

Proyecto de investigación - 2016

# EL NEXO

## Agua-Tierra-Energía en España



FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II





# EL NEXO

## Agua-Tierra-Energía en España

### EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Bárbara A. Willaarts  
Alberto Garrido Colmenero  
*Fundación Premio Arce-Universidad Politécnica de Madrid*

Cristina de la Rúa  
Helena Cabal  
Yolanda Lechón  
*Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas*

### AYUDANTES DE INVESTIGACIÓN

Jorge Ruiz Fernández  
Matthew Witkin  
*Universidad Politécnica de Madrid*

2016



FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II





Esta versión forma parte de la Biblioteca Virtual de la **Comunidad de Madrid** y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma.



[www.madrid.org/publicamadrid](http://www.madrid.org/publicamadrid)

Las afirmaciones recogidas en esta publicación reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de la Fundación Canal.

© De la edición, Fundación Canal. Mayo 2016

© De los textos, los autores

© De las fotografías, sus autores

DISEÑO Y MAQUETACIÓN: Candara

DEPÓSITO LEGAL: M-16331-2016

ISBN: 978-84-945176-1-7

Citar como:

Willaarts, B.A; De la Rúa, C; Cabal, H; Garrido, A; Lechon, Y (2016).  
El Nexo Agua-Tierra-Energía en España. Fundación Canal Isabel II.

## ■ Prólogo ■

El crecimiento poblacional y económico junto con la globalización de los mercados han generado un aumento de la demanda mundial de agua, energía y acceso al territorio a lo largo de las últimas décadas. A medida que aumenta la demanda de cada uno de estos recursos, se multiplican las interconexiones con el resto. Satisfacer la demanda de agua requiere cada vez más energía y viceversa. Por otro lado, el aumento de la demanda de alimentos y energía también tiene importantes implicaciones territoriales. La acentuación de las interconexiones entre agua-territorio-energía obliga a adoptar nuevos enfoques más integrados. La experiencia nos demuestra que la adopción de políticas sectoriales puede tener impactos indeseados en el resto de recursos.

En este contexto, en el año 2011 en el transcurso de una reunión preparatoria para la conferencia de RIO+20 surge el concepto de “nexo” y la necesidad de desarrollar enfoques de investigación y desarrollo de políticas que tengan en cuenta las múltiples sinergias que existen entre recursos y sectores. De ahí que el nexo agua-territorio-energía haya cobrado gran relevancia en múltiples foros y organizaciones.

El proyecto que se presenta en las siguientes páginas surge con el objetivo de ahondar y reflexionar sobre la relevancia de este concepto o enfoque de nexo en el contexto de España. Tal y como se describe en el documento, la relaciones de interdependencia y por tanto el nexo

entre el agua, la energía y el territorio están muy influenciadas por las condiciones físicas, económicas e institucionales. En España la persistente asimetría entre la oferta y la demanda de agua convierten la gestión de este recurso en un verdadero desafío. La elevada competencia por el agua aumenta los conflictos territoriales y obliga a la búsqueda de soluciones que mejoren la eficiencia en su uso, y que en muchas ocasiones llevan asociadas un elevado coste energético. Por este motivo el nexo entre agua y energía y agua y territorio tiene un significado relevante en el marco español.

Las relaciones entre energía y territorio están mucho menos documentadas, probablemente porque hasta la fecha no ha existido una competencia o conflicto excesivo por estos recursos en el ámbito nacional. Sin embargo, en los próximos años España está obligada a cumplir con una serie de objetivos energéticos y climáticos, que seguramente incluirán importantes cambios en el mix energético, e indirectamente en la demanda de agua y tierra. España es además un país energéticamente dependiente del exterior, circunstancia que lleva asociado un riesgo elevado para la seguridad energética nacional. El potencial del territorio para la producción de energía renovable, según constatan los estudios publicados, es muy elevado y en su explotación racional deberá sustentarse la política energética futura.

Con el objetivo de ilustrar algunos de los nexos con mayor relevancia para nuestro país, el proyecto ha incluido el análisis de dos casos de estudio. El primer caso, de naturaleza prospectiva, se centra en los impactos ambientales (incluyendo agua, territorio pero también otros elementos) ligados a distintos escenarios de producción energética en España en el horizonte de 2030. El segundo caso de estudio se ha centrado en evaluar la evolución en la eficiencia en el uso de agua, tierra y energía de la producción agrícola en España entre 2000 y 2011 y las implicaciones ambientales y socioeconómicas asociadas.

El desarrollo de este ambicioso proyecto de investigación ha contado con la participación y colaboración desinteresada de numerosos expertos. Por ello debemos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Teodoro Estrela (Confederación hidrográfica del Júcar), Laurent Hardy (Repsol), Francisco José Domínguez (IDAE), Enrique Cabrera (Universidad Politécnica de Valencia),

Fidel González (Universidad Complutense), Jose María Marcos (UNESA), Pedro Linares (Instituto de Investigación Tecnológica), Joan Corominas (Junta de Andalucía), Elías Fereres (Universidad de Córdoba), Xavier García Casals (Consultor), Antonio Soria (JRC-IPTS), Carlos Alberto Fernández López ( IDAE), Carles Gasol (Universidad Autónoma de Barcelona), Jesús Fernández (Universidad Politécnica de Madrid) y Rubén Moratiel (Universidad Politécnica de Madrid).

También nos gustaría agradecer a la dirección del Centro de Estudios e Investigaciones de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM) de la Universidad Politécnica de Madrid, y en concreto a Inés Mínguez, Esperanza Luque y Katerina Kucerova la ayuda y el apoyo prestados para la consecución de este proyecto. Gonzalo Marín, responsable del estudio por parte de la Fundación Canal de Isabel II, ha aportado sus comentarios y un valioso apoyo en todo momento, respetando siempre el criterio y parecer de los autores del estudio. Por último también nos gustaría agradecer a Jorge Fernández y Matthew Witkin, ambos de la Universidad Politécnica de Madrid, por su espléndida labor y dedicación al proyecto.

Madrid, abril de 2016

Los autores

# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1 Descripción general del problema de estudio	15
1.2 Metodología de trabajo y objetivos del estudio	18
1.3 Relevancia del nexo AET en España	19
1.3.1 Condiciones de contorno y datos básicos	19
1.3.2 Las relaciones agua-energía-tierra	23
1.3.3 Conclusiones	43
<b>2. Caso de Estudio I: Implicaciones ambientales ligadas a distintos escenarios de producción energética</b>	<b>45</b>
2.1 Introducción y objetivos	45
2.2 Datos, enfoque metodológico y limitaciones del estudio	47
2.2.1. Escenario tendencial o BAU	48
2.2.2. Escenario de objetivos a 2030 o TARGET203	49
2.3 Impactos asociados a los escenarios energéticos	50
2.3.1 Resultados del análisis de Ciclo de Vida de las tecnologías energéticas	54
2.3.1.1 Impactos sobre el cambio climático	54
2.3.1.2 Impactos sobre la acidificación	55
2.3.1.3 Impactos sobre la eutrofización terrestre	58
2.3.1.4 Impactos sobre la eutrofización de las masas de agua dulce	59
2.3.1.5 Impactos sobre la ecotoxicidad en las masas de agua dulce	60
2.3.1.6 Impactos sobre el uso del suelo	61
2.3.1.7 Impactos sobre el consumo de agua	62
2.3.1.8 Impactos sobre el consumo de recursos naturales	64
2.3.2 Resultados del análisis del ciclo de vida de los escenarios energéticos	65
2.3.2.1 Impactos sobre el cambio climático	65
2.3.2.2 Impactos sobre la acidificación	68
2.3.2.3 Impactos sobre la eutrofización terrestre	70
2.3.2.4 Impactos sobre la eutrofización de las masas de agua dulce	72
2.3.2.5 Impactos sobre ecotoxicidad en el agua dulce	74
2.3.2.6 Impactos sobre el uso del suelo	76
2.3.2.7 Impactos sobre el consumo de agua	78
2.3.2.8 Impactos sobre el uso de recursos	80
2.4 Conclusiones	82

<b>3. Caso de Estudio II: Balance sobre las mejoras en la eficiencia de la producción agrícola en España</b>	<b>85</b>
3.1 Análisis de la huella hídrica, territorial y energética de la agricultura	87
3.1.1 Introducción y objetivos	87
3.1.2 Datos, enfoque metodológico y limitaciones del estudio	88
3.1.3 Resultados	96
3.1.4 Conclusiones	121
3.2 Balance de emisiones y consumos de energía fósil de la producción agrícola en España	123
3.2.1 Introducción y objetivos	123
3.2.2 Datos, enfoque metodológico y limitaciones del estudio	123
3.2.3 Resultados	136
3.2.4 Conclusiones	155
<b>4. Conclusiones generales</b>	<b>157</b>
<b>5. Recomendaciones para estudios futuros</b>	<b>161</b>
<b>6. Referencias</b>	<b>165</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>179</b>
Anexo I. Relación de expertos en el nexa AET entrevistados	179
Anexo II. Conclusiones del seminario sobre el nexa AET en España	180
Anexo III. Descripción sobre la metodología del Análisis del Ciclo de Vida	187
Anexo IV. Relación de estaciones meteorológicas	194
Anexo V. Listado de cultivos incluidos en el estudio	196
Anexo VI. Ratio anual de uso de aguas de origen superficial y subterráneo	198
Anexo VII. Evolución de los niveles piezométricos a nivel provincial y periodo 2000-2011	200
Anexo VIII. Necesidades de fertilización de los distintos cultivos	204
Anexo IX. Consumos de combustible horarios de algunas labores agrícolas en los cultivos de leguminosas de grano y patata	206

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relaciones entre agua-energía y tierra (AET) en España y condiciones de contorno	24
Figura 2. Consumo de agua por etapas del ciclo de vida de la generación de electricidad a partir de distintas fuentes de energía	27
Figura 3. Potenciales técnicos de las distintas energías renovables	42
Figura 4. Objetivos europeos de cambio climático y energía para 2030	46
Figura 5. Evolución de la producción de electricidad en España en el escenario BAU	48
Figura 6. Evolución de la producción de electricidad en España en el escenario TARGET2030	49
Figura 7. Impacto sobre el cambio climático de cada una de las tecnologías eléctricas	55
Figura 8. Impacto sobre acidificación de cada una de las tecnologías eléctricas	56
Figura 9. Impacto sobre eutrofización terrestre de cada una de las tecnologías eléctricas	58
Figura 10. Impacto sobre eutrofización del agua dulce de cada una de las tecnologías eléctricas	59
Figura 11. Impacto sobre ecotoxicidad del agua dulce de cada una de las tecnologías eléctricas	60
Figura 12. Impacto sobre uso del suelo de cada una de las tecnologías eléctricas ( expresado en Kg C liberados)	62
Figura 13. Impacto sobre consumo de agua de cada una de las tecnologías eléctricas	63
Figura 14. Impacto sobre uso de recursos de cada una de las tecnologías eléctricas	64
Figura 15. Impactos sobre cambio climático de los escenarios analizados	66
Figura 16. Impactos sobre acidificación de los escenarios analizados	69
Figura 17. Impactos sobre eutrofización terrestre de los escenarios analizados	71
Figura 18. Impactos sobre eutrofización de agua dulce de los escenarios analizados	73
Figura 19. Impactos sobre ecotoxicidad de agua dulce de los escenarios analizados	75
Figura 20. Impactos sobre uso del suelo de los escenarios analizados	77
Figura 21. Impactos sobre consumo de agua de los escenarios analizados	79
Figura 22. Impactos sobre consumo de recursos de los escenarios analizados	81
Figura 23. Evolución de la superficie de usos del territorio en España, periodo 2000-2011	96
Figura 24. Evolución de la huella territorial de las superficies agrícolas en producción en España entre 1990 y 2011	97

Figura 25. Superficie y evolución de los principales grupos de cultivos en España	98
Figura 26. Distribución de las superficies de secano y regadío en producción (hectáreas), año 2011	99
Figura 27. Huella territorial de los principales cultivos en España, periodo 2000-2011	100
Figura 28. Huella hídrica de la agricultura de secano y regadío en España periodo 2000-2011	103
Figura 29. Huella hídrica del secano en producción por grupos de cultivos, periodo 2000-2011	104
Figura 30. Huella hídrica de los cultivos de secano en producción (en hectómetros cúbicos) por provincias, periodo 2000-2011	105
Figura 31. Evolución de la huella hídrica (m <sup>3</sup> /t) de los grupos de cultivos en secano, periodo 2000-2011	106
Figura 32. Evolución de la huella hídrica azul en el regadío de España, periodo 2000-2011	107
Figura 33. Huella hídrica de aguas superficiales y subterráneas en España en 2000 y 2011	108
Figura 34. Evolución de la huella hídrica azul superficial y subterránea por tipos de cultivos, periodo 2000-2011	109
Figura 35. Composición de la huella hídrica azul de los regadíos al aire libre en España y productividad económica del agua de riego (euros/m <sup>3</sup> ), año 2011	110
Figura 36. Productividad (m <sup>3</sup> /ton) de los cultivos de regadío al aire libre en España, periodo 2000-2010	111
Figura 37. Evolución del consumo de energía del riego en España, periodo 2000-2011	112
Figura 38. Evolución del consumo de energía eléctrica (GWh) asociada al bombeo y riego en parcela con aguas superficiales y subterráneas en las distintas provincias de España, años 2000, 2005, 2010	115
Figura 39. Transformación de los sistemas de riego en España entre 2000 y 2011 y evolución del consumo eléctrico (kWh/m <sup>3</sup> ) asociado al riego en parcela	116
Figura 40. Evolución del consumo de energía asociado al riego para los grandes cultivos en España, periodo 2000-2011	118
Figura 41. Evolución del gasto energético (kWh/m <sup>3</sup> ) de los principales grupos de cultivos en España, periodo 2000-2011	119
Figura 42. Evolución relativa de los consumos energéticos (kWh/t) para grandes grupos de cultivos en España, periodo 2000-2011	120
Figura 43. Evolución del consumo de agua (hm <sup>3</sup> ) y energía (GWh) en los regadíos al aire libre en España	121

Figura 44: Límites del sistema	124
Figura 45. Consumos de fertilizantes en el sector agrícola español en miles de t	127
Figura 46. Evolución temporal de la participación en el consumo de fertilizantes de cada tipo de producto	128
Figura 47. Evolución temporal de los factores de impacto. Impacto en 2000=1	130
Figura 48. Mix de tecnologías de la generación de electricidad de los años 2000 a 2011	134
Figura 49. Evolución temporal de los factores de impacto de la producción de electricidad por el sistema de generación español. Impacto en 2000=1	135
Figura 50. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero totales de los cultivos analizados expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	137
Figura 51. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero totales distinguiendo entre los distintos componentes expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	138
Figura 52. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	139
Figura 53. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales en secano y regadío expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	140
Figura 54. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales por tipo de impacto para el año 2011 expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	140
Figura 55. Emisiones de gases de efecto invernadero por ha expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv/ha	142
Figura 56. Emisiones de gases de efecto invernadero totales del secano y el regadío expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	143
Figura 57. Emisiones de gases de efecto invernadero por kg expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv/kg	144
Figura 58. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al uso de electricidad para riego en los diferentes cultivos expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv/ha	145
Figura 59. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas uso de electricidad para riego en los diferentes cultivos expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv/m <sup>3</sup>	146
Figura 60. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al regadío en los diferentes cultivos expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv/kg	147
Figura 61. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al regadío en los diferentes cultivos expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	148

Figura 62. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de electricidad para riego con aguas subterráneas y superficiales expresadas en kg CO <sub>2</sub> equiv	149
Figura 63. Evolución del consumo de energía fósil total de los cultivos analizados expresados en MJ	150
Figura 64. Evolución del consumo de energía fósil total expresado en MJ y separando los distintos orígenes	151
Figura 65. Evolución del consumo de energía fósil total expresado en MJ y separando los distintos orígenes	152
Figura 66. Evolución del consumo de energía fósil por ha expresado en MJ/ha de los distintos grupos de cultivo	153
Figura 67. Evolución del consumo de energía fósil por kg expresado en MJ/kg de los distintos grupos de cultivo	154
Figura 68. Diagrama simplificado de las etapas del análisis del ciclo de vida (ACV)	187
Figura 69. Etapas del ACV	188
Figura 70. Esquema del proceso de clasificación y caracterización en un ACV	191



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Gasto de energía asociado al uso del agua en España	31
Tabla 2. Disponibilidad de recursos hídricos propios y demandas brutas por sectores de actividad (hm <sup>3</sup> )	36
Tabla 3. Procesos considerados de la base de datos ecoinvent 3.1 para cada tecnología energética	52
Tabla 4. Categorías de impacto consideradas	53
Tabla 5. Emisiones de gases de efecto invernadero por kWh generado en los escenarios analizados	68
Tabla 6. Impactos sobre acidificación por kWh generado en los escenarios analizados	70
Tabla 7. Impactos sobre eutrofización terrestre por kWh generado en los escenarios analizados	72
Tabla 8. Impactos sobre eutrofización de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados	74
Tabla 9. Impactos sobre ecotoxicidad de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados	76
Tabla 10. Impactos sobre uso del suelo por kWh generado en los escenarios analizados	78
Tabla 11. Impactos sobre consumo de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados	80
Tabla 12. Impactos sobre consumo de recursos por kWh generado en los escenarios analizados	82
Tabla 13. Energía empleada por unidad de agua ( $\omega$ , kWh/m <sup>3</sup> ) para los distintos sistemas de riego en parcela y fuentes de agua	94
Tabla 14. Incrementos anuales de los rendimientos del maíz, arroz y trigo (Expresados en % (1961-2010))	102
Tabla 15. Evolución de coste unitario (KWh/m <sup>3</sup> ) de captación y bombeo de aguas superficiales y subterráneas entre 2000 y 2011	117
Tabla 16. Categorías de impacto consideradas	126
Tabla 17. Factores de impacto anuales por Kg de N	129
Tabla 18. Factores de impacto anuales por kg de K <sub>2</sub> O y kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	130
Tabla 19. Factores de impacto por litro de combustible diésel	133
Tabla 20. Factores de impacto anuales por kWh de electricidad del mix	135



# ■ 1 ■

## Introducción

### 1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

El crecimiento poblacional y económico junto con la globalización han aumentado sustancialmente la demanda de recursos esenciales como el agua, la energía y el acceso a la tierra a lo largo de las últimas décadas.<sup>1</sup> Los estudios de prospectiva, además, apuntan a una tendencia continuista de aumento de la demanda a escala mundial, especialmente como resultado del crecimiento de las economías emergentes. Desde el punto de vista energético, el consumo de energía primaria globalmente ha aumentado en casi un 42% entre el año 2000 y 2013 (BP, 2014a), y las proyecciones apuntan a que la demanda de energía aumentará un 32% más hasta 2035 (BP, 2014b).<sup>2</sup> El aumento de la demanda de energía primaria se debe a la progresiva industrialización de muchos países, seguido del crecimiento del consumo de energía residencial, la agricultura, y en menor medida el transporte. En términos hídricos, las extracciones de agua dulce en los últimos 20 años también han aumentado en un 18% (UNEP, 2008). A día de hoy se estima que la demanda equivale ya al 107% de la oferta actual de agua que está accesible, es confiable y sostenible (McKinsey, 2009), y las estimaciones realizadas apuntan a que la demanda de agua aumentará en casi un 40% hasta 2030, situación que puede llegar a generar una brecha

1 Según Naciones Unidas la población mundial es probable que supere los 9 mil millones de personas en el año 2050, lo que supone un aumento de un tercio con respecto a los datos de 2009. Este crecimiento poblacional vendrá acompañado por un crecimiento económico, equivalente a tres veces el producto interior bruto (PIB) mundial del año 2005, y que se producirá fundamentalmente gracias al crecimiento de las economías emergentes.

2 La demanda energética ha crecido sobre todo en países de la OCDE, pero las perspectivas apuntan a que las nuevas demandas atienden sobre todo al crecimiento de los países no pertenecientes a la OCDE.

entre la oferta y la demanda de casi 2.800 km<sup>3</sup> (*ibid.*). El aumento del uso y consumo de agua es generalizado en todos los sectores (agricultura, industria y urbano), aunque la agricultura acapara la mayor parte de este futuro incremento. Tal y como estima la FAO (2009), la producción de alimentos hasta 2050 se espera que aumente hasta en un 70%, lo que requerirá más de 70 millones de nuevas hectáreas cultivables, de las cuales 32 millones serán para regadío.

Desde el punto de vista territorial, la apropiación de tierras para la producción de alimentos abarca en torno al 12% de la superficie terrestre (Foley et al., 2005; Ramankutty et al., 2008), y es muy probable que este porcentaje aumente en las próximas décadas. Las nuevas superficies agrícolas está previsto que se concentren en África Subsahariana y en América Latina, regiones con un elevado potencial para aumentar la producción y productividad agrícola, pero al mismo tiempo regiones de un gran valor ecológico y ambiental. El aumento de la superficie agraria en estas partes del mundo se destinará a satisfacer la demanda regional pero también global, de las economías emergentes y también de las más desarrolladas.

Estos datos ponen de manifiesto el enorme reto que supone afrontar la demanda futura de estos recursos, pero también la creciente dificultad a la que se enfrenta la sociedad para conciliar los objetivos de desarrollo y de sostenibilidad ambiental. El reto es aún mayor si consideramos factores de cambio como el cambio climático o la creciente urbanización, por la incidencia directa que estos tienen sobre la disponibilidad de estos recursos y sobre su demanda.

Las soluciones a los desafíos tan importantes que supone garantizar la disponibilidad y el acceso al agua, la energía y la alimentación requiere de enfoques integrados. Principalmente porque existen múltiples interconexiones entre estos sectores, y porque la adopción de políticas sectoriales puede tener impactos indeseados en el resto de recursos. La política energética de promoción de los biocombustibles promovida a comienzos del siglo XXI, como una de las posibles medidas para favorecer la de-carbonización del sector energético y lucha contra el cambio climático, ha ocasionado múltiples impactos desde el punto de vista territorial y alimentario, y constituye sin lugar a dudas un claro ejemplo de la necesidad de evitar las políticas de “silos”. Asimismo, la integración no sólo debe abarcar políticas sectoriales, sino que también debe apostar por alinear objetivos, para aumentar la eficiencia desde el punto de vista de la producción, pero también del consumo.

