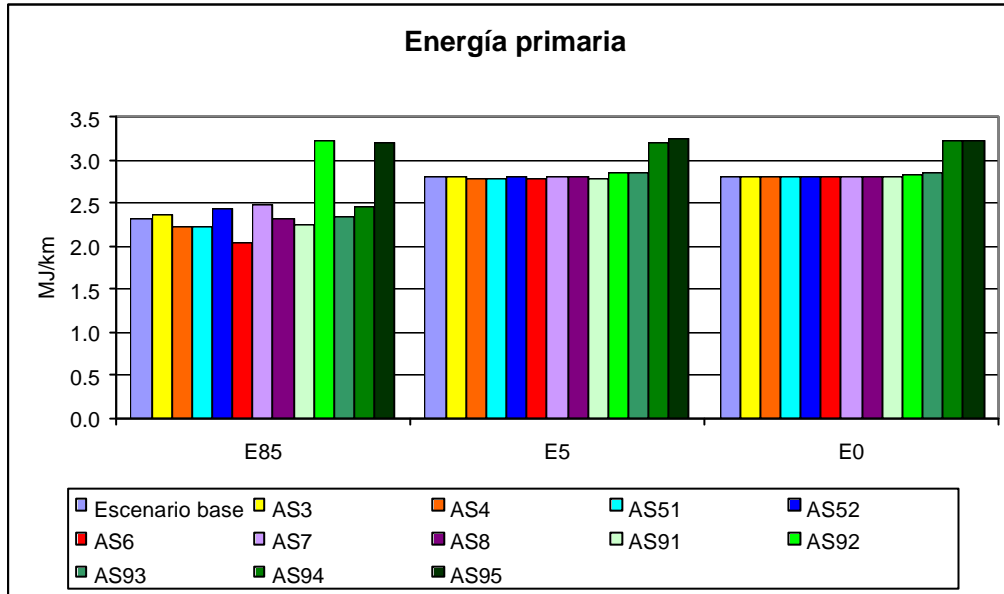
## 2.10 Resumen de resultados del análisis de sensibilidad

A continuación se resumen de forma conjunta los principales resultados de los análisis de sensibilidad realizados.

- AS1. Fijación de C en el suelo en forma de rizodepósitos.
- AS2. Emisiones de N<sub>2</sub>O de la agricultura.
- AS3. Origen del cereal.
- AS4. Distancia de transporte del grano.
- AS5. Producción relativa de las plantas de etanol.
- AS6. Consideración del CO<sub>2</sub> producido y vendido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso.
- AS7. Sustitución de la electricidad de cogeneración
- AS8. Consumo de combustible de la mezcla E5.
- AS9. Reglas de asignación entre los distintos co-productos.

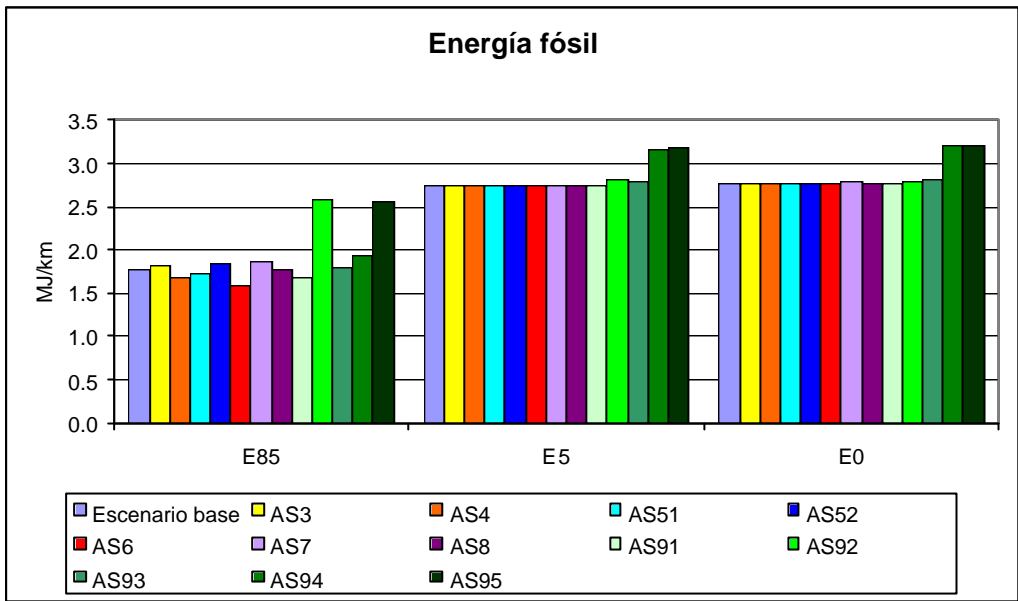
### 2.10.1 Uso de energía primaria y energía fósil y eficiencia energética y ratio de energía fósil.

En la Figura 45 y en la Figura 46 se puede observar la variación en el consumo de energía primaria y energía fósil en los distintos supuestos considerados en el análisis de sensibilidad realizado. Como puede observarse los análisis de sensibilidad realizados afectan sobre todo al sistema A2, producción y uso de la mezcla E85, y en menor medida a los otros dos sistemas. En general, para los tres sistemas, el parámetro que mas afecta a los resultados de consumo de energía primaria o fósil es el método de asignación.



**Figura 45. Consumos de energía primaria de los tres sistemas analizados en los distintos escenarios del análisis de sensibilidad propuestos.**

Así, para la mezcla E85, el hecho de usar como método de asignación el precio de los distintos co-productos en el proceso de transformación a etanol (análisis de sensibilidad AS92), produce un aumento muy significativo de los consumos energéticos (39% en energía primaria, 46% en energía fósil). En el caso de las mezclas E5 y E0, el utilizar el método de asignación por precio en la asignación de cargas del proceso de refinado de la gasolina (análisis de sensibilidad AS94) incrementa de forma significativa los consumos energéticos (alrededor de un 15%).