En el año 2011, en el transcurso de las sesiones preparatorias para la conferencia de RIO+20, se planteó por primera vez, en la conferencia de Bonn sobre el “Nexo Agua, Alimentación y Energía”,<sup>3</sup> la necesidad de promover el concepto o la idea de este nexo como una estrategia necesaria para alcanzar con mayores garantías de éxito los objetivos de desarrollo en materia de agua y alimentación. Por un lado, porque desde que en el año 2000 se establecieron los objetivos de desarrollo del milenio (ODM), diversos estudios y organizaciones han venido mostrando las múltiples sinergias que existen entre seguridad hídrica y alimentaria, y la importancia que tiene,

3 [http://www.water-energy-food.org/en/whats\\_the\\_nexus/background.html](http://www.water-energy-food.org/en/whats_the_nexus/background.html)

por ejemplo en los países más pobres, lograr objetivos básicos en materia de acceso al agua potable y saneamiento para mejorar las condiciones de seguridad alimentaria. En las economías más desarrolladas por el contrario, la elevada competencia por el acceso al recurso hídrico y el alto consumo de agua en el sector agrícola junto con los problemas de contaminación difusa que conlleva esta actividad, suponen un riesgo para la salud de los sistemas acuáticos, amenazando la seguridad hídrica y por tanto la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Por otra parte, aunque el acceso seguro y estable a una fuente energética no fue considerado como un objetivo específico de los ODM, en el transcurso de las últimas décadas la evidencia sobre la importancia de este recurso para el propio desarrollo y el alcance de los objetivos básicos en materia de la seguridad hídrica y alimentaria está siendo cada vez más palpable. Estas y otras circunstancias, han contribuido a poner de manifiesto la creciente complejidad de los sistemas sociales y la gran interconexión que existe a escala regional y global entre recursos, y cómo la demanda de un recurso o el desarrollo de políticas o medidas sectoriales, pueden tener impactos positivos y negativos en otros sectores. Esta situación obliga a adoptar una visión sistémica, e identificar esas sinergias y compromisos que surgen entre los componentes del nexo. En última instancia identificar las distintas interrelaciones, es la mejor manera de anticipar los posibles impactos de determinadas políticas.

En la actualidad numerosas iniciativas internacionales se han puesto en marcha para abordar el nexo entre sectores. Cabe destacar la iniciativa “Energía sedienta” (*Thirsty Energy*, en inglés), promovida por el Banco Mundial y cuyo objetivo es encontrar las fórmulas para satisfacer la demanda hídrica del sector energético. Otras iniciativas incluyen el Programa de “Agua para Alimentos” (*Water for food*, en inglés) de la Universidad de Nebraska, o el Programa “Energía para la Agricultura” (*Powering Agriculture* en inglés), una alianza de la Agencia de Cooperación Americana, la *Duke Energy Corporation*, el Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo del Gobierno de Alemania, la Agencia de Cooperación Sueca, y la Institución de Desarrollo Financiero de Estados Unidos. La mayoría de estas iniciativas abordan el análisis del nexo como relaciones bilaterales entre dos sectores, y apenas existen estudios o iniciativas que traten conjuntamente el triple nexo. Cabe destacar el informe sobre “Clima y las interacciones con el sistema Energía-Agua-Tierra en Estados Unidos” encargado por el Departamento de Energía Americano en el año 2012,<sup>4</sup> o el informe de FAO publicado en 2014 denominado “Transitando en el diálogo sobre el Nexo: Evaluando el nexo entre Agua-Energía-Alimentos”.<sup>5</sup>

A la dificultad de comprender las complejas interrelaciones que caracterizan el nexo agua-energía-tierra (AET), se suma el problema de las escalas. Si bien a escala global estudiar las relaciones de interdependencia puede ser útil para evaluar el impacto que una política regional o nacional puede tener en otras partes del mundo, a escalas regionales el estudio del nexo debería además contribuir a mejorar la coordinación entre sectores y países. En el ámbito nacional el estudio

4 [http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-21185.pdf](http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-21185.pdf)

5 <http://www.fao.org/3/a-i3959e.pdf>

del nexo puede tener también utilidad para fomentar una planificación coherente (ej. promover procesos de consulta intersectoriales para abordar sinergias y compensaciones), o promover el establecimiento de los incentivos adecuados, así como revisar aquellos que son perversos. Por último, a escala local la utilidad de abordar un estudio del nexo, puede tener relevancia para explorar soluciones innovadoras que promuevan un uso más eficiente de los recursos y permitan desacoplar la interdependencia entre recursos.

Desde el punto de vista metodológico, apenas existen marcos conceptuales desarrollados con el objeto de analizar las interrelaciones entre AET. Destaca el *Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism* (MuSIASEM), marco desarrollado por investigadores de la Universidad Autónoma de Barcelona, que permite analizar las relaciones físicas e interconexiones existentes entre recursos como el agua, tierra y la energía en el contexto de sistemas socio-económicos complejos.<sup>6</sup>

En consecuencia, se puede concluir que a pesar del interés que suscita el estudio de las interrelaciones del nexo AET, en la práctica todavía no existen marcos conceptuales y metodológicos que permitan guiar estudios en este sentido.

## 1.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Dada la relevancia que se le ha venido prestando en los últimos años al nexo AET, la Fundación Canal de Isabel II encargó a la Fundación Premio Arce de la Universidad Politécnica de Madrid, y al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) un estudio con el objetivo general de ahondar en el conocimiento y la importancia que puede tener el nexo AET en el contexto de España. El estudio se organizó en dos fases; en la primera se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el objeto de recopilar información sobre estudios desarrollados en España en relación con el nexo AET. Este trabajo de gabinete se complementó con entrevistas con expertos en distintos ámbitos de la energía, el agua, la planificación territorial y el cambio climático para conocer su opinión sobre estas cuestiones. En el Anexo I se relacionan las personas entrevistadas y la temática sobre la que aportaron información y conocimiento experto. Dada la complejidad del tema, se decidió abordar el estudio analizando en primer lugar las relaciones bidireccionales que surgen entre los distintos componentes, es decir: agua-energía, agua-territorio y territorio-energía. A partir de ese análisis de relaciones bidireccionales, se intentó determinar, en cada caso, el rol de la tercera componente del nexo.

<sup>6</sup> Más información se puede encontrar en: <http://www.nexus-assessment.info/>

La información recopilada sirvió para elaborar un primer informe, que fue sometido a debate durante un seminario multidisciplinar que tuvo lugar en diciembre de 2014 en la sede de la Fundación Canal, al que asistieron expertos en distintas temáticas relacionadas con el agua, la energía y la gestión territorial. El objetivo de este seminario fue, en primer lugar, validar la pertinencia del estudio y evaluar la idoneidad del informe que se presentó, así como proponer, teniendo en cuenta los retos identificados, un par de casos de estudio de interés que pudieran realizarse con mayor detalle durante una segunda fase del proyecto. Las conclusiones de este seminario se adjuntan en el Anexo II.

En base a las sugerencias realizadas por los expertos consultados y de acuerdo con la capacidad técnica del equipo de trabajo se decidió desarrollar los siguientes casos de estudio:

1. Un estudio de prospectiva sobre los impactos ambientales (incluyendo agua, territorio pero también otros elementos) ligados a distintos escenarios de producción energética en España en el horizonte de 2030.
2. Un análisis retrospectivo sobre las mejoras en eficiencia que ha experimentado el sector agrícola en España en el transcurso de las últimas décadas en relación a la utilización de AET y los impactos ambientales ligados a esta actividad.

## 1.3 RELEVANCIA DEL NEXO AET EN ESPAÑA

### 1.3.1 Condiciones de contorno y datos básicos

El agua, la energía y el territorio son tres recursos fundamentales para el desarrollo social y económico de un país. En términos hídricos, España es el país más árido de la Unión Europea y tiene una disponibilidad natural de agua limitada e irregular. El norte peninsular es húmedo y tiene una disponibilidad de agua elevada, mientras que en el sur y este peninsular la disponibilidad de agua es reducida. La demanda de agua sin embargo sigue un patrón inverso, con la zona mediterránea aglutinando los mayores usos de agua, principalmente para agricultura y abastecimiento urbano. Esta asimetría territorial entre la oferta y la demanda es en buena medida la causa de los diversos conflictos y competencia que existen por el agua.

Desde el punto de vista territorial, los paisajes agrarios son dominantes y ocupan casi la mitad del territorio nacional (46,4%), ya sea para la producción de cultivos (36,3%) o de pastos y prados para el ganado (12,8%). Las superficies naturalizadas (bosques y matorrales) ocupan un 37,5% del territorio y el 11% restante son superficies urbanizadas, improductivas o láminas

de agua. En el transcurso de las dos últimas décadas, España no ha experimentado grandes transformaciones territoriales. La superficie agraria en conjunto ha disminuido sensiblemente entre 1990 y 2013 (6%), principalmente como resultado del abandono de los sistemas más extensivos y la intensificación de las zonas más productivas. El abandono agrario ha permitido la regeneración de la vegetación y un aumento del 5% de las superficies forestales y de matorral. En menor medida, la reducción de la superficie agraria se explica como resultado de las políticas de desarrollo urbanístico.

En términos energéticos, España tiene una dependencia energética muy elevada, aunque en los últimos años se ha ido reduciendo debido a dos factores fundamentales: el aumento de la participación de las energías renovables en el sistema y el descenso en el consumo de energía final debido tanto a la crisis económica como a la mejora de la eficiencia energética. Esta reducción en la dependencia ha ido del 81,1% en 2005 al 70,8% en 2012, todavía muy lejos de la media europea ese año situada en un 47%.

## CUADRO 1. Cifras y datos claves sobre agua y energía en España



### AGUA

En España existe una asimetría espacial y temporal entre la oferta y la demanda de agua. El 65% de los recursos hídricos disponibles se ubican en las demarcaciones más septentrionales mientras que el 51% de la demanda se concentra en la mitad sur y este peninsular.

El consumo de agua en el transcurso de las últimas décadas se ha estabilizado. Se estima que la demanda bruta de agua a nivel nacional asciende a 35.000 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuáles el 80% son para riego de cultivos, el 14% para abastecimiento urbano y el 6% restante para usos industriales.

El crecimiento económico en nuestro país está desacoplado del uso del agua (ver Garrido et al., 2010). Sin embargo, sectores como la agricultura o la producción hidroeléctrica son muy vulnerables frente a cambios en su disponibilidad.

Una disponibilidad limitada de agua, unida a la elevada demanda por parte de los distintos sectores de actividad son los principales factores responsables del deterioro ambiental de las masas de agua. El 55% de los ríos y el 53% de los acuíferos se encuentran en mal estado, debido a su sobre-explotación o contaminación.

## ENERGÍA

España se caracteriza por tener una alta dependencia energética del exterior ya que más del 70% de la energía consumida es de exportación. El consumo de energía tanto primaria como final ha venido disminuyendo en los últimos años como consecuencia de la crisis económica, pero también debido a la adopción de nuevas medidas de eficiencia energética y la introducción progresiva de las energías renovables en el sistema.

El consumo de combustibles de uso final está dominado por los productos petrolíferos con más del 50% del consumo total, seguido de la electricidad y el gas natural. Con respecto a la energía primaria, el petróleo es también el combustible más consumido seguido del gas natural. El consumo de recursos renovables se ha incrementado de forma muy notable en los últimos años duplicándose de 2005 a 2012.

Por sectores, según datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2013), el transporte cada año consume el 40% de la energía final seguido de la industria y del sector residencial.

La intensidad energética, que es un indicador de la eficiencia energética de la economía de un país o región calculada como la relación entre el consumo energético y el Producto Interior Bruto (PIB), se ha reducido de forma notable llegando a ser en 2011 un 15% menor que en 2005. Esto demuestra la tendencia al desacoplamiento entre el consumo energético y el crecimiento económico.

La producción de electricidad aumentó de 2005 a 2008 cuando alcanzó el máximo del periodo, a partir de entonces se redujo llegando al final a suponer un 4% menos en 2012 que en 2008 alcanzándose los niveles de 2006. El gas aumenta su participación en el sistema hasta 2008, en el que es responsable del 31% de la producción bruta, terminando en 2012 con una contribución del 15%, la mitad en cuatro años. El uso del carbón sin embargo ha seguido unas pautas diferentes tendiendo a una gran reducción hasta 2010 para luego recuperarse en los últimos años gracias a las recientes políticas de promoción. La característica más importante de este periodo es el aumento de la participación de las tecnologías renovables como consecuencia de las políticas de apoyo iniciadas.

En economías avanzadas como la española los cambios en la demanda de AET están muy condicionados por la capacidad de innovación y desarrollo tecnológico, los incentivos y obligaciones asociados a distintas políticas sectoriales, la globalización económica y, a medio plazo, el cambio climático. La coyuntura económica, como la crisis económica que España ha experimentado desde 2008, también inciden sobre la demanda de AET pero de manera puntual y su impacto quizás no sea duradero en el tiempo. Otros factores como el desarrollo económico y el aumento de la población son menos relevantes en el caso de España, dado que las proyecciones en este sentido son relativamente estables comparadas con las economías emergentes.

Desde el punto de vista del análisis de políticas, el enfoque del nexo en el caso de España tiene mucho interés dado que existen numerosas políticas sectoriales en materia de agua, energía y planificación territorial que tienen un fuerte impacto en otros sectores. Un análisis detallado puede ser muy útil para clarificar la intensidad de las interrelaciones que existen entre estos recursos en clave nacional así como para evaluar ex-ante o ex-post las sinergias y compromisos existentes entre objetivos de distintas políticas sectoriales en materia de AET.

En este sentido, el Tribunal de Cuentas Europeo emitía un informe recientemente (TCE, 2014) donde evaluó los esfuerzos realizados por parte de la Comisión Europea para fomentar una mayor integración entre dos de las grandes políticas europeas, la Directiva Marco del Agua-DMA (2000/60/CE) y la Política Agraria Comunitaria-PAC. En su informe el TCE concluye que la integración de los objetivos de la DMA en la PAC a nivel europeo sólo se ha logrado parcialmente. El motivo principal es que hay un desfase entre la ambición de los objetivos de las dos políticas y los instrumentos empleados para que se produjera el cambio. El examen puso de manifiesto insuficiencias en los dos instrumentos actualmente empleados por la Comisión para integrar las cuestiones relativas al agua en la PAC (la condicionalidad y el desarrollo rural) y señaló retrasos e insuficiencias en la aplicación de la DMA. En clave nacional la falta de alineamiento de los objetivos de la DMA y la PAC queda patente cuando se analiza la elevada correlación existente entre la distribución de pagos y ayudas al sector agrícola y el mal estado de las masas de agua (Willaarts, 2015).

Otras medidas sectoriales como los cambios introducidos en 2010 para atajar el déficit de tarifas en el sector eléctrico (Real Decreto-ley 14/2010) han tenido un impacto significativo en términos del aumento de la factura eléctrica para los distintos usuarios. En el caso de los regantes, el incremento de la factura ha sido entre el 35 y el 70%, principalmente como resultado de la eliminación de las tarifas especiales para regadío y del aumento del coste del término de potencia. Los regadíos modernizados, y por tanto los más eficientes en el uso del agua, son los que más han sufrido el aumento del coste energético. Esta situación ha hecho que muchos regantes se planteen la viabilidad de sus explotaciones si tienen que hacer frente a estos costes energéticos, y a que los nuevos planes de modernización de regadíos queden paralizados temporalmente.

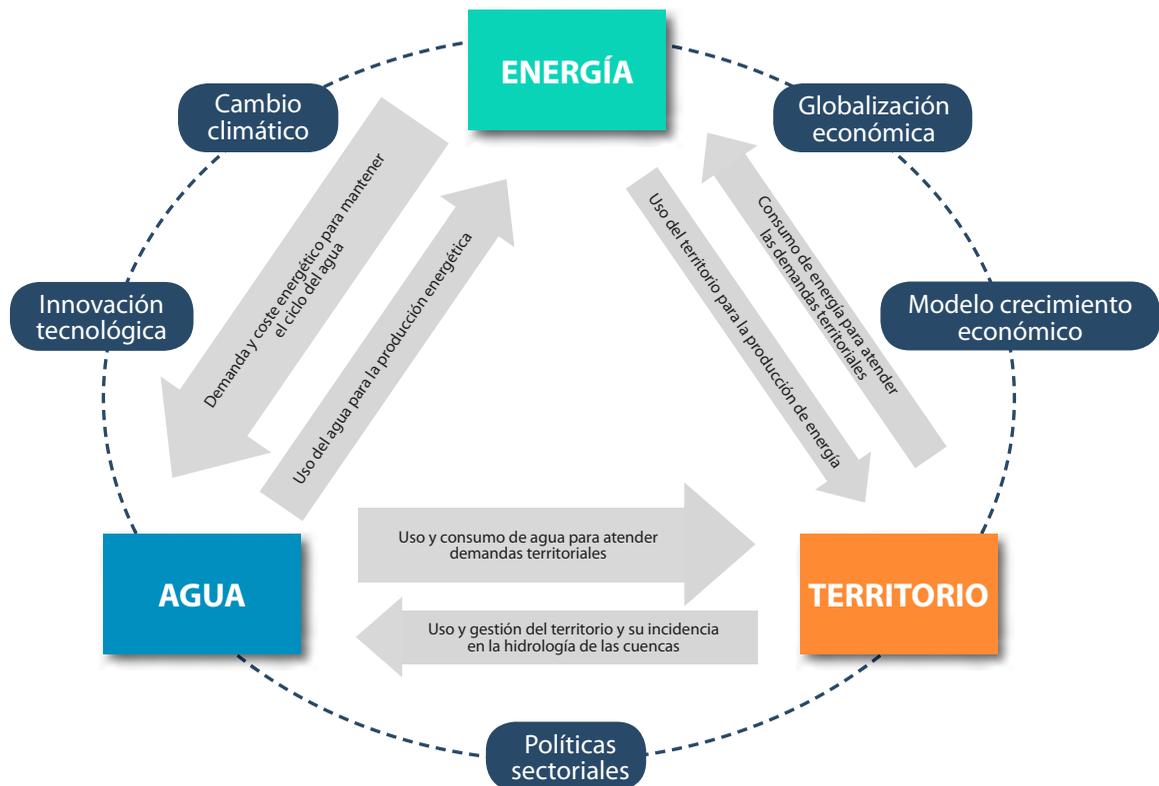
La Directiva 2009/28/CE de promoción de energías renovables formulada con el objetivo de reducir el nivel de emisiones y mitigar los efectos de cambio climático, es otro ejemplo con una incidencia clara en el nexo AET. Esta Directiva establece un objetivo obligatorio de consumo de energías renovables del 20% sobre el consumo de energía final y un 10% sobre la energía final consumida en el sector del transporte en el año 2020. Este último objetivo se prevé que se logre en base al uso de biocarburantes y en menor medida a una mayor penetración de vehículos eléctricos. Los biocarburantes disponibles en el mercado actualmente son sobre todo de primera generación, lo que significa que consumen materias primas agrícolas, cultivos oleaginosos, cereales y cultivos azucareros fundamentalmente. El establecimiento de estos objetivos obligatorios de consumo de biocarburantes, transpuestos a la normativa de los estados miembros, ha creado una demanda adicional de materias primas para biocarburantes que está afectando a los mercados de materias primas agrícolas y al uso de la tierra ya sea de forma directa o indirecta. La preocupación generada por las estimaciones de estos efectos indirectos ha llevado a la Comisión Europea a proponer una serie de modificaciones a la Directiva 2009/28/CE orientadas a limitar estos efectos e incrementar los beneficios climáticos de los biocarburantes empleados en la UE.

Además de las políticas europeas y nacionales, la globalización de la agricultura y el aumento del comercio internacional han propiciado niveles de interrelación productiva y de cadenas de producción desconocidos en el mundo hasta la fecha. Se considera que la UE tiene una dependencia del exterior en términos de territorio de unas 30 millones de hectáreas de cultivo, fundamentalmente para la importación de soja y sus derivados y de semillas oleaginosas. Podemos afirmar que el sistema ganadero intensivo europeo (cerdo, pollo y huevos) es totalmente dependiente de las importaciones de soja, la mayoría de las cuales proceden de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. Todo ello está amparado por el sistema de regulación del comercio internacional, surgido a partir de la Ronda Uruguay de 1994, en el marco de la Organización Mundial de Comercio, y que no ha sido modificado desde entonces. Evidentemente, esto ha tenido consecuencias positivas para importadores y exportadores, pero muy negativas en cuanto a deforestación, contaminación de agua, y pérdida de emisiones, en las grandes zonas productoras de América y Asia.

### 1.3.2 Las relaciones agua-energía-tierra

Las interrelaciones que surgen en torno a la utilización del territorio, el agua y la energía y sus impactos en el resto de sectores pueden ser muy complejas. Además, no en todos los casos puede resultar relevante su estudio. Las condiciones de contorno, así como la situación de uso y demanda de los distintos recursos, hacen que en determinados países algunos *nexos* puedan ser más relevantes que otros. La Figura 1 muestra los distintos nexos identificados en España así como la intensidad o importancia de cada uno de ellos.

**Figura 1. Relaciones entre agua-energía y tierra (AET) en España y condiciones de contorno.**  
El grosor de las flechas indica la importancia de los diferentes nexos.



Fuente: Elaboración propia

En los siguientes epígrafes se describen las relaciones entre los distintos componentes de manera bidireccional en el contexto de España. Como muestra la Figura 1, los nexos que se han identificado como más importantes incluyen las relaciones entre agua y energía, y entre agua y territorio. También se describen brevemente las relaciones entre energía y territorio aunque se ha constatado que en la actualidad éstas serían menos relevantes en el caso español.

### 1.3.2.1 Agua para la Energía

En España el consumo de energía primaria entre 2007 y 2014 ha disminuido un 20%, de 146.779 Ktep a 118.412 Ktep (MINETUR, 2015). Esta reducción en el consumo coincide con la crisis

económica y la reforma del sector eléctrico llegando a valores por debajo de los registrados a comienzos del siglo XXI (MINETUR, 2015). Las proyecciones a futuro son inciertas pero se estima que la tendencia es a la estabilización y, en su caso, un ligero incremento.

Las variaciones en la demanda energética desde el año 2000 han venido también acompañadas por importantes transformaciones del mix energético. La tendencia apunta hacia una reducción en el consumo de energías fósiles (principalmente carbón y petróleo) y nuclear, y un creciente aumento de las renovables, sobre todo la energía eólica, hidráulica, solar y biomasa. Los cambios en el sector responden a múltiples factores, incluidas las políticas y regulaciones impulsadas desde la Unión Europea para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fomentar el uso de energías renovables y aumentar la eficiencia energética, englobadas dentro del denominado Marco de Acción por el Clima.<sup>7</sup>

El objetivo de la Unión Europea es continuar promocionando las energías renovables en todos los países miembros, y por ello ha establecido un objetivo obligatorio de consumo de energías renovables del 20% sobre el consumo de energía final y un 10% sobre la energía final consumida en el sector del transporte en el año 2020 (Directiva 2009/28/CE). Los objetivos de utilización de tecnologías renovables establecidos en el Plan Nacional de Energías Renovables (IDAE, 2011) a requerimiento de la Directiva 2009/28/CE, establecen una trayectoria de cumplimiento del objetivo fijado fomentando el uso de biomasa y biocarburantes en energía final y de energía eólica, hidráulica y solar –tanto fotovoltaica como termosolar de concentración- en generación eléctrica.

Los cambios en el modelo de producción y regulación del sector energético en España tienen importantes repercusiones sociales, económicas y ambientales. Desde el punto de vista económico, la reforma del sector eléctrico ha contribuido a encarecer la tarifa eléctrica, eliminar algunos subsidios y en definitiva a aumentar la factura energética de manera considerable, lo que ha tenido un impacto grande en el sector del regadío y también a nivel de los hogares. Asimismo, la apuesta por el fomento de las energías renovables contribuye a reducir la tasa de emisiones de GEI, pero las repercusiones que estos cambios de modelo energético tienen en recursos tan estratégicos como el agua pueden ser notables, dado que distintas tecnologías energéticas tienen diferentes requerimientos de agua. Es necesario tener en cuenta que el uso de agua no siempre significa un consumo, como puede ser el caso de las centrales hidráulicas. Sin embargo, estos datos deben tenerse en cuenta, puesto que muestran la gran dependencia que el sector energético tiene sobre la disponibilidad de agua.

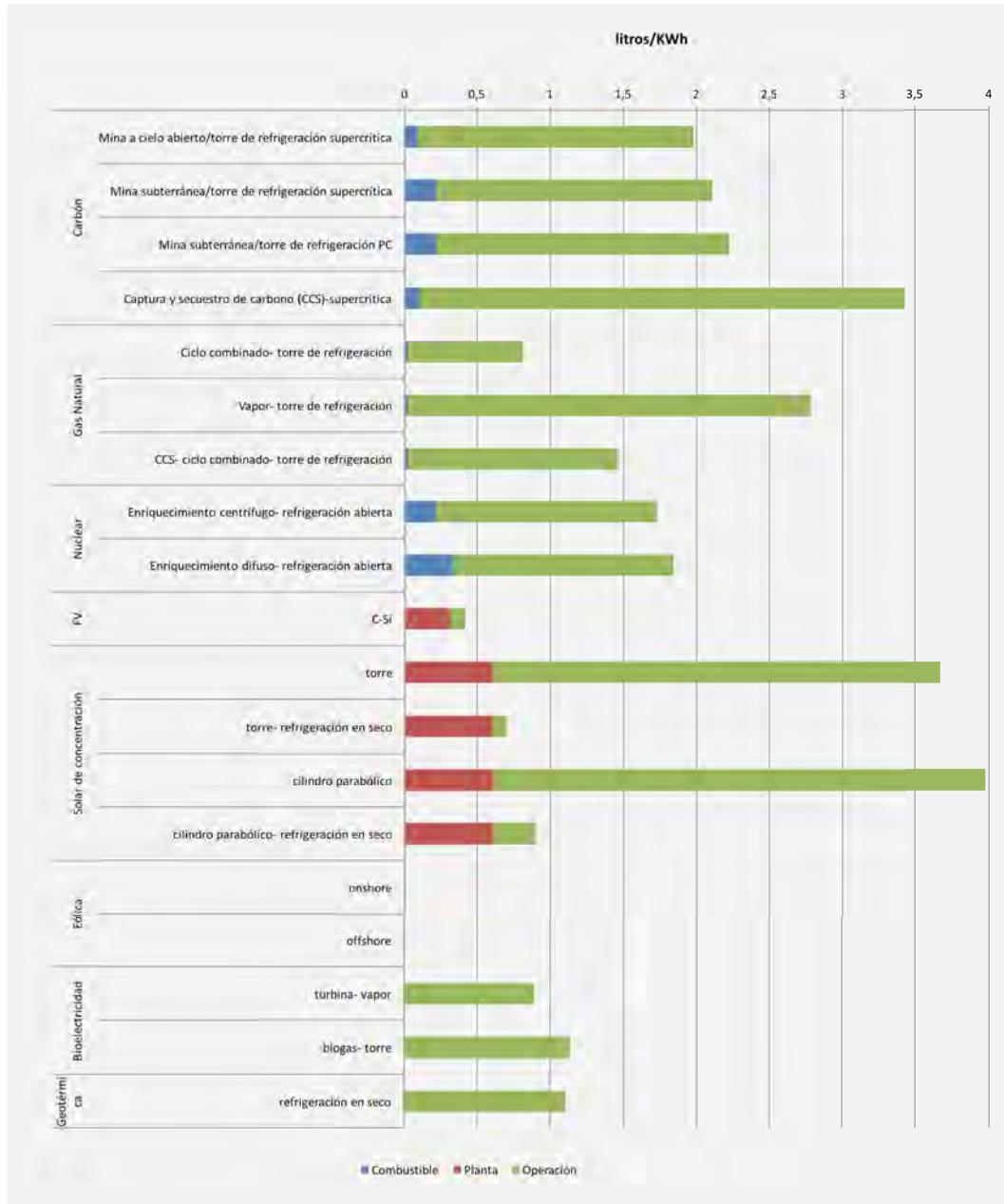
De acuerdo con Linares y Khan (2014), los combustibles fósiles como el petróleo tienen unas necesidades hídricas equivalentes a 0,15 m<sup>3</sup>/kWh, que en buena medida se usan durante la fase de minería y extracción. Estos autores también estiman que la producción de biocombustibles

7 [http://ec.europa.eu/clima/about-us/mission/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/about-us/mission/index_en.htm)

tiene unas necesidades hídricas muy superiores que ascienden a 8,69 m<sup>3</sup>/kWh, y que se requieren fundamentalmente durante la fase de producción y cultivo. En el caso de la energía hidroeléctrica producida en embalse, la demanda de agua es de 2,78 m<sup>3</sup>/kWh, aunque una buena parte de este agua no se consume, sino que se usa y se devuelve a continuación al sistema (Linares y Khan, 2014).

Naciones Unidas publicó en 2014 el informe Water and Energy (WWAP, 2014), en el que analiza el nexo agua y energía en distintas regiones del mundo, teniendo en cuenta los riesgos e incertidumbres que pueden generar el aumento de demanda de ambos recursos así como la escasez de los mismos. En este estudio se utilizan datos de varios organismos como la Agencia Internacional de la Energía y la OECD, que a su vez utilizan datos de Macknick et al. (2012), uno de los estudios más referenciados en este ámbito. Macknick et al. (2012) evalúa el uso del agua, considerando la extracción y el consumo, para distintas tecnologías de generación eléctrica utilizando como datos publicados por otros autores. En los resultados que presenta sólo se consideran el uso y consumo de agua durante la etapa de operación de la planta, excluyendo las etapas anteriores, que asume insignificantes. Además del consumo o uso de agua durante la fase de producción de la fuente de energía, es importante considerar también los consumos de agua que ocurren en procesos anteriores a la producción, como durante la extracción de las materias primas o combustibles, su transporte y su posterior tratamiento. La dificultad de estimar los consumos de agua a lo largo del ciclo de vida de los sistemas de generación de energía es evidente, pues son pocos los estudios en los que se consideran otros procesos anteriores a la operación de las plantas. La Figura 2 muestra las distintas etapas del ciclo de vida de la generación de electricidad para distintas fuentes de energía, incluyendo la extracción de los combustibles, su procesado y transporte, la operación y mantenimiento de la planta y su desmantelamiento. Los consumos estimados para cada tecnología y etapa son valores medios calculados a partir de múltiples fuentes de información pública y de estudios publicados.

Figura 2. Consumo de agua por etapas del ciclo de vida de la generación de electricidad a partir de distintas fuentes de energía



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Meldrum et al. (2013).

Schornagel et al. (2012) estima la extracción y consumo de agua asociado a distintos combustibles, incluyendo algunos de los biocombustibles más producidos actualmente y considerando también las etapas anteriores al proceso de producción del combustible. Los valores medios típicos del consumo de agua del biodiesel de palma y colza son similares a los derivados del petróleo obtenidos por recuperación primaria, aunque la variabilidad es mucho mayor, mientras que la media típica de demanda de agua en el caso del biodiesel de soja es dos órdenes de magnitud superior a la demanda del crudo refinado por recuperación primaria.

La demanda de agua en el caso del bioetanol también varía en función de la materia prima. Los valores más bajos pertenecen al bioetanol de azúcar y maíz, con demandas similares a los derivados del petróleo de recuperación primaria y secundaria. Sin embargo, la demanda de agua del bioetanol a partir de materias lignocelulósicas es hasta 8 veces superior a la producción de derivados del petróleo por recuperación secundaria.

En España apenas existen evaluaciones sobre el consumo de agua y uso de territorio asociado a los cambios del modelo energético, ni sobre los impactos que nuestro país genera a través de las importaciones de energía en los países productores.<sup>8</sup> Hardy y Garrido (2010) estimaron que en 2008 en torno al 25% de la demanda de agua en España se destinó a la producción de energía. Esta demanda implica que el volumen de agua usada para la producción de energía en 2008 ascendió a 32.780 hm<sup>3</sup> anuales mientras que el consumo real de agua supuso 1.630 hm<sup>3</sup>. Según estos autores, el 77% del volumen de agua usada (25.520 hm<sup>3</sup>) y el 74% del agua consumida (391 hm<sup>3</sup>) se atribuyen exclusivamente a la producción de energía hidroeléctrica en ese año. En menor medida destaca el consumo de agua asociado a la producción de energía de origen nuclear ( $\approx 115$  hm<sup>3</sup> anuales) y la energía eléctrica procedente del carbón ( $\approx 85$  hm<sup>3</sup> anuales). Más allá del impacto que la generación de energía puede tener sobre la cantidad del recurso hídrico, conviene señalar los impactos sobre la calidad del agua. La descarga de agua de los sistemas de refrigeración en las plantas de producción de electricidad a las masas de agua es una fuente muy importante de contaminación térmica. La alteración del régimen natural de los caudales como consecuencia de la presencia de infraestructuras hidráulicas, también tiene un impacto muy importante sobre la ecología y el estado físico químico de los sistemas fluviales. Tal y como describen Willaarts et al. (2014), la sobre-regulación de los ríos es una de las principales causas del mal estado ecológico de las masas de aguas superficiales en España. Por otra parte, los procesos de explotación de los recursos fósiles (perforación, fractura hidráulica, procesos de inyección, lavado de combustibles, etc.) o la producción de biocombustibles son también una fuente potencial de contaminación química del agua.

<sup>8</sup> España es el país de la Unión Europea con mayor dependencia energética externa. Se estima que entre el 70-74% de la energía consumida en España entre 2000 y 2013 ha sido importada del exterior (IEA, 2015)

Desde el punto de vista de la planificación energética, el análisis sobre los impactos que tiene el modelo energético español sobre recursos tan estratégicos como el agua resulta de gran interés. Por un lado, España es un país semi-árido y por tanto con una disponibilidad natural de agua limitada. Además, y de acuerdo con las proyecciones de cambio climático realizadas por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas para España (CEDEX, 2010), la disponibilidad de agua a medio plazo (2040) se prevé que puede disminuir entre un 5% y un 25%, dependiendo de las demarcaciones hidrográficas y los escenarios climáticos considerados (Garrido et al., 2012). Las proyecciones de cambio climático también prevén importantes cambios en algunos de los principales países productores de energía de los que se abastece España. En África del Norte y Oriente Próximo, de donde España importa aproximadamente el 40% de su energía, se prevé un incremento de la temperatura media entre 1 y 5°C, y una reducción de las precipitaciones entre el 10 y el 20% (IPCC, 2014).

Linares y Khan (2014) han evaluado el uso y consumo de agua de las principales tecnologías energéticas en España en el horizonte de 2050 bajo distintos escenarios de cambio climático. Según este estudio, el uso y consumo de agua para producción de energía se prevé que se reducirá entre un 2 y un 6%, dependiendo de la severidad en la disponibilidad de agua proyectada y la capacidad de adaptación del sistema energético español. Sin embargo, este estudio recalca la incertidumbre existente en torno a las proyecciones climáticas existentes para España y también sobre la futura demanda energética, de modo que estos resultados deben ser interpretados como una primera aproximación.

A la incertidumbre sobre las proyecciones futuras de demanda energética y condiciones de contorno, se suma el hecho de que muchas tecnologías energéticas están en el comienzo de la curva de aprendizaje, y por tanto el potencial de aumentar su eficiencia y disminuir sus impactos sobre el nexo son importantes. Los avances registrados en el transcurso de los últimos años en el sistema energético, responden en gran medida a los requisitos establecidos dentro del marco regulatorio, y no tanto posibilidades reales de desarrollo de muchas tecnologías. Este factor es importante tenerlo en cuenta de cara a evaluar los impactos hídricos y territoriales del sistema energético a medio plazo.

### 1.3.2.2 Energía para el Agua

De la misma manera que la producción energética lleva asociado un consumo de agua, el uso del agua requiere un flujo continuo de aportes energéticos cualquiera que sea el sector que la emplea o la transformación que sufra. La estimación de la cantidad de energía necesaria para mantener el ciclo del agua, incluyendo la captación, tratamiento, distribución y depuración de aguas residuales, depende mucho de las condiciones locales de uso del recurso hídrico y de su estado de calidad. En España apenas existen estudios que detallen las necesidades energéticas del ciclo del agua desde una perspectiva integral (Hardy y Garrido, 2012; Aldaya y Llamas 2013), aunque sí existen investigaciones sectoriales (ver por ejemplo Cabrera et al. (2008); Murgui et al. (2009); Corominas (2009); Camacho (2012)).

De acuerdo con Hardy y Garrido (2012) y Aldaya y Llamas (2013) el ciclo del agua en España consume en torno al 6 y 7% del consumo eléctrico nacional, dependiendo de los años (Tabla 1). Las etapas más costosas en términos de energía son la captación y el tratamiento previo al uso, que representan conjuntamente el 64-66% de la demanda. La fase de distribución a los usuarios representa en torno al 20-21% y el tratamiento de aguas residuales el 16% restante. Las estimaciones sobre los consumos energéticos asociados a la fase de depuración y tratamiento son sin embargo bastante inciertas debido a la diversidad de contaminantes y técnicas empleadas (Photo-Fenton, MBR,...). Hasta hace poco tiempo se consideraba el coste de la desalación como un límite superior, pero se cree que la eliminación por ejemplo de contaminantes emergentes puede requerir hasta 30 kWh/m<sup>3</sup>, lo cual multiplicaría el coste energético por 10 con respecto a la desalación. Igualmente, se sabe que la eliminación de contaminantes como los pesticidas, requiere una gran cantidad de energía, pero la incorporación de tecnologías fotovoltaicas podría abaratar mucho el consumo de energía (Klamerth, 2011).



Iberdrola

Tabla 1. Gasto de energía asociado al uso del agua en España

Etapas del ciclo del agua	Hardy y Garrido (2012)		Aldaya y Llamas (2013)	
	Consumo de Electricidad (GWh) año 2007	% Ciclo o etapa	Consumo de Electricidad (GWh) año 2012	% Ciclo o etapa
<b>Etapa “Captación, abastecimiento+ tratamiento de agua” (1)</b>	<b>11.861,0</b>	<b>64,0</b>	<b>10.418,0</b>	<b>66,0</b>
Urbano	5.979,0	33,0	5.457,0	33,0
(Parte de desalación)	2.276,0	12,0	-2.275,0	14,0
Agrícola	4.196,0	23,0	4.141,0	25,0
Energía	1.656,0	9,0	521,0	3,0
Industria			299,0	2,0
<b>Etapa “Distribución de agua” (2)</b>	<b>3.629,0</b>	<b>20,0</b>	<b>3.374,0</b>	<b>21,0</b>
Residencial	441,0	2,0	440,0	3,0
Comercio	148,0	1,0	144,0	1,0
Municipal y otros	17,0	0,1	62,0	0,1
Industrial	349,0	2,0	49,0	0,1
Agrícola	2.469,0	13,0	2.469,0	15,0
Agua no registrada	206,0	1,0	210,0	1,0
<b>Etapa “Tratamiento de aguas residuales” (3)</b>	<b>2.893,0</b>	<b>16,0</b>	<b>2.530,0</b>	<b>16,0</b>
Recogida de agua	260,0	1,0	189,0	1,0
Depuración de agua	2.338,0	13,0	1.454,0	9,0
Agua reciclada	294,0	2,0	887,0	5,0
<b>Total (Etapas (1)+(2)+(3)) (GWh)</b>	<b>18.354,0</b>		<b>16.322,0</b>	
<b>Demanda eléctrica en España (GWh)</b>	<b>260.073,0</b>		<b>279.392,0</b>	
<b>Porcentaje</b>	<b>7,0%</b>		<b>6,0%</b>	

Fuente: Elaborada con datos de Hardy y Garrido (2012) y Aldaya y Llamas (2013)

Si se analiza el consumo de energía por sectores, el abastecimiento urbano es el sector que más energía consume ( $\approx 49\%$  del gasto asociado al ciclo del agua en su conjunto), seguido por el regadío ( $\approx 40\%$ ) y en menor medida la industria ( $\approx 6\%$ ) (Tabla 1). Las necesidades energéticas del sector del agua urbana están en gran medida asociadas a la etapa del “Captación, abastecimiento y tratamiento de agua” con el 33% del consumo eléctrico de todo el sector del agua. La elevación de las cuotas de saneamiento y depuración de aguas residuales sin duda está asociada al mayor coste energético, en términos de precio de la energía y de intensificación de su uso.

En el sector agrario el mayor gasto energético está también asociado a la captación y abastecimiento (23-25%), seguido de la distribución (13-15%). Este sector es probablemente uno de los que mayores cambios ha experimentado en el transcurso de los últimos años en términos de consumo eléctrico y de costes. Por un lado, los cambios introducidos para corregir el déficit tarifario en el sector eléctrico, han traído consigo un incremento sustancial de las tarifas eléctricas. Este cambio ha coincidido además con los programas de modernización de regadíos que vienen desarrollándose en España desde comienzos de 2000, que han supuesto actuaciones y proyectos de mejora en casi 1,5 millones de hectáreas. Una de las medidas más importantes incluidas en estos planes tiene que ver con la modernización de las técnicas de riego en las explotaciones para aumentar la eficiencia en el uso del agua. Entre 2002 y 2013 la superficie con riego localizado se incrementaron en más de 600.000 ha, mientras que la superficies con riego por gravedad se redujo en 300.000 ha y aquellas dotadas con sistemas de riego por aspersión se mantuvieron relativamente constantes (Rodríguez-Chaparro, 2014). Este plan de modernización ha contribuido a aumentar la eficiencia en el uso de agua a escala de parcela pero a costa también de un mayor gasto energético.

Las necesidades energéticas medias de cada técnica de riego son muy diferentes, y dependen de la altura manométrica necesaria para regar, con independencia del origen del recurso y su transporte. Camacho (2012) ha estimado unas necesidades energéticas medias para riegos por gravedad de  $0,044 \text{ kWh/m}^3$ ; en sistemas de aspersión de  $0,33 \text{ kWh/m}^3$ ; en riegos por pivote  $0,198 \text{ kWh/m}^3$  y en riego localizado de  $0,134 \text{ kWh/m}^3$ . Si el agua que se emplea en sistemas localizados es menor que en aspersión o pivote (debido a la mayor uniformidad del riego, menores pérdidas por evaporación y mayor aprovechamiento por las plantas) es evidente que el riego localizado es más del doble de eficiente que el sistema de aspersión y pivote. En término medio, el consumo de energía por metro cúbico se situó en  $0,33 \text{ kWh/m}^3$  considerando todas fases -transporte, impulsión y aplicación del riego-, aunque existen amplias diferencias de unas regiones a otras. En la región de Murcia, por ejemplo, Soto-García et al. (2013) han estimado intensidades energéticas superiores a  $1 \text{ kWh/m}^3$ . La diferencias de intensidad guardan relación con el tipo de agua empleada (desalinizada, superficial, subterránea), o el incremento de los costes de captación y transporte en el caso de las aguas subterráneas como resultado de la reducción de los niveles piezométricos.

En resumen, las consecuencias de esta doble transformación gradual --modernización y cambios en los sistemas de riego-- han sido:

- Notable encarecimiento del coste de energía para el riego entre 2008 y 2012
- Desarrollo de modalidades contractuales muy variadas entre suministradores del sector eléctrico y las unidades colectivas de consumo (zonas regables), mediante el uso de Central de Compras de Energía Eléctrica
- Priorización de la reducción del consumo eléctrico y la optimización energética en todas las fases del uso del agua

El gran debate suscitado en torno al diseño y enfoque inicial de los proyectos de modernización se ha centrado en analizar si el coste de inversión, y el de energía que llevaría asociado un sistema de red hídrica en carga, justificarían el ahorro del agua en parcela. Dos autores de manera independiente han llegado a las mismas conclusiones, que merece la pena resumir aquí (Alarcón, 2014; Hardy y Garrido, 2012). Existen rangos de mejoras de eficiencia en el uso del agua que justifican la inversión en modernización. Esos rangos de mejora aumentan cuanto mayor sea la inversión y el coste de energía asociado a la energía requerida para obtener el agua que se va a emplear. Fuera de estos rangos, la regeneración de aguas residuales o incluso la desalación pueden ser mejores alternativas a la modernización.

En el caso de las aguas desaladas, la eficiencia técnica alcanzó los 3,5 kWh/m<sup>3</sup>. El límite teórico mínimo es de 1 kWh/m<sup>3</sup>, y se han documentado técnicas experimentales con 2 kWh/m<sup>3</sup>, pero se cree que éste puede ser el límite tecnológico. De manera comercial, y en plantas en explotación, las mejores eficiencias no bajan por debajo de los 3kWh/m<sup>3</sup>. Ello comporta que en términos globales el agua desalada es con diferencia la fuente que más energía requiere llegando a representar en conjunto el 12-14% de toda la energía consumida en el ciclo del agua (Tabla 1).

En síntesis se puede concluir que desde hace unos años se han llevado a cabo numerosos proyectos para reducir el consumo energético del ciclo del agua en todos los ámbitos. Ello ha requerido un gran esfuerzo inicial de diagnóstico, el cual reveló eficiencias energéticas bastante deficientes, y por tanto amplio margen para mejorarlas. En todos los casos, la reducción de pérdidas en las redes tiene la consecuencia inmediata de una mejora en los rendimientos.