**Figura 46. Consumos de energía fósil de los tres sistemas analizados en los distintos escenarios del análisis de sensibilidad propuestos.**

Otro parámetro que afecta significativamente a los resultados es la consideración del CO<sub>2</sub> producido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto al que se le asignan parte de las cargas del proceso (análisis de sensibilidad AS6). Esto supone una disminución de los consumos energéticos de la mezcla E85 de un 12% en energía primaria y un 11% en energía fósil.

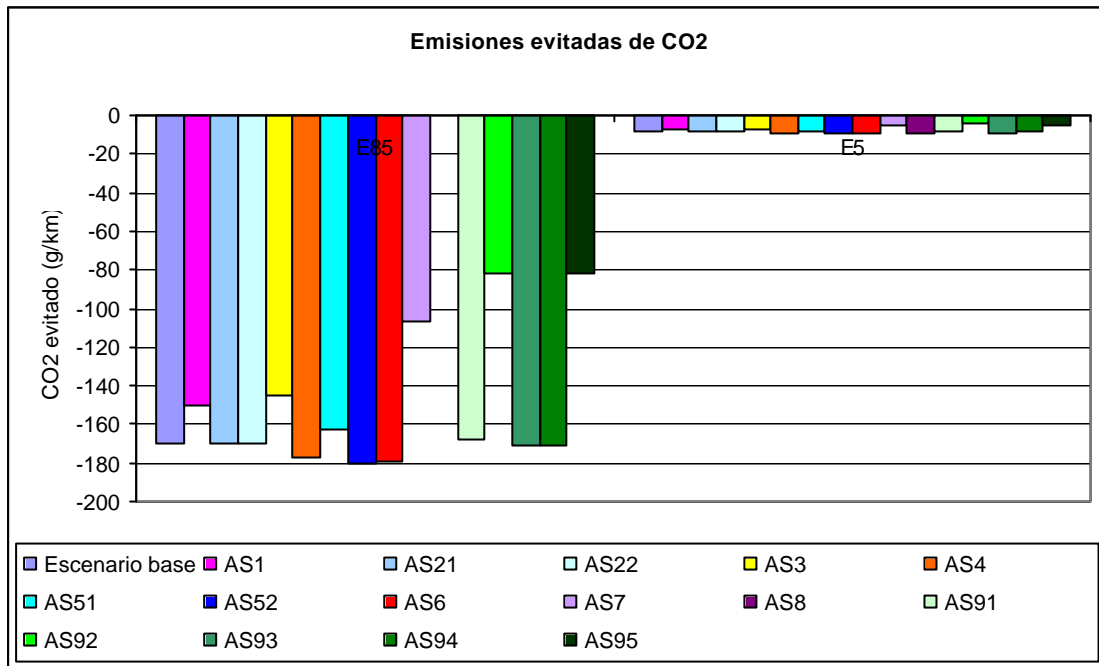
Finalmente para la mezcla E85 otro parámetro importante es la sustitución de la electricidad de la planta de cogeneración por electricidad del mix, en vez de por electricidad de plantas de carbón y fuel (análisis de sensibilidad AS7). Esto produce un aumento de un 7% de energía primaria un 5% de energía fósil.

El resto de los parámetros ensayados produce unos cambios inferiores al 5% en los consumos energéticos.

Estos efectos observados en los consumos energéticos se observan también de forma similar en las eficiencias energéticas.

### 2.10.2 Emissiones de gases de efecto invernadero

Respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero, la Figura 47 y la Figura 48 resumen los resultados obtenidos en los distintos estudios de sensibilidad realizados.



**Figura 47. Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por las mezclas E85 y E5 respecto a la gasolina en los distinto análisis de sensibilidad realizados**

Al igual que ocurría con los consumos energéticos, el método de asignación utilizado en la etapa de transformación a etanol (análisis de sensibilidad AS92) afecta de forma muy significativa a las emisiones de CO<sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero en general. Así en este escenario AS92 las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> son de un 52 y 49% menores en las mezclas E85 y E5 respectivamente. En cuanto a las emisiones evitadas de gases de efecto invernadero, para la mezcla E85 son un 72% menores y para la mezcla E5 un 66%.

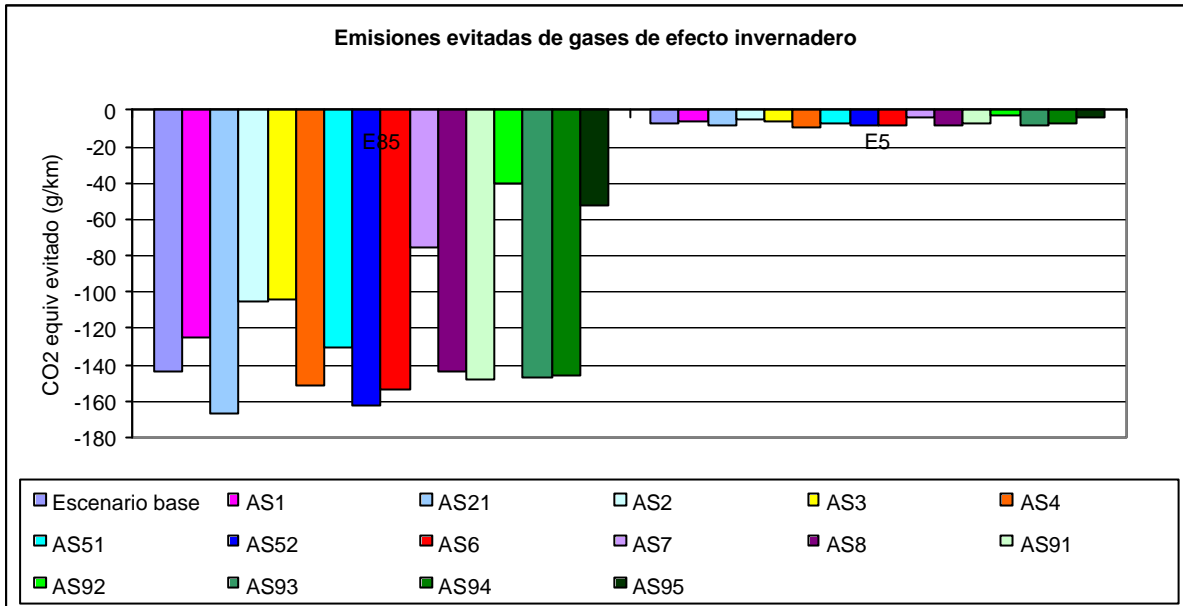
La consideración hecha en el análisis de sensibilidad AS7, de que la electricidad que se produce en la planta de cogeneración sustituye a electricidad proveniente del mix de generación español, produce también una disminución importante de las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (36-64%) en ambas mezclas.