En la agricultura, tal vez el sector que más ha sufrido las consecuencias del cambio de la regulación del sector eléctrico y el encarecimiento de las tarifas, las iniciativas incluyen intentos de optimizar el uso de la energía con algoritmos complejos para la gestión de redes, recuperar energía en las mismas, producir energía para el auto-consumo y negociar contratos con las suministradoras. Existen importantes zonas regables, como el Canal de Aragón y Cataluña, que tiene el objetivo de tener un consumo neto de energía nulo, aprovechando las diferencias de cota de sus acometidas

y uso. En el ámbito urbano, la gestión de redes es también uno de los focos centrales. Y en el caso de la regeneración y depuración -en los que se están introduciendo el uso de membranas y diversos tipos de tratamientos (químicos, ópticos, físicos, entre otros)- están reclamando mucha atención.

En todos los casos, salvo en el de la depuración (donde la eliminación de contaminantes tiene el objetivo de reducir la toxicidad y salubridad de las aguas), surge en todo momento el coste del agua (de oportunidad y el beneficio externo) ahorrada frente a las inversiones requeridas para aumentar la eficiencia energética.

### 1.3.2.3 Territorio para el Agua

El agua y el territorio son dos elementos estrechamente interrelacionados. Desde el punto de vista del ciclo del agua, el territorio constituye su soporte físico, y su adecuada gestión es fundamental para determinar la cantidad y calidad de agua disponible en una cuenca. Los usos del suelo y el modelo de organización territorial no sólo condicionan la demanda de agua, sino también su oferta. Principalmente porque la vegetación y el suelo reciben la mayor parte de las precipitaciones en una cuenca, y juegan un papel determinante en su distribución. Una fracción de estas precipitaciones, será recogida por la vegetación o por el suelo y directamente entrará a formar parte de lo que se conoce como reserva de agua edáfica o agua verde, y la otra fracción dará lugar a la generación de un flujo de agua superficial y/o subterráneo que alimenta los ríos, lagos y acuíferos (Falkenmark y Rockstrom, 2004). El tipo de vegetación y uso del territorio determinará la fracción de las precipitaciones que entra a formar parte de la reserva de agua del suelo y la que se convertirá en escorrentía y alimentará los ríos y acuíferos.

Las transformaciones territoriales tales como la urbanización, la deforestación, o la reforestación tienen importantes repercusiones en el funcionamiento hidrológico de las cuencas y en la disponibilidad de agua, porque modifican el ratio de producción de agua verde y azul (Falkenmark, 2003). En el contexto mediterráneo, los impactos asociados a estos cambios territoriales pueden ser especialmente importantes, dado que el agua verde representa la componente dominante del ciclo hidrológico, alcanzando entre el 60 y el 80% de las precipitaciones que recibe un territorio.

Existen numerosos estudios que han analizado las repercusiones que tienen los cambios de usos sobre las distintas componentes del ciclo del agua (Zhang et al., 2001; Pascual-Aguilar, 2002; Gordon et al., 2005; Rost et al., 2008; Schuol et al., 2008; Faramarzi et al., 2009). En el contexto de España, si bien el cambio climático es un factor importante de la reducción de caudales que viene observándose en diversas cuencas españolas a lo largo de las últimas décadas, numerosos estudios están demostrando que los cambios de uso de suelo pueden llegar a suponer un 25% de las reducciones de caudal observadas (Beguería et al., 2003; Gallart y Llorens, 2004; Willaarts et al., 2012). La mayoría de estos cambios territoriales se caracterizan por un abandono

progresivo de las partes altas de las cuencas (cabeceras) y un fuerte proceso de intensificación en los tramos bajos como resultado de la intensificación de la matriz territorial asociada con proceso de urbanización y producción agrícola intensiva (Martínez-Fernández et al., 2013; Pinto-Correia and Vos, 2004; Plieninger and Schaar, 2008; Poyatos and Llorens, 2003; Rescia et al., 2010). Los impactos sobre el ciclo del agua asociados a esas dinámicas territoriales se traducen en una reducción de la oferta de agua en los tramos de cabecera como resultado del aumento de la producción de biomasa, y en un aumento de la demanda en los tramos bajos donde se concentran la mayor parte de las actividades.

#### 1.3.2.4 Agua para el Territorio

El modelo de desarrollo y organización territorial también tiene un efecto directo sobre la demanda de agua, condicionando tanto su disponibilidad como su calidad. La Tabla 2 muestra la disponibilidad de recursos superficiales y subterráneos por demarcación hidrográfica, junto con las demandas de los principales sectores de actividad económica. Como se puede apreciar, en España no solo existe una gran asimetría respecto a la disponibilidad de recursos hídricos, sino que también son muy diferentes las demandas dependiendo de las regiones.

La agricultura es el sector que más agua consume en España, representando hasta el 80% de las demandas brutas. Únicamente en las demarcaciones más septentrionales, la demanda de este sector es inferior al 25%. En estas demarcaciones, el abastecimiento urbano y la industria representan los principales consumos. Los datos de la Tabla 2 muestran además como en muchas cuencas, y a pesar de que no se han considerado los recursos no convencionales (desalinización, trasvases, etc.), las demandas de agua son equivalentes o incluso superan a los recursos hídricos disponibles. Esta tendencia es especialmente visible en las demarcaciones del Este y Sur peninsular.



MAGRAMA

**Tabla 2. Disponibilidad de recursos hídricos propios y demandas brutas por sectores de actividad (hm<sup>3</sup>)**

Demarcación	Recursos disponibles (hm <sup>3</sup> )	Demandas (hm <sup>3</sup> )				
		Abasto	Agrario	Industrial	Otras (energía, recreo, golf)	Total
Guadalquivir	9.375	436	3.505	36	31	4.008
Cantábrico Oriental	4.656	243	3	108	1	354
Cantábrico Occidental	10.907	239	91	211	-	541
Duero	13.713	332	3.944	51	46	4.373
Ebro	10.076	358	7.680	147	9	8.194
Guadiana	4.756	178	1.995	44	-	2.217
Júcar	3.840	549	2.528	123	21	3.221
Miño Sil	11.812	114	294	94	666	1.168
Segura	817	190	1.582	11	3	1.785
Tajo	7.967	787	1.958	63	84	2.892
C.I Cataluña	2.613	629	365	134	8	1.136
Guadalete, Barbate	390	122	320	0	22	463
C. Mediterráneas Andaluzas	1.041	354	970	43	28	1.394
Tinto, Odiel y Piedras	336	56	149	46	2	253
<b>TOTAL</b>	<b>82.299</b>	<b>4.587</b>	<b>25.384</b>	<b>1.111</b>	<b>921</b>	<b>31.999</b>

Fuente: Planes Demarcación 2009-2015.

En lo que se refiere al sector agrícola, entre 1986 y 2009 la superficie agrícola en España se ha reducido en más de 3 millones de hectáreas. Sin embargo cuando se analiza la evolución por tipos de superficie, se ve que la mayor parte de esta reducción es debido a la disminución de las superficies de secano menos rentables. La superficie regada ha experimentado un crecimiento sostenido desde la entrada de España en la UE, y se calcula que en España hay en torno a 3,7 millones de ha regadas, equivalentes al 21,5% de la superficie agrícola total.

En términos hídricos, los regadíos en España se estima que emplean de promedio en torno a 25.400 hm<sup>3</sup> de agua anualmente: dos terceras partes procedentes de aguas superficiales y una tercera parte de aguas subterráneas (Corominas, 2011). A día de hoy el uso de recursos no convencionales como las aguas residuales regeneradas o las aguas desaladas sigue siendo marginal en la agricultura. El agua desalada sigue teniendo un coste muy elevado para la mayor parte de los regadíos, y el escaso empleo de aguas residuales se debe a la falta de tecnologías e infraestructuras para la distribución de estos recursos. La utilización de agua desalada para aliviar la presión sobre los recursos hídricos es viable únicamente en los regadíos más productivos, y por tanto no parece una solución extensible a todas las áreas regables.

En el transcurso de los últimos años se han venido realizando importantes inversiones para mejorar la eficiencia en el uso del agua en los regadíos. El Plan Nacional de Regadíos H-2008 prevé modernizar 1.135.000 hectáreas, lo que equivale al 30% de los regadíos que hay en la actualidad. El objetivo marcado es un ahorro neto de agua del orden del 22% de la que consumían inicialmente. El apoyo público y la iniciativa de los regantes han dado muy buenos resultados, acercándose las realizaciones a los objetivos programados en el Plan Nacional de Regadíos (Corominas, 2011). Las actuaciones de modernización de regadíos comportan en muchos casos la introducción de sistemas de riego más eficientes, con ventajas claras para el agricultor en los años de escasez de agua y que disminuyen, al estar automatizados, las necesidades de mano de obra. El ahorro de agua en parcela puede ser bastante elevado, pero no tanto a nivel de cuenca al disminuir notablemente los retornos por desagüe del exceso de agua que se aplicaba anteriormente (Corominas, 2011).

Hasta el momento las inversiones realizadas para aumentar la eficiencia en el uso del agua en el regadío parece que no han terminado de aliviar el estrés de los ríos y acuíferos en buena parte de España. De acuerdo con De Stefano et al. (2013) y Willaarts et al. (2014) el 53% de los acuíferos y el 55% de las masas de aguas superficiales en España están en mal estado y no cumplen con los objetivos de la Directiva Marco del Agua. Además existe una correlación entre las superficies regadas y el mal estado de ríos y acuíferos en España (Willaarts, 2015).

Además del consumo de agua, la agricultura y la ganadería intensiva son uno de los factores responsables del creciente problema de contaminación difusa en España. El uso excesivo de fertilizantes y la falta de gestión de los purines constituyen una fuente de contaminación por nitratos para las aguas (especialmente subterráneas) muy importante. De acuerdo con el Reglamento Técnico Sanitario Español el límite máximo de nitratos presentes en agua no debe

superar los 50 mg/l. Sin embargo, este límite se supera ampliamente en muchos acuíferos sobre los que se asientan actividades agrícolas. La especial preocupación por este problema radica en que muchos de estos acuíferos se destinan al abastecimiento urbano, y el agua suministrada supera muchas veces los límites legales de nitratos. La contaminación por nitratos además es preocupante porque: (1) muchos acuíferos están conectados a redes fluviales, y eso aumenta el riesgo de que los nitratos alcancen también a las aguas superficiales; (2) los tiempos de migración de los fertilizantes son lentos, lo que implica que las concentraciones detectadas en agua en este momento pertenecen a tasas de empleo de fertilizantes empleados hace años; (3) la naturaleza difusa de esta contaminación hace especialmente difícil su control, y (4) la recuperación de los acuíferos contaminados es lenta y sobre todo técnicamente muy compleja. Abordar este problema requiere un conjunto de medidas que incluyen desde programas de sensibilización y formación a los agricultores para reducir el empleo excesivo de agua y fertilizantes, y por tanto atajar el foco del problema, hasta la puesta en marcha de soluciones tecnológicas que contribuyan a depurar los nitratos y fosfatos a un coste accesible, así como estudiar posibles soluciones de bio-remediación *in situ*. En el ámbito urbano e industrial, el consumo efectivo de agua es bajo si se compara con sectores como la agricultura. Como muestra la Tabla 2, el 14% de la demanda total de agua en España se destina a satisfacer las demandas urbanas, y el 3% a la industria. En estos sectores, los principales problemas están relacionados con el impacto que genera sobre la calidad de agua. Al margen de que el consumo en estos sectores sea limitado en términos absolutos, sí plantea importantes retos desde el punto de vista territorial, especialmente en la zona del Mediterráneo, donde se concentra un porcentaje importante de la población y donde la demanda se dispara durante el periodo estival con la llegada del turismo.

Desde el punto de vista de la eficiencia en el uso del agua, el sector urbano tiene un amplio margen para mejorar. Las pérdidas en la red de distribución son considerables, debido a la antigüedad y al mal estado de la red. La renovación del sistema de distribución de agua urbana requiere unas inversiones muy grandes, y por tanto un reto mayúsculo teniendo en cuenta el actual contexto económico. A esta problemática se suma el reto de establecer tarifas de agua que sean equitativas pero que al mismo tiempo permitan cumplir con el principio de recuperación de costes recogido en la DMA.

### 1.3.2.5 Territorio para energía

La energía y el territorio son dos elementos también estrechamente interrelacionados. El territorio constituye el soporte físico de las actividades de generación energética, de forma que las distintas etapas de los ciclos de producción de las distintas formas de energía producen impactos sobre el territorio en términos de ocupación y también de degradación. Asimismo, el territorio puede verse como un productor de energía en sus diferentes formas lo que se materializa en los distintos potenciales de energías renovables -solar, eólica, geotérmica, hidráulica- y en los recursos de energías fósiles.

La generación energética hace uso del territorio no solo en la instalación de las plantas de generación energética sino también en las etapas aguas arriba correspondientes a la extracción, procesado y transporte del combustible y aguas abajo en las etapas de disposición final de los residuos generados tras el cierre de las instalaciones de generación.

Los datos publicados de uso del territorio de las distintas tecnologías no son tan abundantes como los relativos a otros impactos ambientales y los resultados son muy variables dependiendo de parámetros tecnológicos y regionales. Además, son varios los criterios utilizados para estimar este tipo de impactos. Abundando en la complejidad del tema, para poder comparar los requerimientos de tierra de varias tecnologías se deben tener en cuenta aspectos como el tipo de suelo ocupado, la calidad del suelo ocupado, la posibilidad de usos múltiples, y la duración y reversibilidad de la transformación.

No se han encontrado estudios para España que hayan realizado la cuantificación de los requerimientos de territorio asociados a distintas tecnologías energéticas.

En las tecnologías fósiles, el uso de la tierra está asociado a las etapas anteriores o posteriores a la etapa de generación y relacionados con actividades extractivas y de gestión de residuos (Sathaye et al., 2011). Los valores varían bastante dependiendo del tipo de minería (de superficie o subterránea) y de las infraestructuras. La energía nuclear ocupa menos territorio en su ciclo de vida que las tecnologías fósiles, 120 m<sup>2</sup>/GWh (Fthenakis y Kim, 2009), pero hay que tener en cuenta que es necesario prever la necesidad futura de emplazamientos para almacenar los residuos radiactivos de alta actividad (Gagnon et al., 2002).

Para la mayoría de las energías renovables, los mayores requerimientos de terreno se producen en las etapas de operación con la excepción de la bioenergía alimentada con cultivos energéticos que tiene unos requerimientos de terreno mucho mayores que el resto de tecnologías aunque muy variables dependiendo de las materias primas y las zonas climáticas. En el caso de que la bioenergía esté basada en el uso de residuos, los requerimientos de tierra se reducen sustancialmente.

La energía eólica tiene unos impactos muy importantes sobre la ocupación del territorio. Estimaciones del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para parques eólicos en Estados Unidos (Denholm et al., 2009), cifran la transformación del suelo entre 2.200 y 11.000 m<sup>2</sup>/GWh. En el caso de la fotovoltaica montada en tejados el uso del suelo es insignificante, mientras que en el caso de las plantas fotovoltaicas o termosolares los requerimientos pueden ser importantes. Viehban et al. (2004) estimaron valores de alrededor de 400 m<sup>2</sup>/GWh para plantas termosolares de concentración, mientras que estimaciones recientes del NREL (Ong et al., 2013) refieren valores de 432 m<sup>2</sup>/GWh para tecnologías fotovoltaicas y 460 m<sup>2</sup>/GWh para plantas termosolares de concentración.

Estudios recientes desarrollados (Macknick et al., 2013a y Milbrandt et al., 2014) han explorado soluciones factibles para minimizar los impactos sobre el territorio de una penetración a gran escala de las energías renovables como por ejemplo la instalación de paneles fotovoltaicos bajo los aerogeneradores en los parques eólicos, o el uso de suelos degradados o sin uso, como por ejemplo las medianas de las carreteras o los vertederos.

La energía geotérmica tiene muy baja ocupación del suelo ya que la mayor parte de los elementos son subterráneos. Sin embargo, sí se considera todo el campo geotérmico para el cálculo de la ocupación del suelo por el posible riego de subsidencia de los terrenos, los valores encontrados en la literatura están alrededor de 500 y 2.000 m<sup>2</sup>/GWh (Evans et al., 2009 considerando una vida de 35 años).

La ocupación del suelo de la energía hidroeléctrica varía mucho en función de las condiciones físicas y geomorfológicas del embalse (Gagnon et al., 2006, Evans et al., 2009) con valores que pueden variar entre 730 y 7.500 m<sup>2</sup>/GWh (considerando una vida útil de 100 años para las grandes presas).

Todos estos datos no incluyen los efectos secundarios asociados a la ocupación del suelo de determinados ciclos de combustible. Así por ejemplo, la minería de superficie de carbón y uranio contamina las aguas y altera el equilibrio natural de las tierras adyacentes; las emisiones de contaminantes atmosféricos producidas en la operación de las plantas de carbón causan la acidificación de terrenos en zonas que pueden estar muy alejadas del lugar donde se localiza la planta; y los accidentes producidos en las plantas nucleares ocasionan cambios radicales y permanentes en los terrenos afectados por la radiación que no están aquí considerados.

En cuanto a la extracción del gas no convencional, la ocupación del suelo constituye un factor importante de riesgo de impactos. Las instalaciones en superficie requieren una superficie de aproximadamente 3,6 hectáreas por plataforma durante el proceso de fractura hidráulica de gran volumen y la fase de terminación, que resulta significativo si se compara con las 1,9 hectáreas por plataforma necesarias en las perforaciones convencionales. Esta ocupación se considera que puede tener gran importancia para el desarrollo de la extracción de gas de esquistos en una superficie amplia y/o en regiones europeas densamente pobladas (AEA, 2012).

En el caso de los biocombustibles, es necesario además añadir un nuevo concepto a la relación energía y territorio, que es el cambio indirecto del uso de suelo (ILUC, del inglés *Indirect Land Use Change*). Este posible efecto podría ocurrir debido a la respuesta del mercado a los cambios en la oferta y demanda de cultivos. Incluso si el biocombustible se cultiva en tierras agrícolas existentes, al desplazar la producción de otros cultivos, algunos de éstos podrían dar lugar a

la reconversión de suelos en tierras agrícolas, y por tanto, a una pérdida del stock de carbono en el suelo y a un incremento de las emisiones de GEI. De esta forma, la demanda adicional de biocombustibles podría conducir indirectamente a cambios en la utilización del suelo, de donde procede el concepto de ILUC. Aunque son varias las metodologías existentes para el cálculo de este efecto, todas ellas cuentan con una gran incertidumbre por lo que todavía no hay valores consensuados sobre este impacto.

Según el modelo MIRAGE (Laborde et al., 2014), que es la base de los valores de ILUC propuestos para su inclusión en la legislación europea, los mayores cambios de uso están asociados a la demanda de biodiesel de girasol, soja y palma, mientras que los menores valores se asocian a la demanda de bioetanol de caña de azúcar

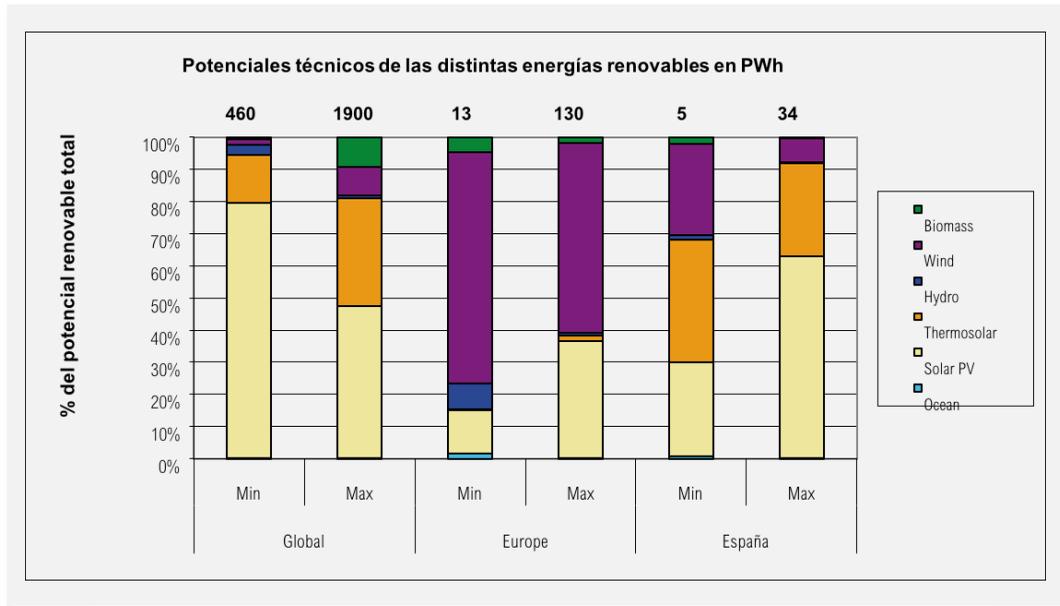
### 1.3.2.6 Energía para el territorio

El territorio puede verse como un productor de energía en sus diferentes formas, lo que se materializa en distintos potenciales de energías renovables -solar, eólica, geotérmica, hidráulica- y de energías fósiles.

El análisis de la distribución geográfica de estos potenciales renovables y reservas energéticas fósiles puede dar pistas sobre la vocación energética de cada parte del territorio y nos puede ayudar a diseñar las políticas energéticas de una forma más racional. En una Europa con un mercado eléctrico único es prioritaria la optimización local de las instalaciones renovables de generación de energía eléctrica. Esto implica explotar los potenciales regionales de generación de electricidad limpia al máximo a la vez que encontrar las mejores localizaciones para las instalaciones solares, los sistemas de bombeo para almacenamiento de hidroelectricidad y los parques eólicos; y, asimismo, significa prestar una especial atención a la expansión de las redes.

La Figura 3 muestra una representación gráfica agregada de los potenciales técnicos de las distintas fuentes de energías renovables tomada de Cabal et al. (2010). A escala europea, la energía eólica tiene un potencial técnico mucho más importante que el resto de las tecnologías, entre un 60% y un 70% del potencial total, seguida de la solar fotovoltaica. En total, a escala europea, el potencial de generación de electricidad renovable se situaría entre 13 y 130 PWh/año, valores que exceden entre 4 y 40 veces el consumo de electricidad en Europa en el año 2005. Si hablamos de los potenciales técnicos en España, los datos constatan un potencial muy importante que podría estar entre 5 y 34 PWh anuales que suponen entre 20 y 135 veces el consumo eléctrico en España en el año 2005. Las tecnologías con mayores potenciales en España son las tecnologías solares que sumarían entre un 70 y un 90% del potencial total en España, seguidas de la eólica.

Figura 3. Potenciales técnicos de las distintas energías renovables



Fuente: Cabal et al. (2010)

Pero además, el nexo de energía para el territorio se puede examinar teniendo en cuenta los distintos usos a los que se dedica el territorio y la energía que demanda cada uno de estos usos. De especial relevancia en el análisis del nexo AET en España es el estudio de los consumos energéticos de la agricultura que es la actividad que ocupa una mayor parte del territorio. Los consumos de energía del sector agrario en España suponen del orden del 3,5% del total de los consumos de energía final del país (IDAE, 2011b). La maquinaria agrícola (53%) junto con el gasto energético de riego (13%) supone cerca del 70 % del consumo energético del sector. De la energía final consumida por el sector en su conjunto el 81% corresponde a consumos de combustibles fósiles, principalmente gasóleo y fuelóleo y el 19% a consumos de electricidad.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2011b) se estima que el consumo de energía final de este sector se incremente en los próximos años aunque existe un potencial de ahorro importante por la modernización de flotas agrícolas y por el cambio de los sistemas de riego por aspersión a riego localizado. En el estudio sobre indicadores de sostenibilidad de la agricultura y ganadería española Garrido et al. (2012) concluyen que la agricultura española cada vez consume menos agua y energía, pierde menos suelo y emite menos gases a la atmósfera para producir una unidad de producto. El estudio concluye asimismo que las

ganancias en productividad han permitido avances importantes en la sostenibilidad general de la agricultura. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que los consumos energéticos asociados al gasto de combustible han aumentado a lo largo del tiempo, sin embargo este hecho se ve claramente compensado por el aumento de producción en los campos de cultivo. Además, cabe destacar que con los nuevos sistemas de laboreo y las variaciones en los itinerarios técnicos que se están implantando -siembra directa y mínimo laboreo-, estos consumos de combustible podrán reducirse considerablemente. En todo caso, estas reducciones todavía no se han visto compensadas, al menos en términos de producción vegetal evaluada en términos económicos. La evolución del coste total de energía del sector agrario sobre el valor de la producción vegetal, entre 1990 y 2013 muestra que este desacoplamiento económico todavía no se ha producido.

### 1.3.3. Conclusiones

En síntesis se puede concluir que en el contexto del nexo AET en España las relaciones más importantes se refieren al agua y su interacción con el sector energético y su aprovechamiento territorial. La persistente asimetría entre la oferta y la demanda hacen que el agua sea un recurso limitado en España y convierten su gestión en un verdadero desafío. Esta naturaleza limitada del recurso hídrico ha promovido la elaboración de numerosos estudios nacionales, regionales y locales con el objetivo de evaluar su estado y su interrelación con sectores tan dependientes como la agricultura, el sector hidroeléctrico y el abastecimiento urbano. Es por ello que las relaciones entre agua y energía y entre agua y territorio estén bien abordadas en la literatura y documentación disponible en España. Eso no implica, tal y como se han mencionado en las secciones anteriores, que existan déficits de información que deben ser abordados.

Las relaciones entre energía y territorio son quizás las menos documentadas en España, no habiéndose encontrado estudios que cuantifiquen la ocupación que las tecnologías energéticas hacen del territorio a nivel nacional. Ello, en gran medida, se debe a que no ha habido hasta la fecha una competencia o conflicto excesivo por estos recursos. Sin embargo, para poder cumplir los objetivos energéticos y climáticos, es necesaria una alta penetración de energías renovables en la matriz energética, lo que seguramente cambiará la situación. Además, España es un país energéticamente dependiente del exterior y esta circunstancia se percibe cada vez más como un riesgo elevado para la seguridad energética nacional, por lo que el uso de fuentes energéticas autóctonas cobra aún más importancia. En este sentido, el potencial del territorio para la producción de energía renovable, según constatan los estudios encontrados, es muy elevado y en su explotación racional deberá sustentarse la política energética futura.



Miguel Ángel Gómez

## ▪ 2 ▪

# Caso de Estudio I: Implicaciones ambientales ligadas a distintos escenarios de producción energética

## 2.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

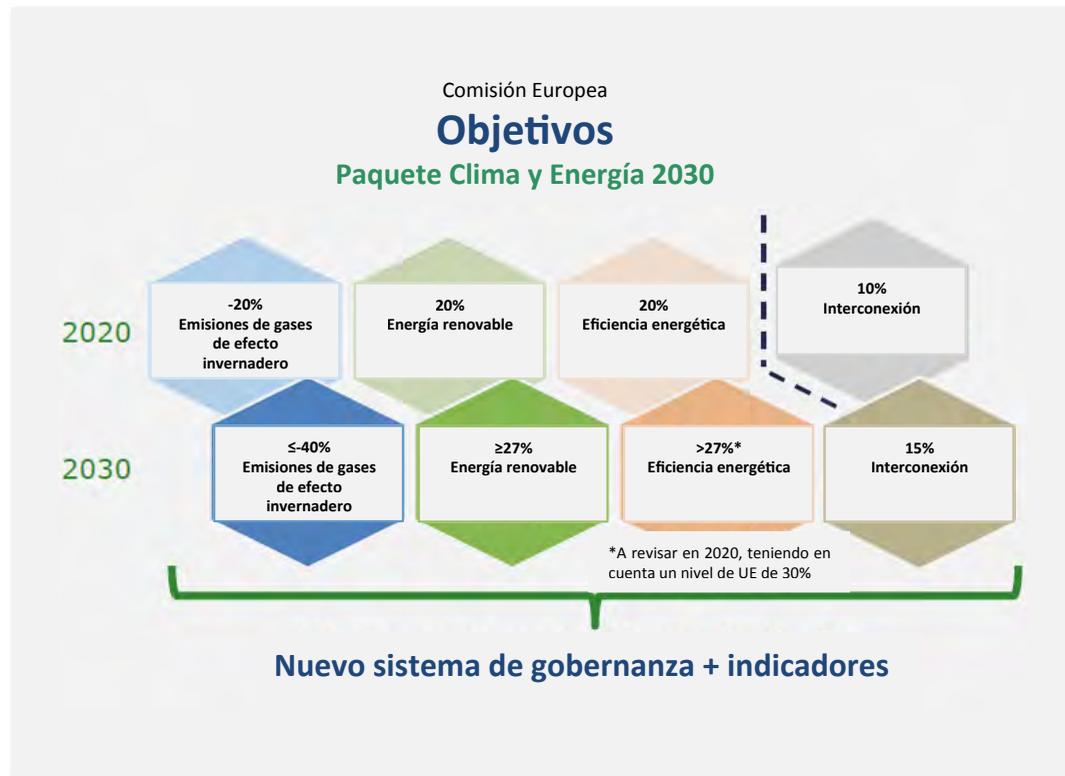
La Unión Europea estableció en el año 2009 el marco de acción sobre el Clima y la Energía 2020 (20% de energías renovables, 20% de reducción de las emisiones respecto a los niveles de 1990 y 20% de ahorro energético) que estará vigente hasta el año 2020. Asimismo, la Comisión Europea publicó una hoja de ruta hacia 2050, sobre la trayectoria para reducir entre el 80 y el 90% de emisiones en 2050 (EC, 2011). En Octubre de 2014, el Consejo Europeo estableció los objetivos del nuevo “paquete Clima y Energía 2030” que reemplazará al “paquete 2020” (Figura 4). Este nuevo marco en política energética pretende alcanzar un sistema energético más competitivo, seguro y sostenible.

Los objetivos que guiarán la política contra el calentamiento global de la Unión Europea (UE) incluidos en el paquete Clima y Energía 2030 son:

- 40% de reducción de emisiones de GEI (comparado con los niveles de 1990) - objetivo vinculante a nivel nacional aunque todavía no se han definido los objetivos nacionales.
- al menos el 27% de energías renovables en el consumo de energía final - objetivo a nivel europeo, no vinculante a nivel nacional

- mejora del 27% de eficiencia energética - objetivo a nivel europeo, no vinculante a nivel nacional
- al menos un 15% en interconexiones eléctricas - objetivo a nivel europeo, no vinculante a nivel nacional

Figura 4. Objetivos europeos de cambio climático y energía para 2030



Fuente: EC (2015)

Teniendo en cuenta los objetivos de la UE en materia energética, el objetivo de este caso de estudio es evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a dos escenarios energéticos definidos para España de cara al 2020 y 2030, teniendo en cuenta todas las etapas del ciclo de vida de cada tecnología. A continuación se presentan los datos y metodologías seguidas, así como los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de los mismos.

## 2.2 DATOS, ENFOQUE METODOLÓGICO Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Partiendo de los objetivos generales asumidos a nivel europeo, para el estudio del caso español se ha utilizado el modelo energético de optimización TIMES-Spain –de la familia de los modelos MARKAL-TIMES–, desarrollado por el CIEMAT en el marco del programa ETSAP (*Energy Technology System Analysis Programme*) de la Agencia Internacional de la Energía (<http://www.iea-etsap.org>).

El modelo TIMES-Spain optimiza la configuración de tecnologías y combustibles que cubra las necesidades energéticas especificadas para un periodo de tiempo futuro al menor coste posible. Para ello cuenta con una extensa base de datos económicos, técnicos y medioambientales de más de 1.000 tecnologías energéticas en los sectores residencial, comercial, transporte, industrial y de generación eléctrica. El modelo está calibrado con los balances energéticos del año 2005 disponibles en Eurostat y completados con otras fuentes de información energética nacionales descritas en Labriet et al. (2010). Para la evolución de las demandas de energía final de los distintos sectores en el periodo de modelización se tiene en cuenta la evolución de dos importantes parámetros a 2050, el PIB y la población. La evolución del PIB se ha estimado utilizando la salida de un modelo macroeconómico a nivel europeo, el GEM-E3<sup>9</sup>, cuya ejecución se realizó en el marco del proyecto europeo RES2020.<sup>10</sup> La evolución de la población sigue el ritmo de crecimiento previsto por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

Para la realización del análisis de los impactos sobre el nexo que tiene la generación energética en España se han definido los siguientes escenarios alternativos:

- **Escenario tendencial o BAU** (*Business as Usual*) que refleja la evolución del sistema energético siguiendo las políticas actuales y los compromisos ya adquiridos para el año 2020 en relación a la reducción de gases de efecto invernadero y penetración de energías renovables. En relación a la energía nuclear se ha considerado que la capacidad instalada se mantiene constante durante todo el horizonte de modelización (2035). Este escenario BAU sería equivalente al escenario de referencia para España de la Comisión Europea (EC, 2013).
- **Escenario TARGET2030**, más ambicioso, que tiene en cuenta los objetivos planteados para 2030 en el marco europeo. Los objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> considerados en 2020 y 2030 son del 21% y del 30%, respectivamente, sobre las emisiones de 2005. Por su parte, los objetivos de penetración de energías renovables sobre la energía final considerados en este escenario son del 20% (2020) y del 30% (2030). Además, se asume que habrá una capacidad de interconexión eléctrica del 10% en 2020 y del 15% en 2030.

9 <http://www.gem-e3.net>

10 <http://www.cres.gr/res2020/>

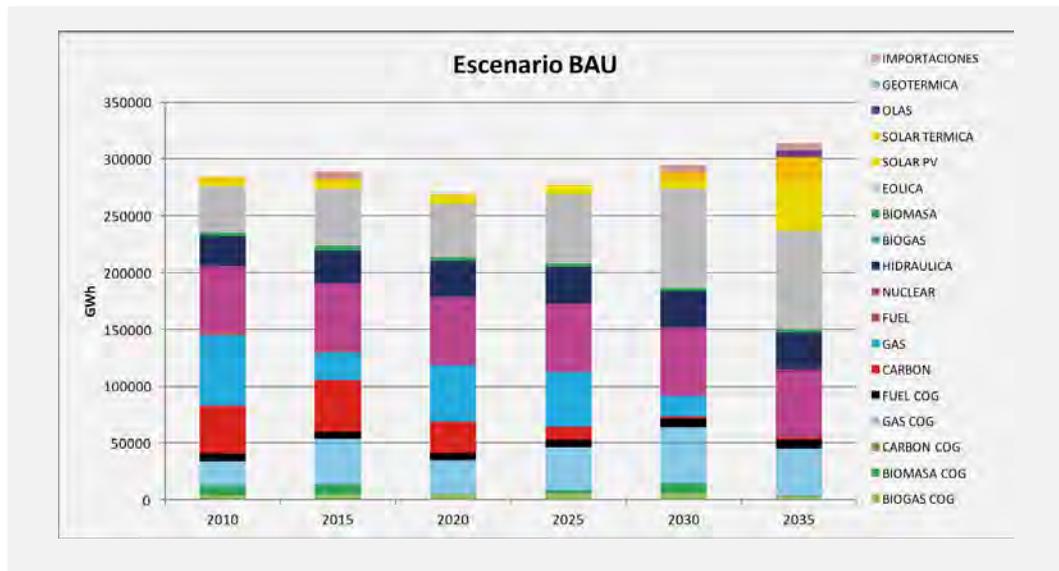
En cuanto a los objetivos de eficiencia energética se impone una reducción del consumo de energía primaria del 20% en 2020 y del 30% en 2030. Se considera asimismo que no se van a construir más centrales nucleares ni se va a extender la vida útil de las centrales que están actualmente en operación. De esta forma, alrededor de 2028 esta tecnología desaparece del portfolio de generación.

A continuación se muestra la contribución de las distintas tecnologías a la generación eléctrica en los dos escenarios considerados en este estudio.

### 2.2.1 Escenario tendencial o BAU

Como muestra la Figura 5, en el escenario BAU el mix de generación eléctrica va evolucionando progresivamente hacia un mix con una mayor participación de las energías renovables. Hasta 2025 se sigue manteniendo una contribución importante de las plantas de carbón que ya en 2030 apenas tiene un papel apreciable en el mix de generación.

Figura 5. Evolución de la producción de electricidad en España en el escenario BAU



Fuente: Elaboración propia

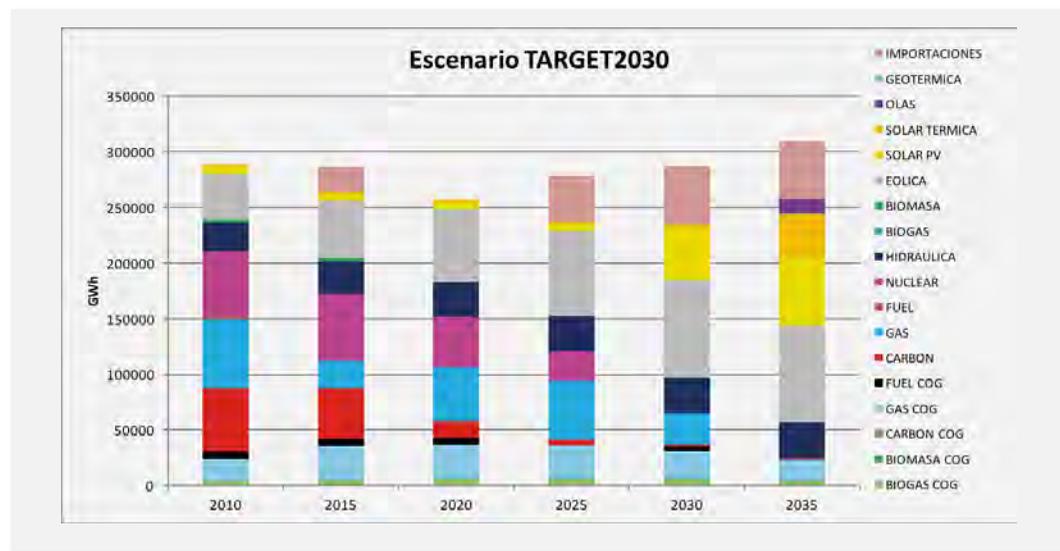
El gas natural tiene un papel importante en todo el periodo considerado, especialmente en el sector industrial (gas en cogeneración). En el sector eléctrico, según las estimaciones del modelo GEM-E3, el peso del gas natural disminuye de forma que en 2035 las plantas de gas natural no están participando en el mix de generación, siendo reemplazadas por plantas solares de concentración y por la instalación de energía solar fotovoltaica. Por consiguiente, la energía solar fotovoltaica y la energía solar de concentración aumentan su contribución de forma muy importante pasado el año 2030, llegando a suponer el 13% y el 8% en 2035, respectivamente.

Asimismo, la energía nuclear y la hidráulica mantienen constante su contribución hasta el final del periodo, representando en ese momento el 19% y 10%, respectivamente. Por último, la energía eólica va aumentando de forma sostenida su contribución, llegando a ser del 28% en 2035.

## 2.2.2 Escenario de objetivos a 2030 o TARGET2030

El escenario TARGET2030 muestra una participación mucho mayor de las energías renovables, especialmente a partir de 2025 (Figura 6) . Al final del periodo, estas energías suponen un 76% de la generación total. La energía nuclear desaparece completamente en 2028. En el corto plazo es sustituida por energía solar fotovoltaica y eólica. También, el carbón reduce su papel en la generación eléctrica desapareciendo prácticamente en 2025 y siendo sustituido por gas, eólica y solar fotovoltaica.

Figura 6. Evolución de la producción de electricidad en España en el escenario TARGET2030



Fuente: Elaboración propia

A partir de 2030 el mix se vuelve mayoritariamente renovable, quedando solamente el gas natural en el sector industrial en plantas de cogeneración. Las tecnologías solares, tanto fotovoltaica como solar de concentración, entran muy fuertemente en el año 2030 y 2035, año en el que aparece también la energía de las olas. La eólica sigue penetrando de forma sostenida durante todo el periodo.

En este escenario se estima que la capacidad de interconexión se utilizará plenamente para importar electricidad de Francia, aunque esto dependerá fundamentalmente de la evolución de los precios de la electricidad de importación.

## 2.3 IMPACTOS ASOCIADOS A LOS ESCENARIOS ENERGÉTICOS

Una vez definidos los escenarios, se ha realizado una revisión de la literatura para determinar las innovaciones tecnológicas más relevantes esperadas en algunas tecnologías en el horizonte del año 2035. Como se comenta en el apartado 1, muchas tecnologías energéticas, especialmente las renovables, se encuentran al comienzo de su curva de aprendizaje, y por tanto su potencial de mejora es muy grande y puede condicionar la evaluación de impactos ambientales. Las tecnologías para las que se ha estudiado esta evolución son:

- Energía eólica
- Energía solar fotovoltaica
- Energía solar térmica de concentración

En el caso de la energía eólica, se ha considerado, de acuerdo al documento recientemente publicado por KIC Innoenergy (KIC, 2014), que el factor de capacidad de las plantas se podría mejorar en un 4% para la capacidad instalada a partir de 2020 y en un 6% para la capacidad instalada desde 2025 hasta el final del periodo.

Las mejoras tecnológicas de la energía solar fotovoltaica, de acuerdo con la última "hoja de ruta" publicada por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2014), son más conservadoras, asumiendo un incremento de la eficiencia en los módulos de mc-Si hasta llegar a un 21% para los módulos instalados a partir de 2030. Además, se ha asumido una reducción en el consumo de silicio (Si) en la fabricación de los módulos al considerar para las nuevas instalaciones módulos fabricados con la tecnología *ribbon*. Esta tecnología de célula es similar a las de Si mono y multicristalino, pero la obtención de la oblea se realiza a partir de crecimiento en cinta, lo que elimina la pérdida de material de sílice durante el corte.

Por último, en el caso de la producción de electricidad a través de plantas solares térmicas de concentración, se ha considerado, siguiendo las estimaciones del reciente documento publicado por KIC Innoenergy (KIC, 2015), que, para las nuevas plantas instaladas a partir de 2030, se utilizará refrigeración en seco con un consumo de agua de 0,3 m<sup>3</sup>/MWh. Respecto de la mejora de la eficiencia y para tener en cuenta esta pérdida de eficiencia esperada por la refrigeración seca, se considera un aumento de la electricidad generada por MW instalado de solo el 15%, en vez del 20% esperado.

La evaluación de los impactos potenciales asociados a los distintos escenarios energéticos se ha realizado siguiendo la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Como se describe en el Anexo III, una de las principales etapas del ACV es la fase de Análisis del Inventario de Ciclo de Vida, en la que se deben recopilar todos los datos de entradas y salidas desde la naturaleza a cada sistema analizado y de éste a la naturaleza, considerando todas las etapas del ciclo de vida. Esta etapa requiere una profunda investigación dada la complejidad de las relaciones entre procesos y la cantidad de datos a recopilar. Es por ello que existen bases de datos especializadas en ACV que facilitan la realización de estos estudios.

En este estudio se ha utilizado la base de datos Ecoinvent v3<sup>11</sup> que contiene inventarios completos de ciclos de vida para más de 10.300 procesos, entre ellos de tecnologías de generación eléctrica, donde se proporcionan las entradas en forma de energía y materiales y las salidas como emisiones al aire, al agua y al suelo asociados a cada tecnología.

Para el cálculo de los impactos asociados a cada escenario, se han identificado los inventarios de las tecnologías más próximas a las consideradas en este análisis. Una vez identificadas, se han realizado las modificaciones oportunas para adaptar tanto la evolución tecnológica en cada período como las particularidades de España.

La Tabla 3 muestra, para cada tecnología los procesos de inventario escogidos y las modificaciones principales realizadas.

**Tabla 3. Procesos considerados de la base de datos Ecoinvent v3.1 para cada tecnología energética**

TECNOLOGÍA	FUENTE DE DATOS	COMENTARIOS
ELECTRICIDAD BIOGAS y COGENERACION DE BIOGAS	Heat and power co-generation, biogas, gas engine	El proceso de electricidad se ha modelado asignando todas las cargas a la electricidad producida
COGENERACION GAS NATURAL EXISTENTE	Heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn	Modificado el origen del gas natural y del agua de refrigeración para adecuarlo al caso español
COGENERACION GAS NATURAL NUEVA	Heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical	Modificado el origen del gas natural y del agua de refrigeración para adecuarlo al caso español
COGENERACION BIOMASA	Heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014	Modificado el origen del agua de refrigeración para que su origen sea España
ELECTRICIDAD CARBON	Electricity production, hard coal	Modificado el origen del agua de refrigeración para que su origen sea España
ELECTRICIDAD LIGNITO	Electricity production, lignite	Modificado el origen del agua de refrigeración y de minería para que su origen sea España
SOLAR TERMICA CILINDROPARABÓLICA 7 H ALMACENAMIENTO	De la Rúa, 2009 y Lechón et al., 2008	Modificados para ajustar desarrollo tecnológico
SOLAR TERMICA TORRE 15 H ALMACENAMIENTO	De la Rúa, 2009 y Lechón et al., 2008	Modificados para ajustar desarrollo tecnológico y planta sin hibridación.
ELECTRICIDAD GAS NATURAL	Electricity production, natural gas, combined cycle power plant	Modificado el origen del agua de refrigeración para que su origen sea España
MINI HIDRAULICA	Electricity production, hydro, run-of-river	
GRAN HIDRAULICA	Electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region	
NUCLEAR	Electricity production, nuclear, pressure water reactor	Modificado el origen del agua de refrigeración para que su origen sea España
OLAS	Datos proyecto NEEDS ( <a href="http://www.needs-project.org/">http://www.needs-project.org/</a> )	
FOTOVOLTAICA EXISTENTE	12% Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted y 88% Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si	12% instalaciones sobre tejado y 88% plantas
FOTOVOLTAICA NUEVA TEJADOS	Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, ribbon-Si, panel, mounted	Modificados para ajustar desarrollo tecnológico
FOTOVOLTAICA NUEVA PLANTA	Electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation, multi-Si	Modificados para ajustar desarrollo tecnológico
EOLICA EXISTENTE	Electricity production, wind, <1MW turbine, onshore	
EOLICA NUEVA	Electricity production, wind, <1MW turbine, onshore	Modificados para ajustar desarrollo tecnológico
IMPORTACIONES DE ELECTRICIDAD	Electricity, high voltage, production mix FR	Modificado para ajustar la evolución del mix de generación francés en el horizonte de modelización.