El origen del cereal influye también de forma significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero, de forma que la consideración de un 50% de cereal importado (AS3) produce una disminución del CO<sub>2</sub> evitado de un 15 y un 9% para las dos mezclas, y de un 28 y 19% en el caso de los gases de efecto invernadero en general.

El análisis de sensibilidad AS1, que considera que no existe una fijación neta de CO<sub>2</sub> en el suelo en forma de rizodepositos, produce también un descenso del CO<sub>2</sub> evitado en un 11-12% en ambas mezclas.

Otros análisis de sensibilidad que producen un aumento de alrededor de un 12% en la cantidad de CO<sub>2</sub> evitado, y de un 15% a un 30% en gases de efecto invernadero, son los siguientes:

- AS4: menor distancia de transporte del grano
- AS52: producción de etanol sólo en la planta de Ecocarburantes
- AS6: Consideración del CO<sub>2</sub> de la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso
- AS8: Consideración del mismo consumo en el vehículo para las mezclas E5 y E0.

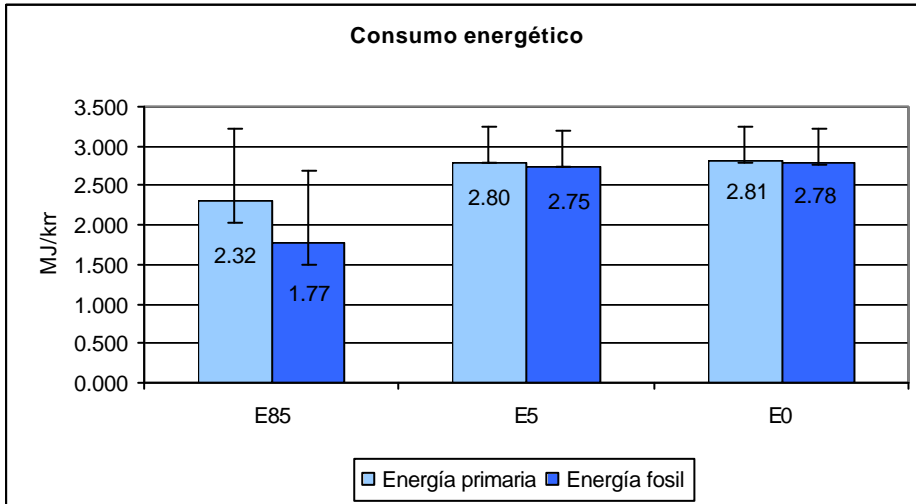


**Figura 48. Emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por las mezclas E85 y E5 respecto a la gasolina en los distinto análisis de sensibilidad realizados**

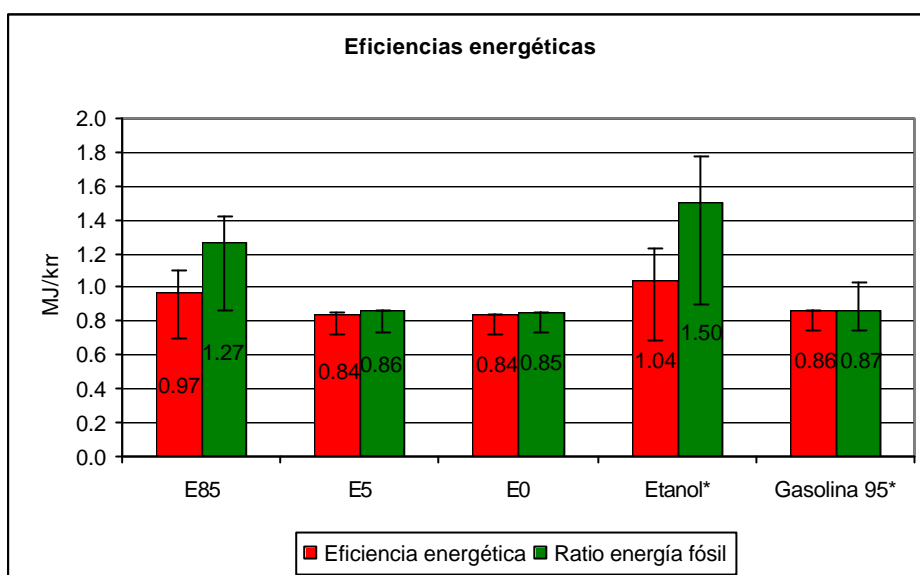
Respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, el análisis de sensibilidad realizado con las emisiones de N<sub>2</sub>O desde el suelo (AS2) produce cambios importantes ya que afecta de forma significativa a las emisiones de N<sub>2</sub>O del ciclo de vida.

**2.10.3 Rangos de variación de los resultados**

Los análisis de sensibilidad realizados permiten estimar un rango de posible variación de los resultados obtenidos, tanto de consumos energéticos como de emisiones. Estos rangos se presentan en las siguientes figuras y se resumen en la Tabla 63.