Se han seleccionado los ocho indicadores de impacto que figuran en la Tabla 4, que se han elegido atendiendo a su relación con los componentes del nexa AET. Las metodologías de evaluación de cada impacto son las recomendadas por la Comisión Europea en su Guía para los practicantes de ACV sobre los métodos recomendados para evaluar las categorías de impacto (EC, 2011).

La Tabla 4, por su parte, muestra las categorías, indicadores y la metodología utilizada para la evaluación de cada impacto.

**Tabla 4. Categorías de impacto consideradas**

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Método de impacto recomendado</b>	<b>Indicador</b>
<b>Cambio Climático</b>	<b>Modelo de referencia de 100 años del IPCC</b>	<b>Forzamiento radiativo como potencial de calentamiento global (GWP 100)</b>
<b>Acidificación</b>	<b>Exceso acumulado (Seppala et al., 2006, Posch et al., 2008)</b>	<b>Exceso acumulado</b>
<b>Eutrofización terrestre</b>	<b>Exceso acumulado (Seppala et al., 2006, Posch et al., 2008)</b>	<b>Exceso acumulado</b>
<b>Eutrofización agua dulce</b>	<b>Modelo EUTREND (Strujs et al., 2009) como en ReCiPe</b>	<b>Fracción de nutrientes que alcanzan el agua dulce o/y marina</b>
<b>Ecotoxicidad agua dulce</b>	<b>Modelo USEtox (Rosenbaum et al., 2008)</b>	<b>Unidad de comparación tóxica para ecosistemas (CTUe)</b>
<b>Uso del suelo</b>	<b>Modelo basado en la materia orgánica del suelo (Mila I Canals et al., 2007)</b>	<b>Materia orgánica del suelo</b>
<b>Uso del agua</b>	<b>Modelo para consumo de agua según Swiss Ecoscarcity (Frischknecht et al., 2008)</b>	<b>Uso del agua en relación con la escasez de agua local</b>
<b>Uso de recursos naturales (excepto agua y suelos)</b>	<b>CML 2002 (Guinée et al., 2002)</b>	<b>Escasez</b>

Fuente: EC (2011)

## 2.3.1 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida de las tecnologías energéticas

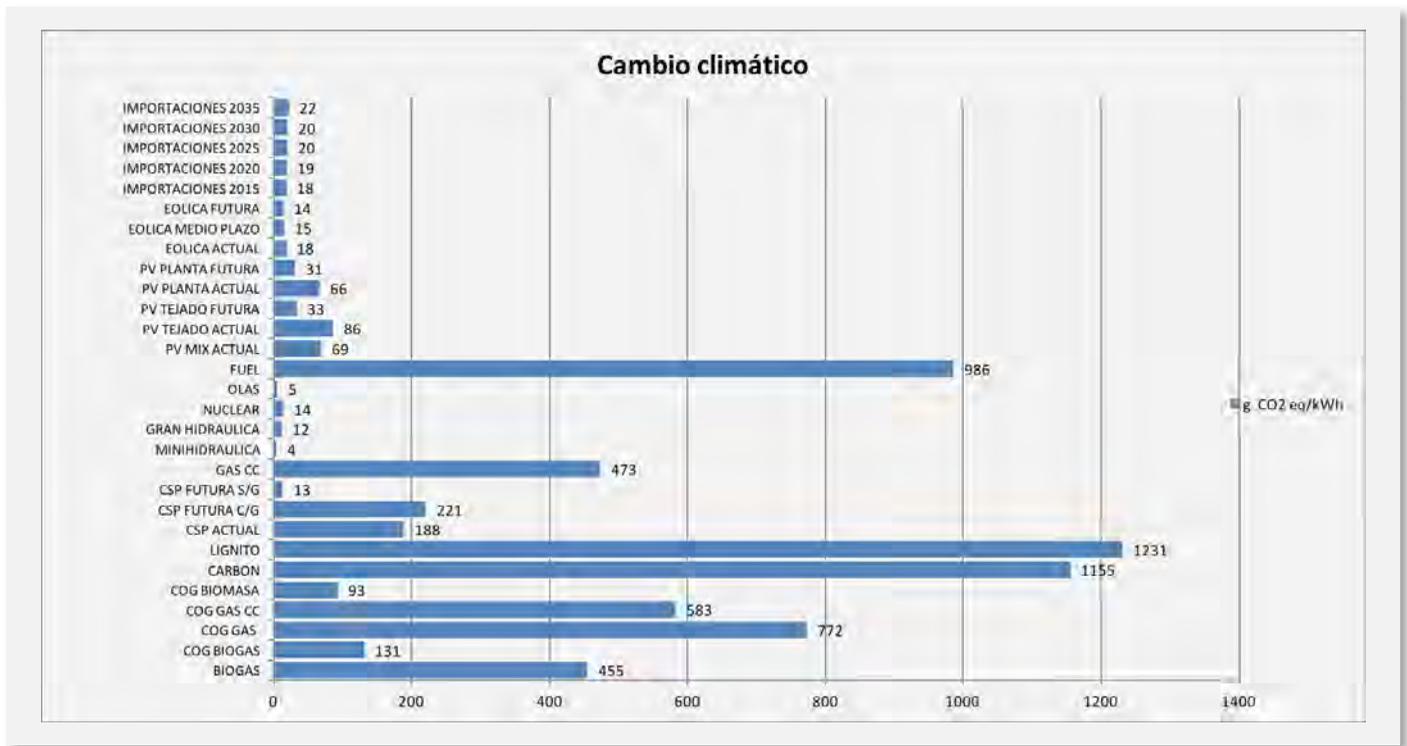
El Análisis de Inventario de estas tecnologías y la evaluación de impacto ambiental se han realizado utilizando el software SIMAPRO (<http://www.pre-sustainability.com/simapro>).

Previo al análisis de cada escenario, se han considerado las tecnologías individualmente, calculándose cada uno de los impactos descritos por kWh de electricidad generada. En los apartados siguientes se detallan, para las tecnologías consideradas, los resultados de cada impacto por kWh de electricidad.

### 2.3.1.1 Impactos sobre el cambio climático

En la Figura 7 se muestra el impacto sobre el cambio climático asociado a cada una de las tecnologías eléctricas consideradas en los escenarios analizados. El impacto se mide en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes asociadas a la producción de electricidad (CO<sub>2</sub> eq/kWh). Como se puede observar, las tecnologías fósiles tradicionales como el lignito, el carbón, el fuel, el gas natural y, en menor medida, el biogás, tienen emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producción eléctrica muy altas. Las emisiones de gases de efecto invernadero del biogás provienen de las emisiones de metano en el ciclo de producción. La energía fotovoltaica tiene unas emisiones de gases de efecto invernadero de 69 g CO<sub>2</sub>eq/kWh en la actualidad. Se espera que estas emisiones se reduzcan en el futuro, a medida que aumente la eficiencia de la tecnología y se optimicen los procesos de producción de los componentes, hasta valores de unos 31 a 33 g CO<sub>2</sub>eqiv/kWh. La energía eólica emite alrededor de 18 g CO<sub>2</sub>eqiv/kWh y se espera que reduzca sus emisiones hasta valores de unos 14 g CO<sub>2</sub>/kWh en el futuro. La energía solar térmica de concentración emite alrededor de 188 g CO<sub>2</sub>equiv/kWh generado en las plantas actuales que tienen una cierta hibridación con gas natural. De cara a las plantas que se instalen en el futuro, si se mantiene la hibridación, las emisiones serían de alrededor de 221 g CO<sub>2</sub>equiv/kWh, mientras que si son plantas solo solares las emisiones se reducen a 13 g CO<sub>2</sub>equiv/kWh. La energía minihidráulica es la tecnología que menos emisiones produce, seguida de la energía de las olas y la gran hidráulica. La energía nuclear tiene asimismo emisiones muy reducidas, del orden de 14 g CO<sub>2</sub> equiv/kWh.

Figura 7. Impacto sobre el cambio climático de cada una de las tecnologías eléctricas.



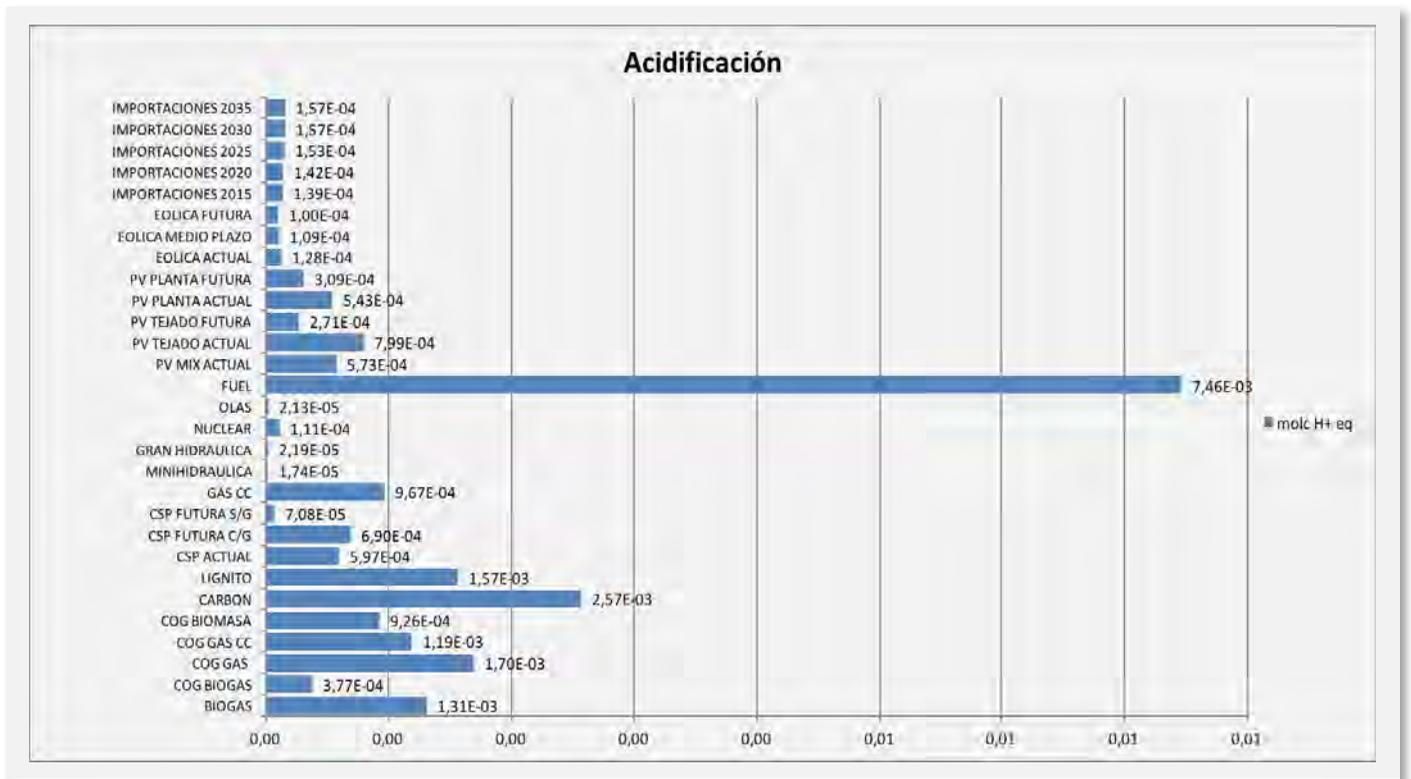
Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

La electricidad que se importa de Francia arrastra también emisiones de gases de efecto invernadero, que se van incrementando a medida que el mix francés acomoda una mayor proporción de electricidad eólica y fotovoltaica.

### 2.3.1.2 Impactos sobre la acidificación

La acidificación es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y nitrógeno, fundamentalmente. Tras reaccionar con el vapor de agua del aire estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que se depositan sobre la superficie terrestre. En la Figura 8 se muestran los resultados de los impactos potenciales sobre la acidificación de las distintas tecnologías de generación eléctrica investigadas. Las unidades de este impacto se expresan en moles de H<sup>+</sup>. Los mayores impactos son los producidos por la generación con fuel seguido del carbón y el lignito y la generación con gas natural.

Figura 8. Impacto sobre acidificación de cada una de las tecnologías eléctricas



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia

De las energías renovables, la energía solar fotovoltaica tiene emisiones elevadas vinculadas a los procesos de fabricación de los paneles, que se ven reducidas a medida que aumenta la eficiencia de la tecnología. La solar térmica de concentración tiene también emisiones elevadas debidas al uso del gas natural. El resto de las energías renovables, así como la energía nuclear tienen emisiones acidificantes más reducidas.

La electricidad importada desde Francia arrastra emisiones acidificantes que se van incrementando a medida que el sistema francés produce más electricidad fotovoltaica.

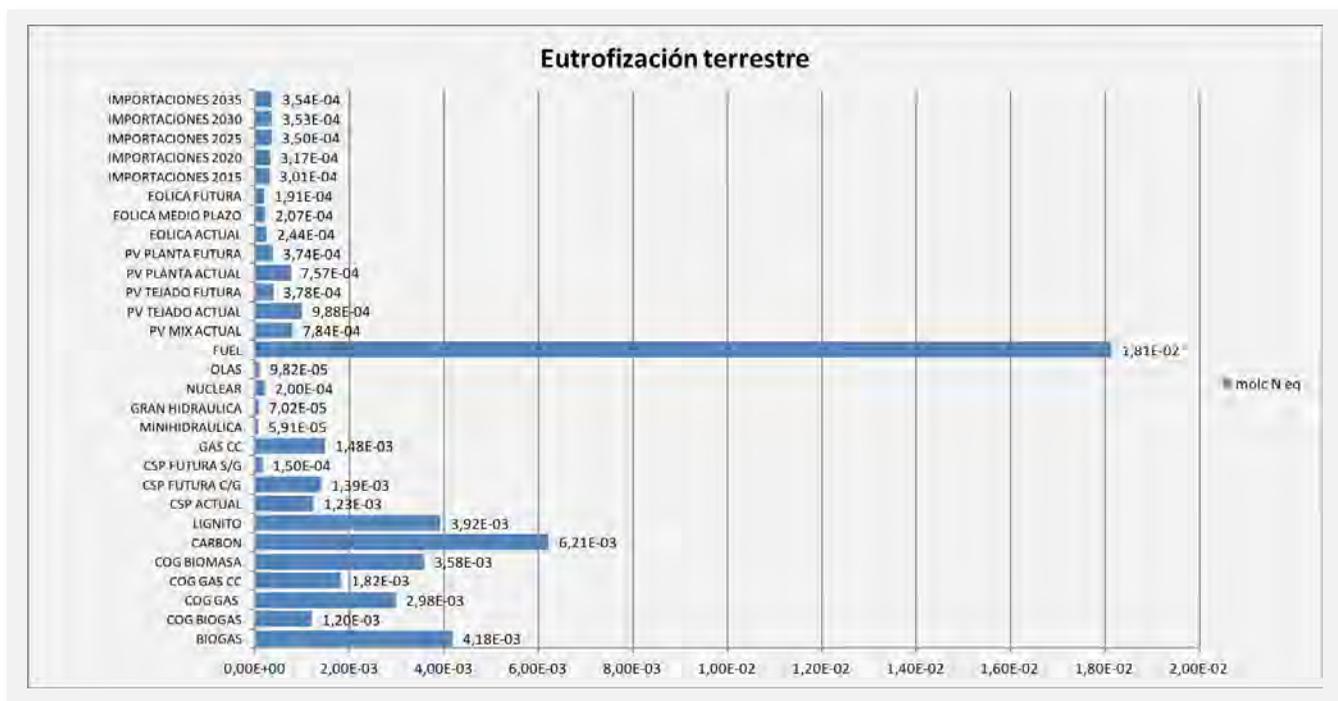


### 2.3.1.3 Impactos sobre la eutrofización terrestre

En la Figura 9 se muestran los impactos sobre la eutrofización terrestre de las tecnologías de generación eléctrica investigadas. Estos impactos están ligados fundamentalmente a las emisiones de compuestos nitrogenados, expresados en moles de nitrógeno (N) equivalentes. Los mayores impactos son, también, en este caso, los producidos por la generación con fuel seguidos del carbón y el lignito y la generación con gas natural. También la electricidad producida por biogás produce impactos significativos sobre la eutrofización terrestre vinculados a las emisiones de amoníaco del ciclo.

Las tecnologías solares de concentración que usan gas natural tienen también impactos sobre eutrofización, que se ven muy reducidos cuando las plantas son solo solares. La electricidad fotovoltaica tiene emisiones eutrofizantes vinculadas a los procesos de producción de los paneles. El resto de las energías renovables y la energía nuclear tienen emisiones eutrofizantes más reducidas. Los impactos sobre eutrofización terrestre de la electricidad importada desde Francia se van incrementando a medida que el sistema francés produce más electricidad fotovoltaica.

Figura 9. Impacto sobre eutrofización terrestre de cada una de las tecnologías eléctricas



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1.4 Impactos sobre la eutrofización de las masas de agua dulce

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos en relación a los impactos sobre eutrofización de las masas de agua dulce. Estos impactos están ligados a la acumulación de nutrientes en las aguas con el consiguiente crecimiento masivo de algas y la disminución de la concentración de oxígeno. Estos impactos se miden en kg de P equivalentes. Destacan de forma significativa los impactos del lignito, que están vinculados a los procesos de minería, y los del carbón también debidos a la minería. El resto de las tecnologías producen impactos mucho más reducidos.

Figura 10. Impacto sobre eutrofización del agua dulce de cada una de las tecnologías eléctricas

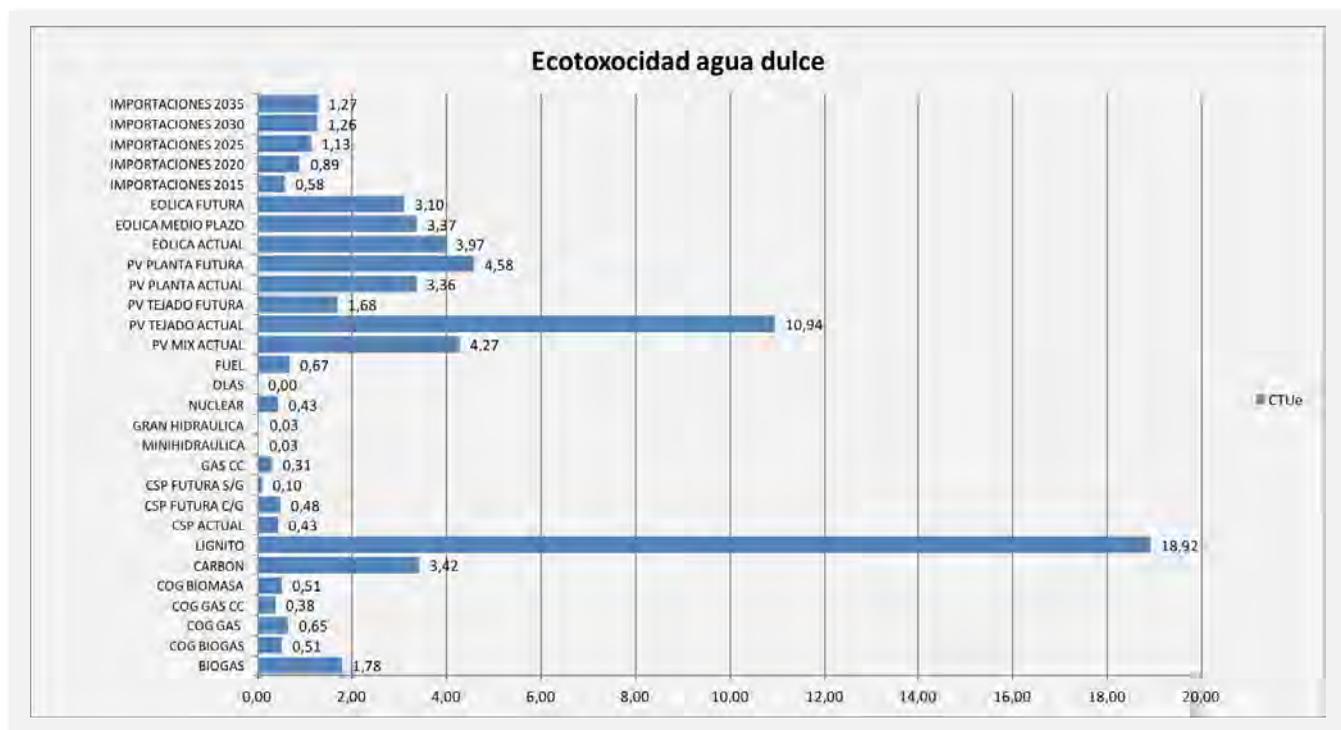


Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1.5 Impactos sobre la ecotoxicidad en las masas de agua dulce

Los impactos sobre ecotoxicidad acuática están vinculados a las emisiones de metales a las masas de agua que producen efectos tóxicos sobre las especies acuáticas (Figura 11). La ecotoxicidad se mide en unidades comparativas tóxicas CTU (del inglés *comparative toxic units*) y es una estimación de la parte de especies potencialmente afectadas por unidad de masa de la sustancia emitida. Los resultados obtenidos muestran impactos muy relevantes del lignito que están ligadas a las emisiones de metales pesados de los procesos de la minería. Asimismo, la tecnología fotovoltaica tiene importantes emisiones, que están asociadas a la incineración de los residuos de cobre de los paneles en su fin de vida.

Figura 11. Impacto sobre ecotoxicidad del agua dulce de cada una de las tecnologías eléctricas



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.

Fuente: Elaboración propia.