**Figura 49. Rangos de variación de los consumos energéticos de las mezclas estudiadas**



\* solo producción

Figura 50. Rangos de variación de las eficiencias energéticas de las mezclas estudiadas

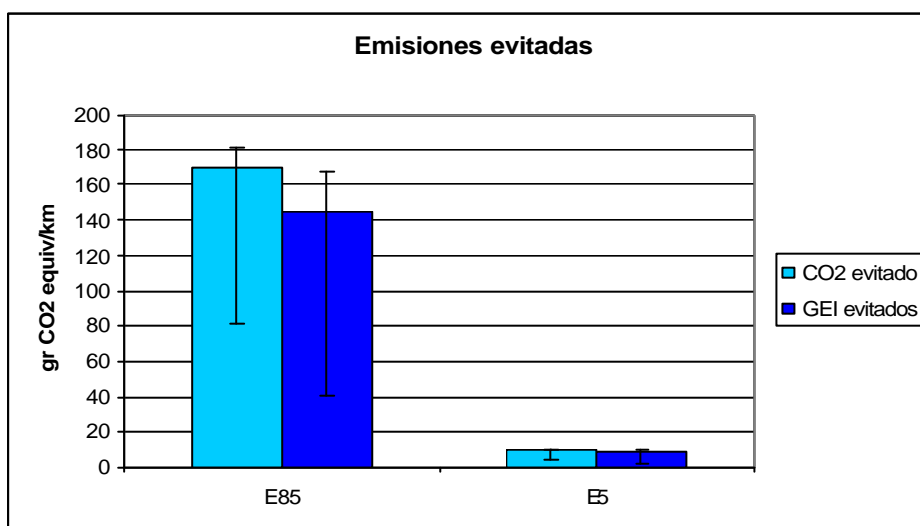


Figura 51. Rangos de variación de las emisiones evitadas de gases de efecto invernadero de las mezclas estudiadas

Tabla 63. Rangos de variación de los resultados

	Consumos energéticos		Eficiencias energéticas		Emisiones evitadas	
	Energía primaria (MJ/km)	Energía fósil (MJ/km)	Eficiencia energética del ciclo de vida	Ratio de energía fósil	Emisiones de CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> /km)	Emisiones de GEI (g CO <sub>2</sub> equiv/km)
E85	2,33 (2,04-3,23)	1,78 (1,58-2,59)	0,97 (0,67-1,1)	1,26 (0,87-1,42)	170 (82-180)	144 (41-167)
E5	2,79 (2,78-3,25)	2,75 (2,73-3,19)	0,84 (0,73-0,85)	0,86 (0,74-0,86)	8 (4-9)	7 (2-9)
E0	2,81 (2,80-3,24)	2,78 (2,77-3,21)	0,84 (0,73-0,84)	0,85 (0,73-0,85)		
Etanol*			1,03 (0,68-1,23)	1,49 (0,90-1,78)		
Gasolina 95*			0,86 (0,74-0,86)	0,87 (0,75-1,03)		

\* solo producción



## SECCION V. AREAS DE MEJORA

En el estudio de ACV realizado se han detectado algunas áreas de mejora de los sistemas estudiados que se describen a continuación.

### 1 CONSUMOS ENERGÉTICOS

En la producción y distribución de la mezcla E85, los mayores consumos energéticos se producen en la transformación a etanol, por lo que la optimización energética de este proceso permitiría mejorar el balance energético del etanol y de las mezclas que lo contienen. En este proceso, la principal entrada de energía es la del gas natural utilizado en la planta de cogeneración, seguido de la energía del propio grano de cereal. Una posible área de mejora, que habría que estudiar en detalle para evaluar su potencialidad para mejorar el balance energético general, sería :

**la utilización de biomasa residual de los cultivos que se usan para la producción de etanol, en nuestro caso la paja del cereal, como fuente de energía térmica para el proceso.**

La siguiente etapa más consumidora de energía es la producción agrícola. En la etapa agrícola del cultivo los mayores consumos energéticos provienen de la fabricación de fertilizantes que consumen el 72% de la energía primaria necesaria en el cultivo. Asimismo para mejorar la eficiencia energética de esta etapa sería importante reducir el número de labores del cultivo y aumentar el rendimiento en grano del mismo. Por ello, como áreas de mejoras importantes se proponen las siguientes:

- **Reducir al máximo los consumos de fertilizantes y las labores de los cultivos actuales sin comprometer sus rendimientos en grano por ha ,**  
y/o
- **Encontrar nuevos cultivos para obtener etanol con mayores rendimientos de biomasa por ha y de bajos requerimientos en fertilización y labores**

En la mezcla E5 y en la gasolina 95 el proceso que mas energía consume es el refinado del crudo. La optimización energética de este proceso permitiría asimismo mejorar el balance energético de la gasolina y de las mezclas que la contienen.

La etapa de uso tiene también un papel clave en la optimización energética de los tres sistemas debido al potencial de reducción del consumo de combustible en el vehículo, que hace que la energía necesaria para recorrer un km se reduzca. Por tanto un área de mejora general para los tres sistemas sería:

**Reducir el consumo de combustible del vehículo por km recorrido**

## 2 CAMBIO CLIMÁTICO

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, las mayores emisiones del sistema A1 (E85) se producen en la transformación a etanol debido a la combustión del gas natural de la planta de cogeneración. Las emisiones de CO<sub>2</sub> de la planta de etanol pueden reducirse sustancialmente si, en vez de gas natural, se usa biomasa residual ya que todo el CO<sub>2</sub> emitido habría sido fijado previamente en la etapa de crecimiento de la biomasa. Por tanto, como área de mejora importante se propone:

**la utilización de biomasa residual como fuente de energía térmica para el proceso podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de etanol y de las mezclas que lo contienen.**

La siguiente etapa emisora de gases de efecto invernadero en la producción de E85 es la etapa agrícola debido fundamentalmente a las emisiones de óxido nitroso originadas por el uso de fertilizantes nitrogenados, y en menor medida las emisiones procedentes de los tractores agrícolas y las derivadas del uso de energía para la fabricación de fertilizantes. Así, las áreas de mejora propuestas en el apartado anterior para esta etapa son también válidas aquí. Asimismo, la temporalización adecuada de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados con el objetivo de evitar que exista un exceso de nitrógeno en el suelo en los momentos en los que las condiciones son adecuadas para que se produzca el fenómeno de nitrificación, y la utilización de compuestos cuya nitrificación sea más difícil podría reducir de forma efectiva las emisiones de óxido nitroso en el suelo. Por tanto como áreas de mejora se propone:

- **Reducir al máximo los consumos de fertilizantes y las labores de los cultivos actuales sin comprometer sus rendimientos en grano por ha,**
- y/o
- **Encontrar nuevos cultivos para obtener etanol con mayores rendimientos de biomasa por ha y de bajos requerimientos en fertilización y labores**
  - **Elegir de forma adecuada el momento y el producto para realizar la fertilización nitrogenada en el cultivo.**

En los otros dos combustibles, las mayores emisiones de gases de efecto invernadero se producen en la etapa de uso del vehículo, por lo que

**la reducción del consumo de combustible en el vehículo permitiría reducir de forma importante las emisiones de gases de efecto invernadero.**

## SECCIÓN VI. CONCLUSIONES

Del estudio de ACV realizado se extraen importantes conclusiones:

### 1 BALANCES ENERGÉTICOS

- El balance energético de la producción de las mezclas estudiadas es tanto mejor cuanto mayor es el contenido de etanol en la mezcla

- La mezcla **E85** permite un ahorro de energía primaria de un **17%** comparado con la gasolina 95,
- La mezcla **E5** permite un ahorro de un **0,28%** de energía primaria comparado con la gasolina.
- La mezcla **E85** permite un ahorro de energía fósil de un **36%** comparado con la gasolina 95
- La mezcla **E5** permite un ahorro de un **1,12%** de energía fósil comparado con la gasolina.

### 2 CAMBIO CLIMÁTICO

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero son tanto menores cuanto mayor es el contenido de etanol en la mezcla

- La mezcla **E85** evita que se emitan **170 g CO<sub>2</sub> (90%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95
- La mezcla **E5** evita la emisión de **8 g CO<sub>2</sub> (4%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95.
- La mezcla **E85** evita que se emitan **144 g** de gases de efecto invernadero (expresados en **g CO<sub>2</sub> equivalentes**) que supone un ahorro de un **(70%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95;
- La mezcla **E5** evita la emisión de **7 g CO<sub>2</sub> equivalentes (3%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95.

### 3 ESCENARIO DE INTRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

- El escenario de introducción de biocombustibles analizado permitiría la reducción de un 5,63% de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto de las emisiones del año 1990 del que un 3,64% correspondería a la introducción a gran escala de vehículos E85 (introducción gradual desde el año 2005 hasta alcanzar 1.050.000 vehículos en el año 2010) , y un 2 % al uso de E5 por toda la flota de vehículos de gasolina.

- Asimismo este escenario permitiría una reducción de un 4,71% de emisiones de gases de efecto invernadero, un 3,03% proveniente de la introducción de E85 y un 1,68% proveniente de la introducción de E5.

## 4 CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD REALIZADOS

- La **no consideración de fijación neta de CO<sub>2</sub> en forma de rizodepósitos** produce una disminución de las emisiones evitadas de este compuesto por la sustitución de gasolina 95 por E85 y por E5. Sin embargo, aun en este escenario conservador, se produce un ahorro importante de emisiones de CO<sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero en general. Este ahorro de emisiones se cuantifica en

- La mezcla **E85** evita que se emitan **151 g CO<sub>2</sub> (79%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95
- La mezcla **E5** evita la emisión de **7 g CO<sub>2</sub> (4%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95.
- La mezcla **E85** evita que se emitan **125 g** de gases de efecto invernadero (expresados en **g CO<sub>2</sub> equivalentes**) que supone un ahorro de un **(61%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95;
- La mezcla **E5** evita la emisión de **6 g CO<sub>2</sub> equivalentes (3%)** por cada km recorrido en comparación con la gasolina 95.

- La consideración de otros factores de emisión de óxido nitroso desde el suelo agrícola produce efectos importantes sobre las emisiones evitadas de gases de efecto invernadero de la sustitución de gasolina por las mezclas E85 y E5, aunque en todos los escenarios analizados se produce un ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero
- Las emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas E85 y E5 empeoran sensiblemente cuando se considera el escenario de introducción de cereal importado.
- El balance energético de la producción de las mezclas E85 y E5 mejora cuando se considera el escenario de optimización de la localización de las plantas respecto de las zonas de producción de cereal. Asimismo, las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen sensiblemente.
- El balance energético de la producción de las mezclas E85 y E5 empeora cuando se considera el escenario de producción exclusiva de etanol a partir de la planta de Ecocarburantes y mejora en el escenario de producción exclusiva de etanol a partir de la planta de Bioetanol Galicia. Al revés ocurre con el balance de gases de efecto invernadero.
- La consideración del CO<sub>2</sub> producido en la planta de Ecocarburantes como un co-producto del proceso produce una mejora del balance energético de las mezclas con etanol así como una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

- La consideración de que la electricidad procedente de la co-generación en las plantas de transformación a etanol sustituye a electricidad procedente del mix de generación español, en vez de a electricidad producida en plantas de carbón o fuel produce un aumento considerable de los consumos energéticos de las mezclas con etanol así como de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La consideración de que el consumo de combustible del vehículo con la mezcla E5 es similar al consumo con la mezcla E0 produce una disminución apreciable de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La utilización del método de asignación por valor económico en vez del método de extensión de los límites del sistema en el proceso de transformación a etanol, produce aumentos muy significativos en el consumo de energía primaria y energía fósil y en las emisiones de gases de efecto de las mezclas con etanol.
- La utilización del método de asignación por valor económico en vez del método de asignación por contenido energético, en el proceso de refino produce aumentos significativos en los consumos energéticos de la gasolina y de la mezcla E5. Asimismo, produce aumentos significativos en las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 5 CONCLUSIONES SOBRE LAS AREAS DE MEJORA IDENTIFICADAS