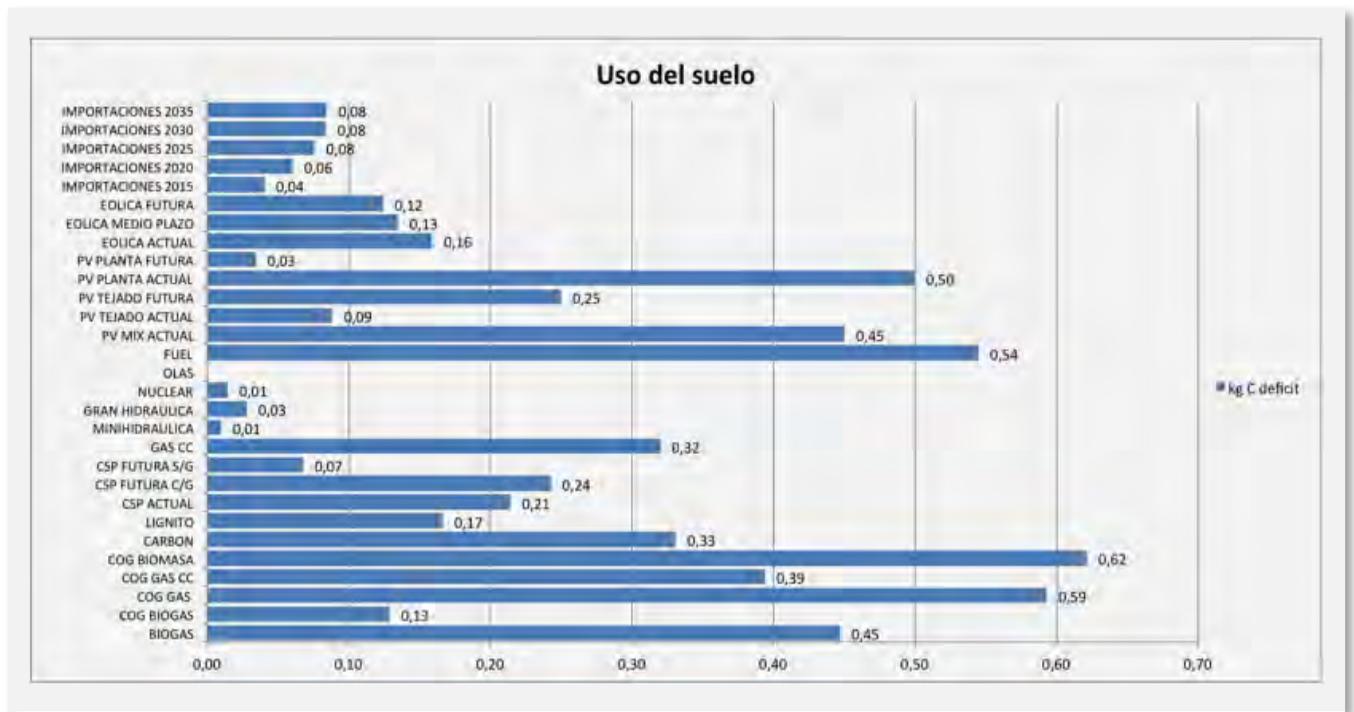
### 2.3.1.6 Impactos sobre el uso del suelo

Los impactos que tienen las tecnologías energéticas sobre los usos del suelo se resumen en la Figura 12. Este impacto se mide en términos de kg de carbono (C) liberado de la vegetación y el suelo como resultado de la conversión de una zona de vegetación natural para la producción de electricidad. Los impactos asociados a las tecnologías de biomasa y biogás son debidos al cambio de uso del suelo y a la liberación de C asociada a este cambio, en las zonas dedicadas a cultivos forestales. En el caso de la minería del carbón y lignito, se ha considerado que sólo una parte de la ocupación de la mina se restaura posteriormente. El impacto asociado a las tecnologías de gas y derivados del petróleo ocurre principalmente en los campos de extracción.

En el caso de la hidráulica, se ha considerado solo la ocupación del suelo inundado pero no los impactos del cambio de uso del suelo producido en términos de liberación de C. Este hecho y la gran vida útil de las presas hace que los impactos sobre el uso del suelo sean muy reducidos.

La ocupación del suelo de la fotovoltaica está vinculada a la ocupación del suelo por los paneles pero también a los cambios de uso del suelo producidos en la minería del silicio. En cuanto a la electricidad solar de concentración, el impacto sobre el suelo es moderado y vinculado a la ocupación del suelo por el campo solar y también a la extracción del gas en las tecnologías híbridas. La eólica tiene también impactos moderados sobre el uso del suelo que se van reduciendo a medida que aumenta la eficiencia de estas tecnologías.

**Figura 12. Impacto sobre uso del suelo de cada una de las tecnologías eléctricas (expresado en Kg C liberados)**



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1.7 Impactos sobre el consumo de agua

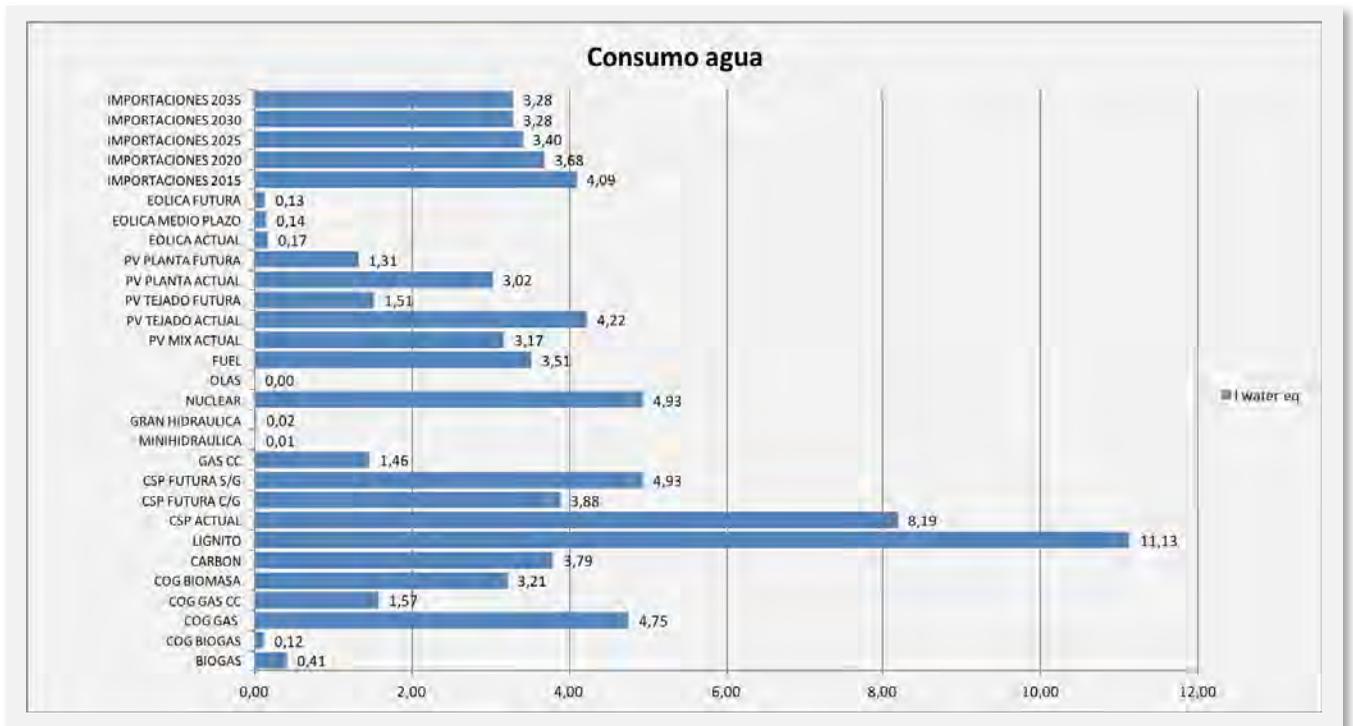
La Figura 13 muestra el consumo de agua de las distintas tecnologías a lo largo de su ciclo de vida. En el método utilizado, el consumo de agua en cada región se pondera en función de la disponibilidad de agua en cada zona, de ahí que los impactos se expresen en términos de litros equivalentes.

Tal y como recomienda la Comisión Europea, se ha utilizado el modelo para consumo de agua según Swiss Ecoscarcity. En este modelo se define la escasez de agua en base al índice de estrés hídrico de la OECD: porcentaje de extracción de agua frente a la cantidad de agua disponible (precipitación + entradas – evaporación). Teniendo en cuenta distintos países y regiones del mundo, se calcula un factor de caracterización que pondera el consumo de agua en función del índice de estrés hídrico de la zona.

La tecnología cuyo impacto sobre el consumo de agua es más importante es el lignito debido a los consumos de agua en la minería y al hecho de que esta minería se desarrolla en España que tiene un factor de caracterización bastante alto. La minería del carbón consume también grandes cantidades de agua pero en zonas con menor estrés hídrico.

En el caso de la solar de concentración actual, los consumos de agua son elevados debido a que las plantas existentes son de refrigeración húmeda y a que el agua utilizada tiene un factor de ponderación alto. Las tecnologías futuras son de refrigeración seca y por tanto tienen menores impactos sobre el uso del agua. Sin embargo, una planta de 15 horas tiene un consumo de agua mayor asociado a un mayor campo solar. La tecnología nuclear tiene importantes consumos de agua debidos fundamentalmente a la refrigeración de las centrales.

**Figura 13. Impacto sobre consumo de agua de cada una de las tecnologías eléctricas**



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1.8 Impactos sobre el consumo de recursos naturales

Finalmente se muestran los impactos sobre el consumo de recursos naturales expresados en kg de estroncio equivalentes (Figura 14). En este cálculo no están considerados ni el agua ni el suelo. Destacan los impactos producidos por la solar fotovoltaica debido al consumo de plata y zinc en la fabricación de los paneles, seguida de la eólica cuyo impacto está asociado a la fabricación de los aerogeneradores y la energía nuclear.

Figura 14 Impacto sobre uso de recursos de cada una de las tecnologías eléctricas



Nota: PV: solar fotovoltaica; CC: ciclo combinado; CSP: solar térmica de concentración; COG: cogeneración.  
Fuente: Elaboración propia.

Las tecnologías cuyo combustible es fósil generan mayores impactos en casi todas las categorías, siendo las diferencias con respecto a otras tecnologías muy significativas en impactos como cambio climático, acidificación y eutrofización tanto terrestre como de agua dulce. En otras categorías, la magnitud de estas diferencias con respecto a otras tecnologías renovables no es tan relevante. La tecnología fotovoltaica, por ejemplo, genera un impacto similar al carbón en cuanto a ecotoxicidad de agua dulce, debido a la incineración de los residuos de cobre en su fin de vida. Asimismo, esta tecnología produce el mayor consumo de recursos expresados en kg de estroncio equivalentes, debido al consumo de materiales escasos como la plata y el zinc. En las categorías de uso del suelo y consumo de agua existe una mayor similitud entre los resultados de las tecnologías.

### 2.3.2 Resultados del análisis del ciclo de vida de los escenarios energéticos

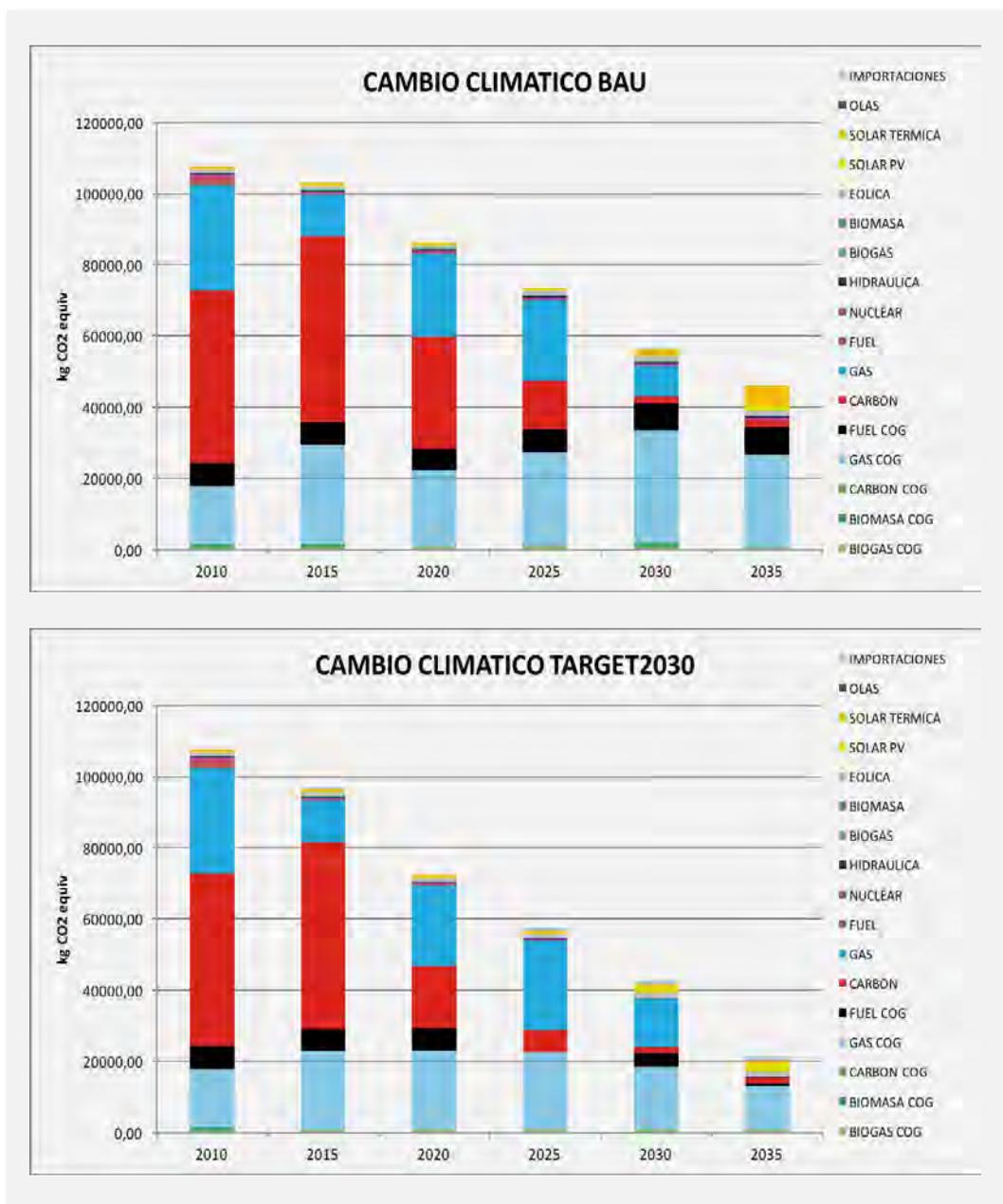
A partir de los inventarios de cada tecnología, modificados para adaptarlos a la situación española, y teniendo en cuenta la contribución de cada una en cada periodo, se han calculado los impactos ambientales potenciales asociados a la producción total de electricidad para cada periodo y escenario.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las distintas categorías de los dos escenarios analizados en este estudio (BAU y TARGET2030). Las figuras muestran los impactos asociados a la producción total de electricidad y la contribución de cada tecnología al impacto, mientras que las tablas describen los impactos por kWh de electricidad generada.

#### 2.3.2.1 Impactos sobre el cambio climático

En ambos escenarios hay un claro descenso de las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque éste es mucho mayor en el escenario TARGET 2030, como cabía esperar, y se refleja en la Figura 15. En este escenario la producción de electricidad con carbón y fuel es mucho menor que en el escenario tendencial, mientras que la participación de la energía eólica, fotovoltaica y solar térmica son superiores. La reducción de este impacto en el año 2035 con respecto a 2010 es del 61,2% en el escenario BAU y de 82,8% en el escenario TARGET2030.

Figura 15. Impactos sobre cambio climático de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia



En la Tabla 5 se resumen las emisiones por kWh que se generan en cada uno de los escenarios considerados correspondientes al horizonte a 2035.

**Tabla 5. Emisiones de gases de efecto invernadero por kWh generado en los escenarios analizados**

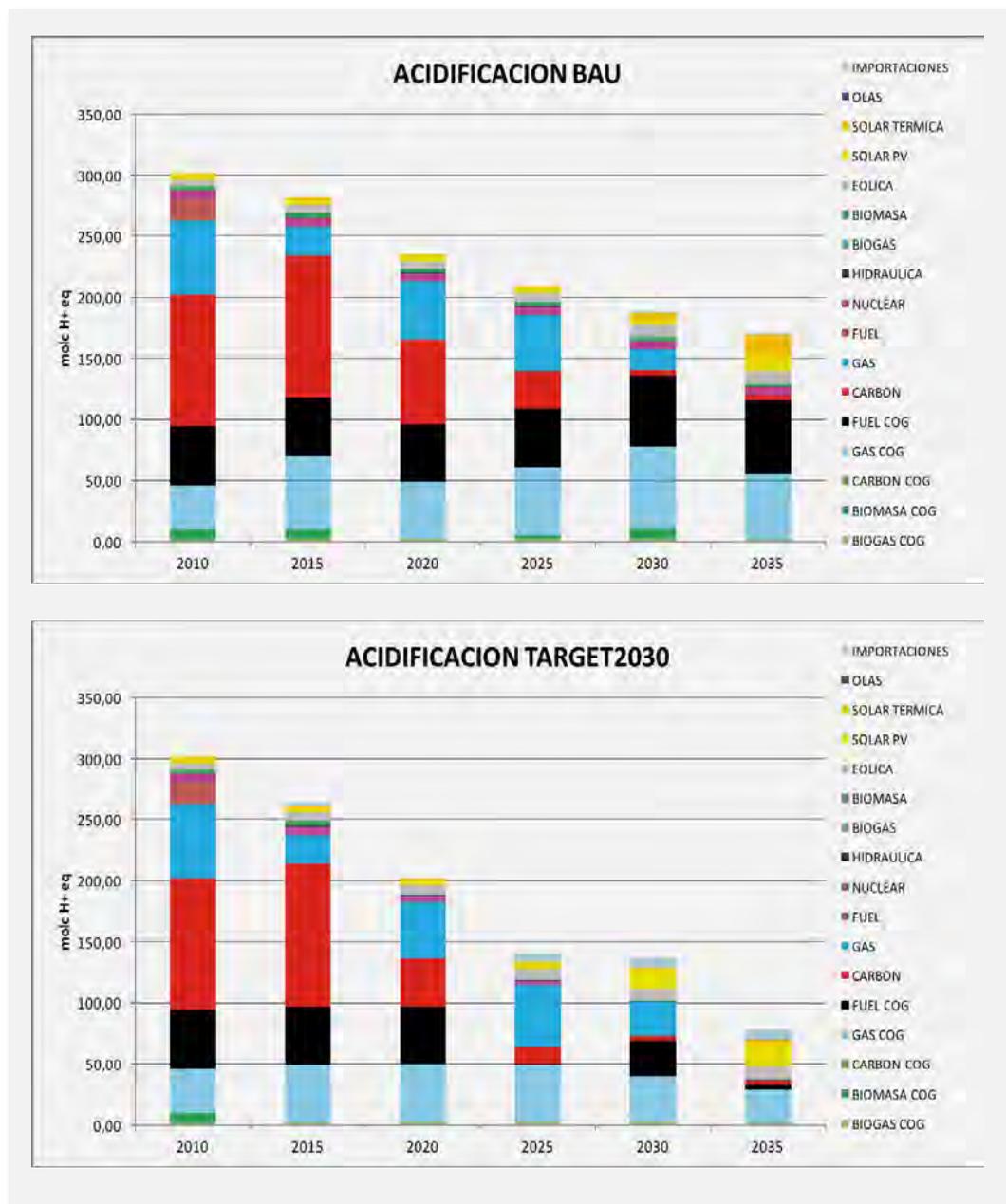
kg CO <sub>2</sub> equiv/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	<b>0,379</b>	<b>0,358</b>	<b>0,324</b>	<b>0,265</b>	<b>0,193</b>	<b>0,147</b>
<b>TARGET2030</b>	<b>0,379</b>	<b>0,338</b>	<b>0,282</b>	<b>0,207</b>	<b>0,148</b>	<b>0,069</b>

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.2 Impactos sobre la acidificación

El impacto sobre acidificación también disminuye en ambos escenarios, siendo la reducción del 48,6% en el escenario BAU y del 76% en el escenario TARGET2030 (Figura 16). La mayor contribución del fuel y el carbón en el escenario BAU ralentiza la disminución de este escenario, a pesar de la entrada de tecnologías más limpias.

Figura 16. Impactos sobre acidificación de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6 resume los impactos relacionados con la acidificación por kWh para los escenarios energéticos considerados.

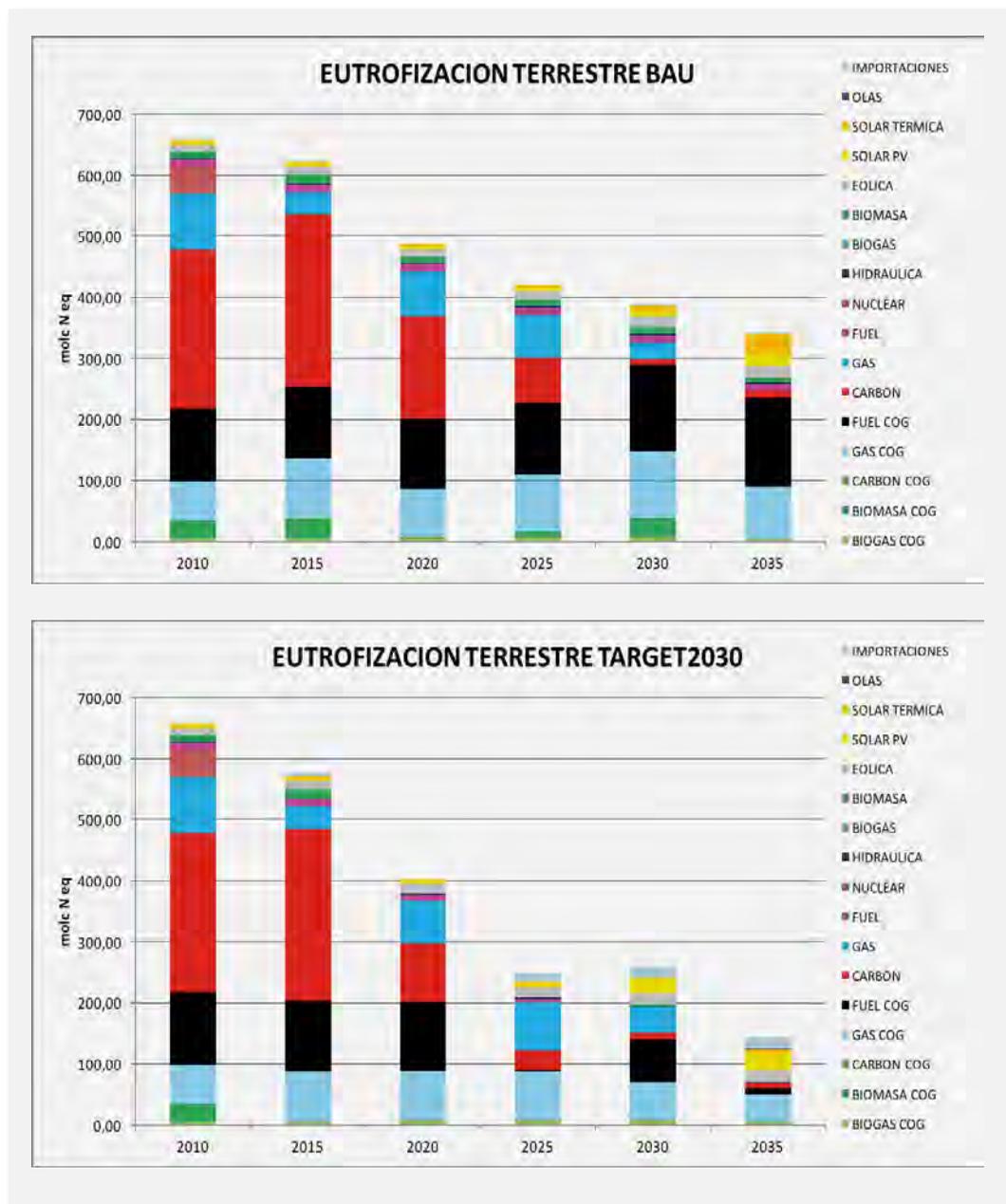
**Tabla 6. Impactos sobre acidificación por kWh generado en los escenarios analizados**

molc H <sup>+</sup> eq/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
BAU	1,06 E-03	9,79 E-04	8,78 E-04	7,55 E-04	6,40 E-04	5,45 E-04
TARGET2030	1,06 E-03	9,22 E-04	7,86 E-04	5,03 E-04	4,78 E-04	2,53 E-04

### 2.3.2.3 Impactos sobre la eutrofización terrestre

Los impactos sobre eutrofización terrestre disminuyen a lo largo del tiempo en ambos escenarios, 52,8% en el escenario BAU y 80% en el escenario TARGET2030 (Figura 17). En los dos casos, el carbón es la tecnología con mayor contribución a este impacto seguido del fuel y del gas. Aunque la contribución del fuel en la generación de electricidad no es tan grande como la del carbón, los impactos sobre eutrofización terrestre de esta tecnología por kWh son muy altos, como se mostró anteriormente en la Figura 9.