- Como posibles mejoras de los procesos productivos de etanol que permitirían optimizar los balances energéticos y las emisiones de las mezclas que lo contienen se han identificado las siguientes:

- Reducir el consumo de fertilizantes
- Reducir las labores culturales
- Optimizar el uso de fertilizantes nitrogenados para minimizar las emisiones de óxido nitroso

- Sería ilustrativo estudiar el efecto en el uso de energía y emisiones de gases de efecto invernadero de la utilización de biomasa residual como fuente de energía en el proceso de transformación a etanol
- Se considera asimismo importante evaluar el efecto de usar otros cultivos alternativos para la obtención de etanol que tengan altos rendimientos de bioetanol por ha y bajos requerimientos de labores y fertilización



## SECCIÓN VII. REFERENCIAS

- “AFDC Advanced Vehicle Testing Activity Ford Taurus and Chevrolet Lumina.” (1999) National Renewable Energy Laboratory. Department of Energy, U.S.
- Ademe, Ecobilan PriceWaterhouseCoopers, Direm (2002). Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filères de production de biocarburants. Rapport technique.
- Agri y AgriFood Canada, 1999 citado en Shapouri, 2002.
- Alternative Fuel Data Centre [www.afdc.nrel.gov](http://www.afdc.nrel.gov)
- Arcoumanis, C. (2000) “A Technical Study on Fuels Technology related to the Auto-Oil II Programme. Final Report. Volume II: Alternative Fuels” European Commissions Directorate-General for Energy
- Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos: <http://www.aop.es/home.asp>
- Audsley, E. et al. (1997) Harmonization of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final Report. Concerted Action AIR3-CT94-2028.
- Battelle (1998) “Ohio’s First Ethanol-Fueled Light-Duty Fleet: Final Study Results” NREL/SR-540-25237 U.S. Department of Energy’s National Renewable Energy Laboratory and State of Ohio Department of Administrative Services
- Battelle y Bechtel (1999) “Fact Sheet: Ford Taurus Ethanol-Fueled Sedan” National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Laboratory
- Blonk et al, 1997 citado en SimaPro, Eco-indicator 99. <http://www.pre.nl/eco-indicator99/default.htm>
- Bouwman, A.F. 1994. “Method to estimate direct nitrous emissions from agricultural soils” Report 773004004. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, The Netherlands.
- Brandberg, A., Johansson, A. y Roth, A. (1992) “The Life of Fuels. Motor Fuels from Source to End Use” Ecotraffic AB
- BUWAL250 Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt Nr 250 Part 1 and 2. second edition.
- Chapman, P.F. and Roberts, F. (1983) “Metal resources and energy” Butterworths monographs in materials.
- Cowell, S. (1998) “Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: integration into decision-making”. PhD Thesis. CES University of Surrey.
- Cowell, S. and Clift, R. Introductory manual for life cycle assessment. Version 1. Centre for Environmental Strategy, University of Surrey.
- Dai, W., Cheemalamarri, S., Curtis, E. W., Boussarsar, R. y Morton, R. K. (2003) “Engine Cycle Simulation of Ethanol and Gasoline Blends” Society of Automotive Engineers
- DeLucchi, M.A. (1991) “Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity” Volumen 1. Argonne National Laboratory’s Center for Transportation Research, Energy Systems División.

- Delucchi, M.A. (1993). Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity”. Argonne National Laboratory.
- Delucchi, M.A. (2003) “A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle Emissions from Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials” Institute of Transportation Studies, University of California
- Department of Energy U.S. 1991, 1990 citados en Sheehan, J. et al. (1998)
- DGT. 2003. “Anuario estadístico general. 2003”. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior.
- ECOFYS/NOVEM; 2003. “Biofuels in the Dutch market: a fact finding study” Report 2 GAVE 03.12.
- Economopoulos, A.P.. 1993. “Assessment of Sources of Air, Water, and Land Pollution. A guide to rapid source inventory techniques and their use en formulating environmental control strategies. Part One: Rapid inventory techniques in environmental pollution”. World Health Organization.
- Edwards, R., Griesemann, J-C., Larivé, J-F. Y Mahieu, V. (2003) “Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context” CONCAWE, European Council for Automotive R&D y European Commission. Directorate-General Joint Research Center.
- EFMA, 2000a Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry Booklet No. 6 of 8: Production Of Ammonium Nitrate and Calcium Ammonium Nitrate
- EFMA, 2000b Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry Booklet No.8 of 8: Production Of NPK fertilizers by the Mixed Acid Route.
- EIA, [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov) , [www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/gas.html#ngc](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/gas.html#ngc).
- Elsayed, M. A., Matthews, R. y Mortimer, N. D. (2003) “Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuels Options” Project Nember B/B6/00784/REP URN 03/836. Resources Research Unit Sheffield Hallam University
- Energy Information Administration de Estados Unidos, EIA, 1995b citados en Sheehan, J. et al (1998)
- Environmental Protection Agency (2003) “Compilation of Air Pollutant Emisión Factors, AP-42” Volumen 1: Stationary Point and Area Sources, 5ª Edición.
- EPA (2000) Exposure and human health reassessment of 2,3,7,8,tetraclorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and related compunds. PartI. Volume 2. Sources of dioxin like compound in the United States.
- EPA, 1990 citados en Sheehan, J. et al (1998)
- EPA, 2003. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: *Stationary Point and Area Sources* EPA, 2003. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I: *Stationary Point and Area Sources*
- European Commission (2000). A technical study on Fuel Technology related to Auto Oil II Programme. Fianl report. Volume II: Alternative Fuels.
- Faiz, A. Weaver C. S. Y Walsh, M.P. (1996) “Air Pollution from Motor Vehicles”. The World Bank, Washington, D.C.

- Fernández, J., Curt, M.D., Agiado, P., and E. Magro. (2003) “Carbon allocation in a sweet sorghum –soil system using  $^{14}\text{C}$  as a tracer” J Plant Nutr. Soil. Sci. 166, 23-30.
- Friedrich and Bickel (2001). Environmental external costs of transport. Springer.
- Frischknecht, R. Bollens, U. Bosshart, S., Ciot, M., Ciseri, L. Doka, G., Dones, R., Gantner, U., Hischer, R. Martin, A. 1996. *Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.* Auflage No 3. Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch), Bundesamt für Energie (Htsg), Bern.
- Frischknecht, R. Braunschweig, A. Hofstetter, P. Suter, P. (1999) “Modelling human health effects of radioactive releases in Life Cycle Impact Assessment” Accepted for publication in Environmental Impact Assessment Review.
- General Motors Corporation, Argonne National Laboratory, BP, ExxonMobil, Shell (2001) Well to wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems-North American Analysis. Executive Summary report.
- Global Emisión Model for Integrated Systems (GEMIS) Versión 4.1 (2002) Öko-Institut, Institute for Applied Ecology e.V.: <http://www.oeko.de>
- Goedkoop M. and R. Spriensma. (2000). The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report.
- Goedkoop, M. (1995) The Eco-indicator 95. Project for NOH. Novem, Utrecht and RIVM, Bilthoven.
- Graboski, Michale S. (2002) “Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol” National Corn Growers Association
- Green, M.B. (1987) “Energy in Pesticide Manufacture, Distribution and Use” In: Z.R. Helsel (Ed) Energy in Plant Nutrition and Pest Control” Elsevier
- Guinée, J., Heijungs, L.van Oers, D. Van de Meent, T. Vermeire and M. Rikken.(1996) “LCA Impact Assessment of Toxic Releases” Study by the CML, Leiden and RIVM, Bilthoven. Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, The Hague.
- Habersatter K. y Widmer, P. (1991) Okobilanz von Packstoffen, Stand 1991 Schriftenreihe des BUWAL 132.
- Halberg, N y P. Nielsen (2003) LCAFOOD. [www.lcafood.dk](http://www.lcafood.dk)
- Hansen, E. 2000. “Substance flow analysis for dioxins in Denmark” [www.mst.dk](http://www.mst.dk)
- Heijungs, R. J.B. Guinée and G. Huppes. (1997) Impact categories for Natural resources and land use. CML report 138. CML Leiden University, Leiden.
- Heijungs, R. J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. Van Duin and H.P. de Goede. (1992 a) . “Environmental Life Cycle Assessment of products” CML Leiden
- Heijungs, R. J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. Van Duin and H.P. de Goede. (1992 b) . “Environmental Life Cycle Assessment of products. Backgrounds” CML Leiden
- Hickman, A.J. (1999) “Methodology for Calculation Transport Emissions and Energy Consumption” Project Report SE/491/98. Transport Research Laboratory
- Ho, 1989 citado en Shapouri et al. (2002)

- Hofstetter, P. (1998) “Prespectives in Life Cycle Impact Assessment; A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere” Klowers Academis Publishers, 1998. Info: [www.wkap.nl/book.htm/07923-8377-X](http://www.wkap.nl/book.htm/07923-8377-X)
- Houghtoin, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds) (1996) “Climate change 1995. The Science of Climate Change” Contribution of Working Group I to teh second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University press, Cambridge.
- IDAE, 2002. “Prospectiva energética y CO<sub>2</sub>. Escenarios 2010”
- IDIADA Automotive Technology (2003) “Technical Report: Comparison of fuel tank evaporative emissions from E0 and E5 petrol” REPSOL YPF, Abengoa Bioenergía, CEPSA, Ebro Puleva
- IDIADA Automotive Technology (2003) “Technical Report: Comparison of vehicle emissions at European Union annual average temperatures from E0 and E5 petrol” REPSOL YPF, Abengoa Bioenergía, CEPSA, Ebro Puleva
- Instituto Nacional de Estadística, [www.ine.es](http://www.ine.es)
- IEA, 2004. “Biofuels for transport. An international Perspective”
- IPCC, 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual (Volume 3) Agriculture.
- Jolliet O and Crettaz. (1996) Critical surface time 95, a Life Cycle Impact Assessment methodology, including exposure and fate. Presented at the workshop of the EU concerted action on Harmonization of Life Cycle assessment in agrioculture. Lyngby, DK, 15-19 January 1996.
- Jolliet, O. (1996) “Toxic impacts” In Udo de Haes(ed) “Towards a methodology for Life Cycle Impact assessment” Report of the SETAC-Europe Workgroup on Life Cycle Impact Assessment. Final Draft.
- Kaiser, E.A.; Khors, K.;Kücke, M.; Schnug, O.; Heinemeyer, O.; y Munch, J.C. (1998) “Nitrous oxide release from arable soil: importance of N\_fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biol. Biochem* Vol 30 No 12. pp 1553-1563
- Keney y DeLuca, 1992 citado en Shapouri et al. (2002)
- Kenneth J. Kelly, Bailey, B. K. Y Coburn, T. C. (1996) “Federal Test Procedure Emissions Test Results from Ethanol Variable-Fuel Vehicle Chevrolet Lumina” U.S. Department of Eneregy.
- Köllner, T. (1999) “Species-pool Effect Potentials (SPEP) as a yardstick to evaluate land-use impacts on biodiversity” Sybmitted to accepted by the Journal of Cleaner Production.
- Kuzyakov, Y. y Domanski, G. (2000) “Carbon input by plants into the soil. Reviw” Institute of Soil Science and Land Evaluation, University of Hohenheim, Alemania. Institute of Agrophysics Lublin, Polonia.
- Lechón, Y. (1996) “Persistencia y Predicción del Comportamiento en el Suelo de Herbicidas de Cultivos Herbáceos”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Lewis, C.A. (1997). Fuel and Energy Production Emission Factors. MEET project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions for Transport. Task 3.4. Deleverable 20.

- Lindfords, L-G., K. Christiansen, L. Hoffman, Y. Virtanen, V. Jutilla, O-J Hanssen, A. Ronning, T. Ekvall and G. Finnseven. (1995) "Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment" Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Lipman, Timothy E. y Delucchi, M.A. (1997) "Emissions of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases from the Production and Use of Transportation Fuels and Electricity" Institute of Transportation Studies, University of California
- Lipman, Timothy E. y Delucchi, M.A. (2002) "Emissions of Nitrous Oxide and Methane from Conventional and Alternative Fuel Motor Vehicles" Climatic Change
- Lonja de Toledo [www.agrodigital.com](http://www.agrodigital.com)
- Lorenz, D. y Morris, D. (1995) "How Much Energy Does It Take to Make a Gallon of Ethanol"
- LowCVP Working Group. (2004). "Well-to-wheel Evaluation for production of ethanol from wheat" FWG-P-04-024.
- Luna, M. (2003) "Utilización del bioetanol en los motores". Curso sobre Combustibles alternativos para el transporte: Biocombustibles y Pilas de Combustible. CIEMAT, Madrid.
- Lyons, D. (2002) "Western european cross-country oil pipelines 30-year performance statistics". Report No. 1/2. CONCAWE
- Margni, M., Jolliet, O., Rossier D. and Crettaz, P., (2002). *Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems*. Agriculture, Ecosystems and Environment, AGEE 93/1-3.
- Marland y Turhollow, 1990 citado en Shapouri, H. et al, (2002)
- Meent D. and Klepper, O. (1997). "Mapping the Potential affected Fraction (PAF) of Species as an Indicator of Generic Toxic Stress." RIVM report 607504001, June 1997.
- MP: Gover, SA Collings, GT Hitchcock, DP Moon and GT Wilkins, ETSU (1996) "Alternative Road Transport Fuels- A Preliminary Life-cycle Study for the UK". Volumen 2. Department of Trade and Industry, Department of Transport.
- Müller- Wenk, 1998. "Depletion of abiotic resources weighted on the base of virtual impactsof lower grade deposits in future" IWÖ Diskussionsbeitrag Nr 57, Universität St Gallen. ISBN 3-906501-57-0.
- Murray, C.; López, A. (1996) "The global burden of disease" WHO, World Bank and Harvard School of Public Health. Boston.
- Obrador, A.F. (1993) "Persistencia de la Atrazina en el Suelo y Fitotoxicidad de sus Residuos" Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular Genética, Microbiología y Fitopatología. Universidad Politécnica de Madrid
- Organization of the Petroleum Exporting Countries: <http://www.opec.org>
- Pimentel, 1991 y 2001 citado en Shapouri, H. et al (2002)
- Pitstick, M. (1995) "Emissions from Etanol- and LPG-Fueled Vehicle" Center for Transportation Research. Argonne National Laboratory
- Red Eléctrica (2002) "El Sistema Eléctrico Español. Informe 2002"
- Reinhardt, G. Quirin, M., Gärtner, S.O., and Pehnt, M. (2004) "Comparison of well to wheel analyses of biofuels for transportation" IFEU. 2<sup>nd</sup> World Conference and Technology Exhibition for Energy, Industry, and Climate Protection". 10-14 May 2004, Rome.

- Shapouri, H., Duffield, J.A. y Graboski, M.S. (1995) “Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol”. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, AER.721
- Shapouri, H., James, A. Duffield Wang, M. (2002) “The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update” United States Department of Agriculture.
- Sheehan J. , Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., y Shapouri, H. (1998). Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus.
- Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M y Nelson, R. (2004) “ Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol” National Bioenergy Center, National Renewable Energy Laboratory. Journal of Industrial Ecology
- Skiba, U., I.P. Mac Taggart. K.A. Smith, K.J. Hargreaves and D. Fowler. (1996) “Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the UK”. Energy Convers. Mgmt Vol 37, nos 6-8 pps 1303-1308-
- Steen B. and S-O. Ryding (1992) The EPS Enviro-Accounting method. IVL. Goteborg.
- Swedish Ministry of Industry, Employment and Communications. “Report pursuant to Directive 2003/30/EC of 8 May 2003 on the promotion and the use of biofuels or other renewable fuels”.
- Unnasch, S., Browning, L. Y Montano, M. (1996) “Evaluation of Fuel-Cycle Emissions on a Reactivity Basis”. Acurex Environmental Project No. 8522. California Air Resources Board. Acurex Environmental Corporation.
- Vallejo, A. 2003. Comunicación personal.
- VIEWLS: Clear Views on Clean Fuels. European Commission DG-TREN Project-ID: NNE-5-2002-00619. <http://www.viewls.org>
- Wang, M., et al. (2002) citados en Andress, D. (2002) “Ethanol Energy Balances” UT-Battelle LLC y Office of Biomass Programs Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy
- Wang, M.Q. GREET 1.5. Transportation Fuel Cycle Model. Volume 1: Methodology, Development, Use and Results.
- Wauchoupe, 1978 citado en Sheehan, J. et al (1998)
- Weidema, B.P.; Pedersen, R.L.; Drivsholm, T.S. (1995). “Life cycle screening of food products-two examples and some methodological proposals” Danish Academy of Technical Sciences- ATV, Lyngby.
- Wiertz J, van Dijk&J.B. Latour (1992) “MOVE: vegetatie-module; de kans op voorkomen van 700 plantensoorten als functie van vocht, pH, nutriënten en zout.” RIVM rapport nr 711901006. Bilthoven.
- Winebrake, J., He D. y Wang, M. (2000) “Fuel-Cycle Emissions for Conventional and Alternative Fuel Vehicles: An Assesment of Air Toxics” Center for Transportation Research, Energy Systems División, Argonne National Laboratory.
- [www.distances.com](http://www.distances.com)