Figura 17. Impactos sobre eutrofización terrestre de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

Los impactos asociados a la eutrofización por kWh generado en los distintos escenarios se resumen en la Tabla 7.

**Tabla 7. Impactos sobre eutrofización terrestre por kWh generado en los escenarios analizados**

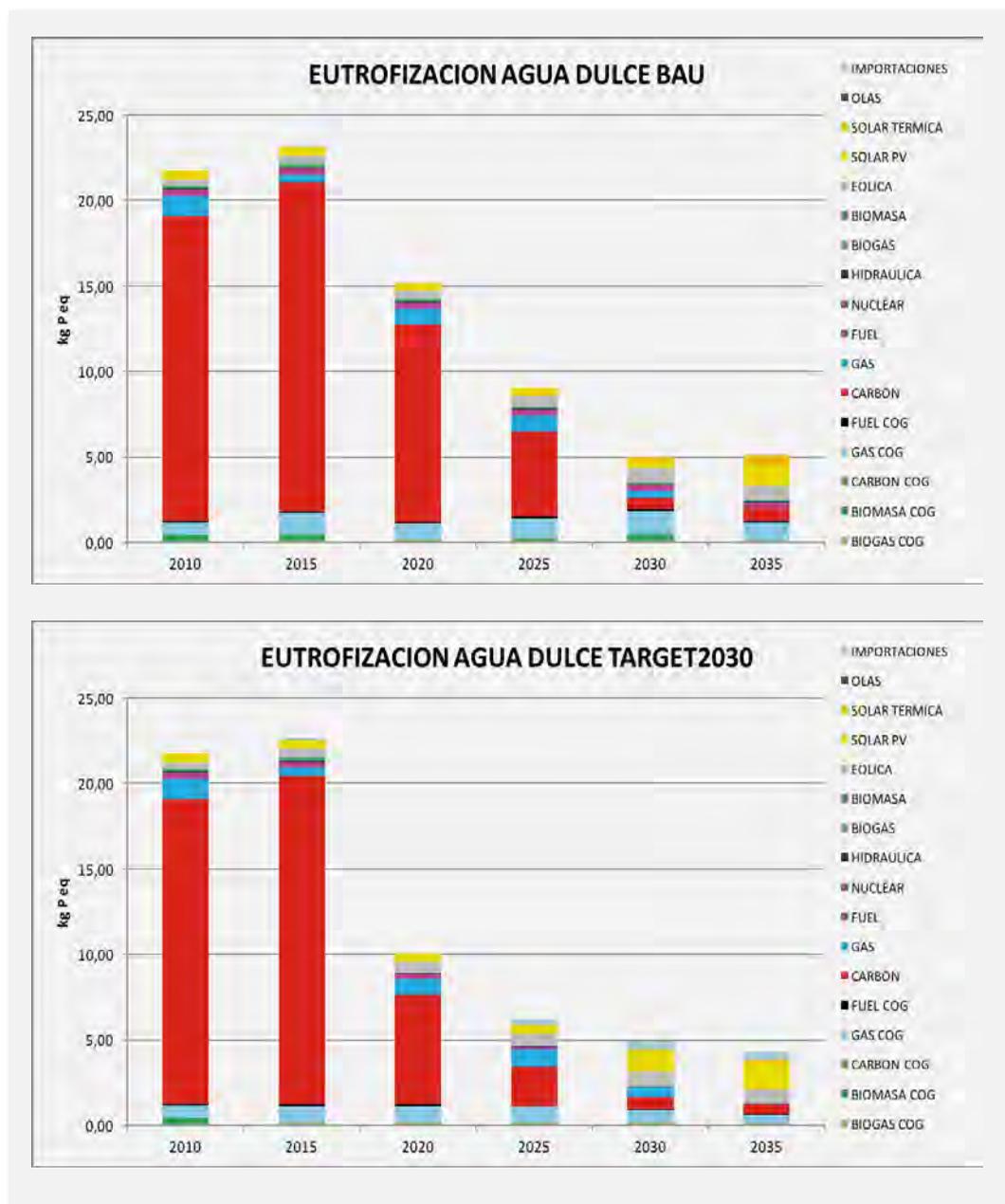
molc N eq/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	2,31 E-03	2,16 E-03	1,82 E-03	1,51 E-03	1,32 E-03	1,09 E-03
<b>TARGET2030</b>	2,31 E-03	2,02 E-03	1,57 E-03	8,94 E-04	9,02 E-04	4,62 E-04

Fuente: Elaboración propia

#### **2.3.2.4 Impactos sobre la eutrofización de las masas de agua dulce**

La eutrofización de las masas de agua dulce se reduce un 78,7% y un 81,8% con respecto al año de inicio en los escenarios BAU y TARGET2030, respectivamente (Figura 18). El impacto sobre la eutrofización de las masas de agua dulce es consecuencia principalmente del consumo de carbón. La evaluación de este impacto por tecnologías, que se muestra en la Figura 10, indica la gran diferencia en más de tres órdenes de magnitud del impacto de esta tecnología con respecto al resto. El resto de tecnologías tienen una relevancia mucho menor, por lo que las diferencias entre ambos escenarios no son tan grandes como en impactos anteriormente analizados.

Figura 18. Impactos sobre la eutrofización de agua dulce en los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 8 muestra los impactos sobre la eutrofización de las masas de agua dulce por kWh generado en los escenarios.

**Tabla 8. Impactos sobre eutrofización de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados**

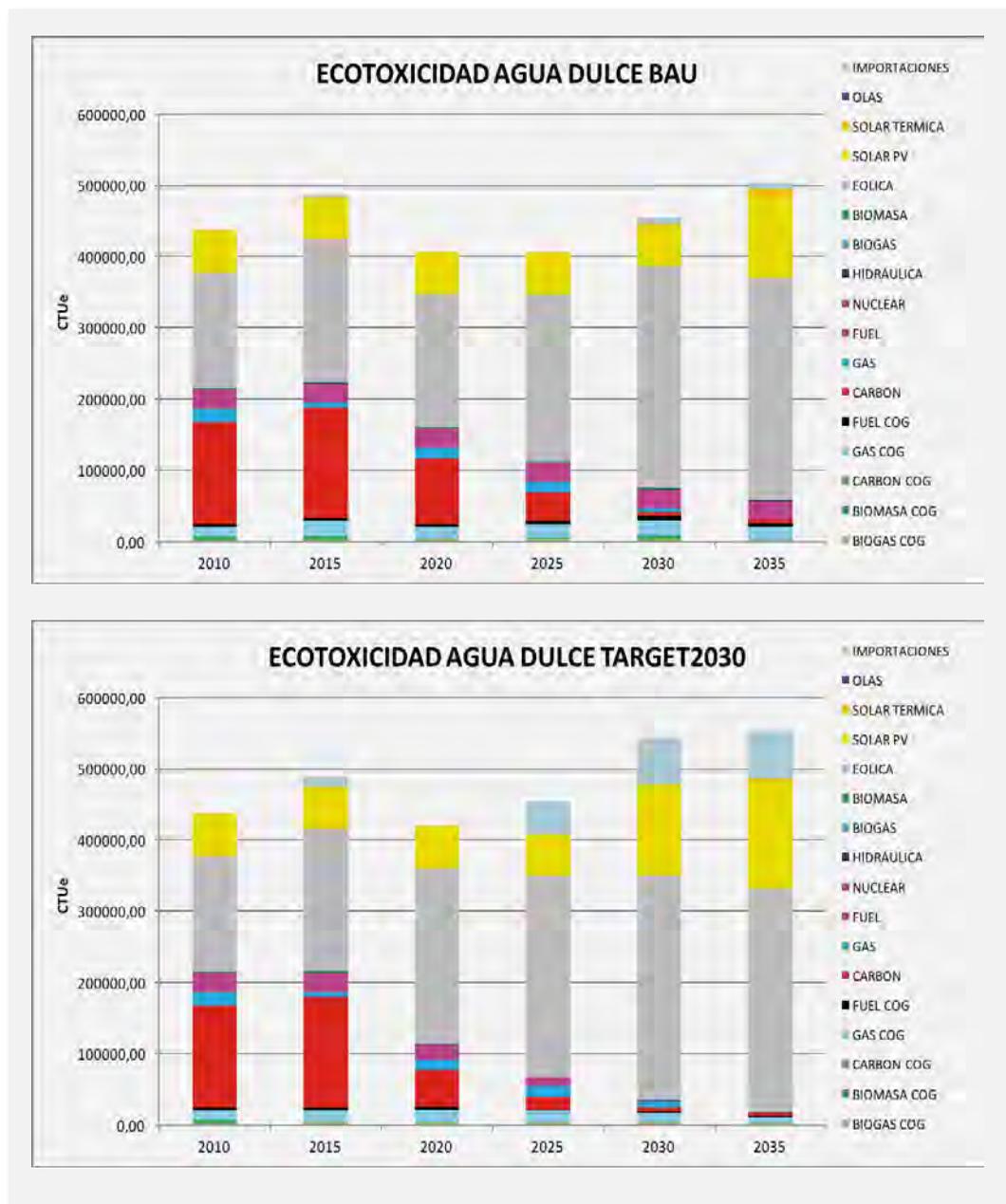
kg P eq/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	7,65 E-05	8,03 E-05	6,20 E-05	3,26 E-05	1,71 E-05	1,63 E-05
<b>TARGET2030</b>	7,65 E-05	7,92 E-05	3,91 E-05	2,23 E-05	1,71 E-05	1,39 E-05

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.5 Impactos sobre ecotoxicidad en el agua dulce

En el caso de los impactos sobre ecotoxicidad de agua dulce, a lo largo de los años de análisis se ve un aumento del impacto en ambos escenarios, siendo superior en el escenario TARGET2030 (+15%) (Figura 19). En los primeros años la contribución del carbón a este impacto es equiparable a la contribución de la tecnología eólica, a pesar de que la producción de electricidad con ésta última tecnología es mucho menor. La importancia de la tecnología fotovoltaica en este impacto también aumenta con el tiempo, principalmente en el escenario TARGET2030. Tal y como se mostraba en la Figura 11, las tecnologías fotovoltaicas tienen un impacto alto por kWh de electricidad generada, al igual que la eólica, de modo que el aumento de su contribución al mix eléctrico, supone un aumento también del impacto total.

Figura 19. Impactos sobre ecotoxicidad de agua dulce de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se resumen los impactos de ecotoxicidad asociados a la generación de un kWh en los distintos escenarios energéticos.

**Tabla 9. Impactos sobre ecotoxicidad de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados**

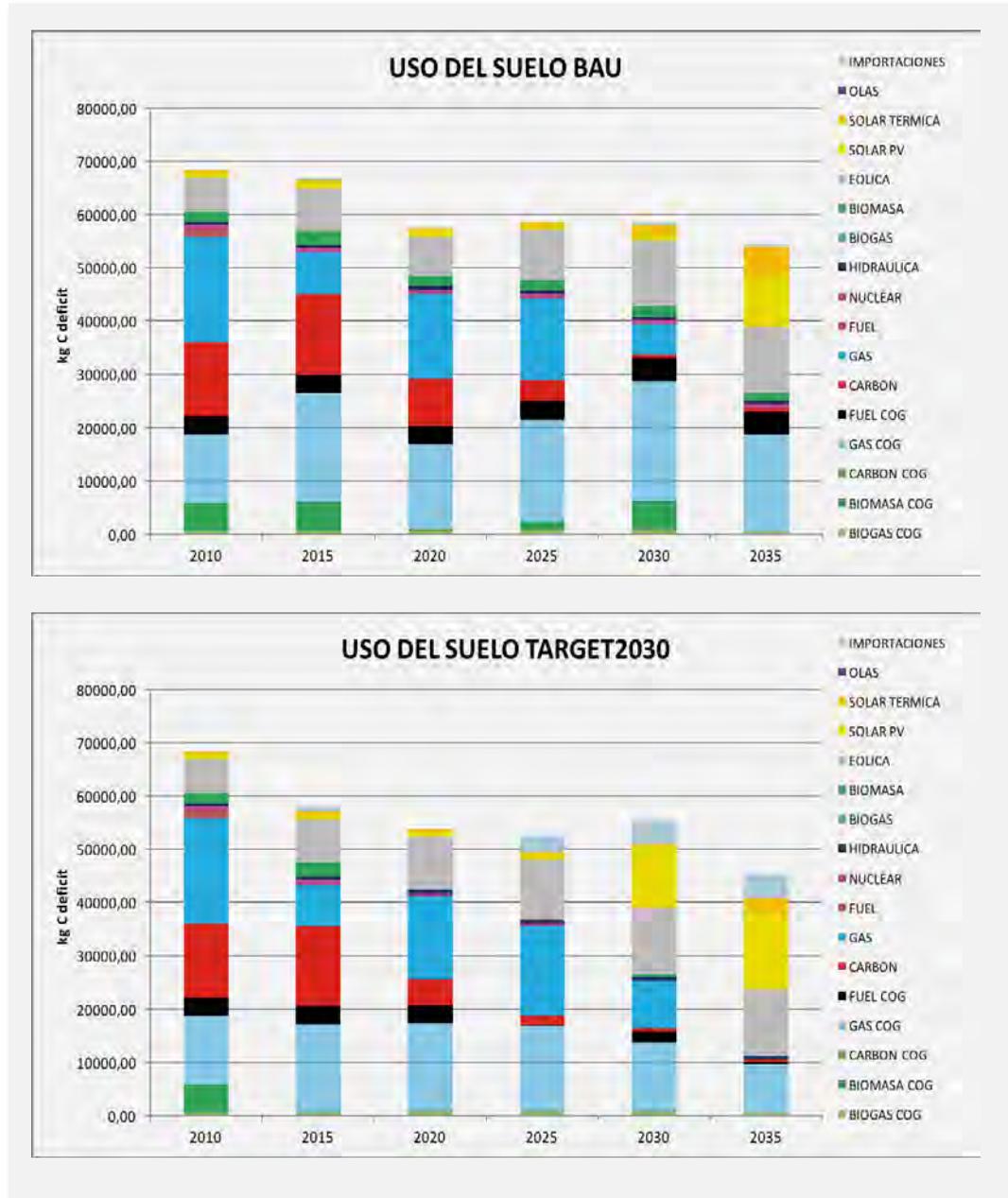
CTUe/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	<b>1,54</b>	<b>1,69</b>	<b>1,55</b>	<b>1,46</b>	<b>1,54</b>	<b>1,61</b>
<b>TARGET2030</b>	<b>1,54</b>	<b>1,7</b>	<b>1,63</b>	<b>1,63</b>	<b>1,9</b>	<b>1,78</b>

Fuente: Elaboración propia.

### **2.3.2.6 Impactos sobre el uso del suelo**

Los resultados muestran una disminución del uso del suelo en ambos escenarios (Figura 20). En el escenario BAU, esta reducción es de 27.8% en 2035 con respecto al año de inicio mientras que en el escenario TARGET2030 el impacto se reduce un 39.4%. En ninguno de los dos escenarios hay una tecnología que destaque con respecto a las otras, aunque si se puede percibir un aumento en los últimos años de la importancia de la energía eólica y solar fotovoltaica.

Figura 20. Impactos sobre uso del suelo de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

Los impactos sobre el uso del suelo asociados a los distintos escenarios energético por unidad energética producida se resumen en la Tabla 10.

**Tabla 10. Impactos sobre uso del suelo por kWh generado en los escenarios analizados**

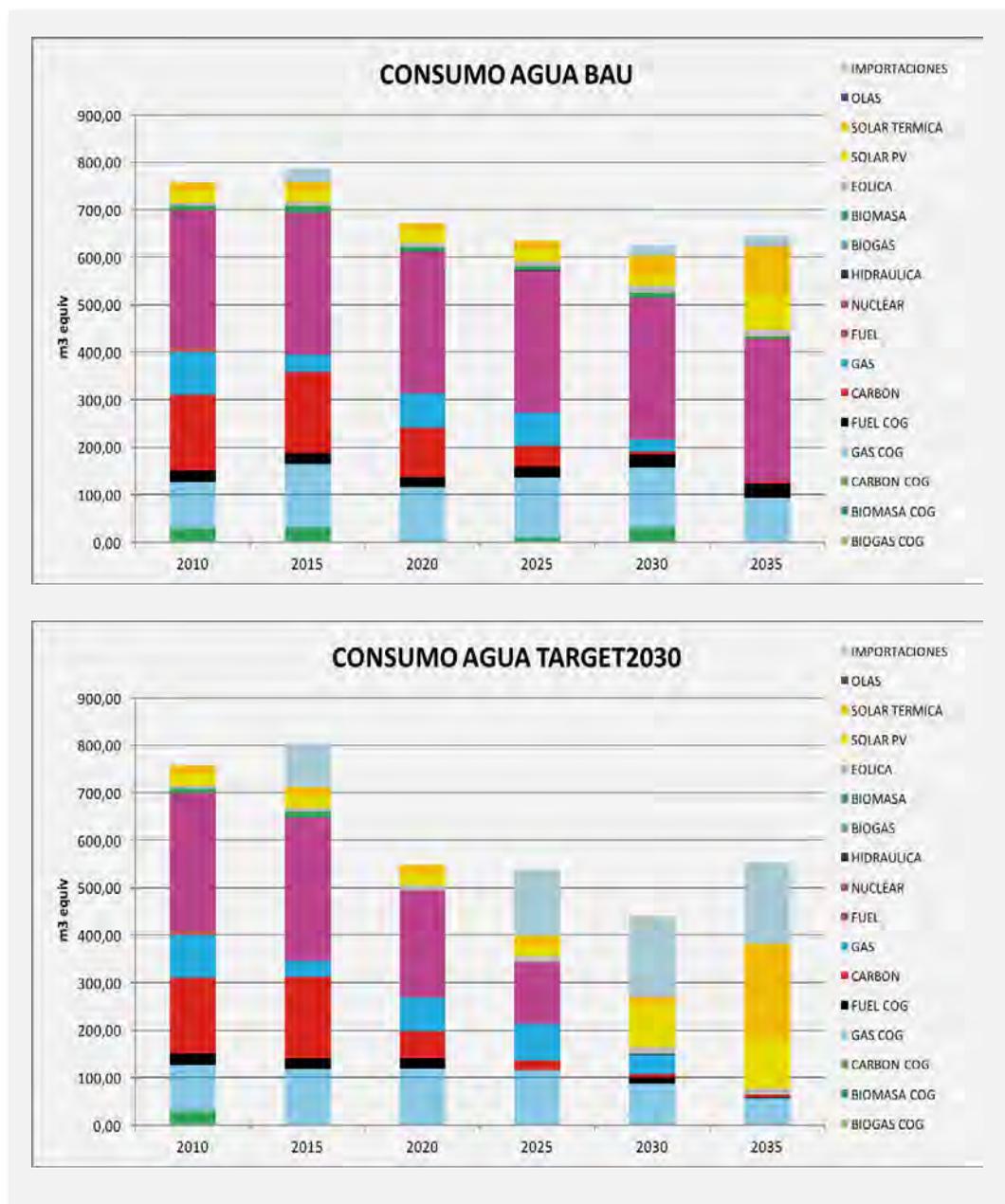
kg C deficit/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	2,41 E-01	2,31 E-01	2,14 E-01	2,11 E-01	1,99 E-01	1,74 E-01
<b>TARGET2030</b>	2,41 E-01	2,02 E-01	2,09 E-01	1,89 E-01	1,93 E-01	1,46 E-01

Fuente: Elaboración propia

### **2.3.2.7 Impactos sobre el consumo de agua**

El consumo de agua se reduce tanto en el escenario BAU como en el TARGET2030, 22.8% y 33.3% respectivamente (Figura 21V). En el escenario BAU, a medida que la contribución en la producción de electricidad con carbón disminuye, la importancia relativa del consumo de agua debido a la energía nuclear aumenta, siendo la tecnología que más contribuye a este impacto. En el escenario TARGET2030 la contribución de la energía nuclear al consumo de agua también es importante hasta el año 2025 en el que esta tecnología desaparece del mix eléctrico. En los dos últimos periodos de este escenario crece el consumo de agua asociado a la energía solar fotovoltaica y térmica. En este escenario destaca el efecto de las importaciones que en su mayoría son energía nuclear de Francia.

Figura 21. Impactos sobre consumo de agua de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 11 evalúa los impactos en el consumo de agua asociados a la producción energética (en kWh) para cada escenario energético.

**Tabla 11. Impactos sobre consumo de agua dulce por kWh generado en los escenarios analizados**

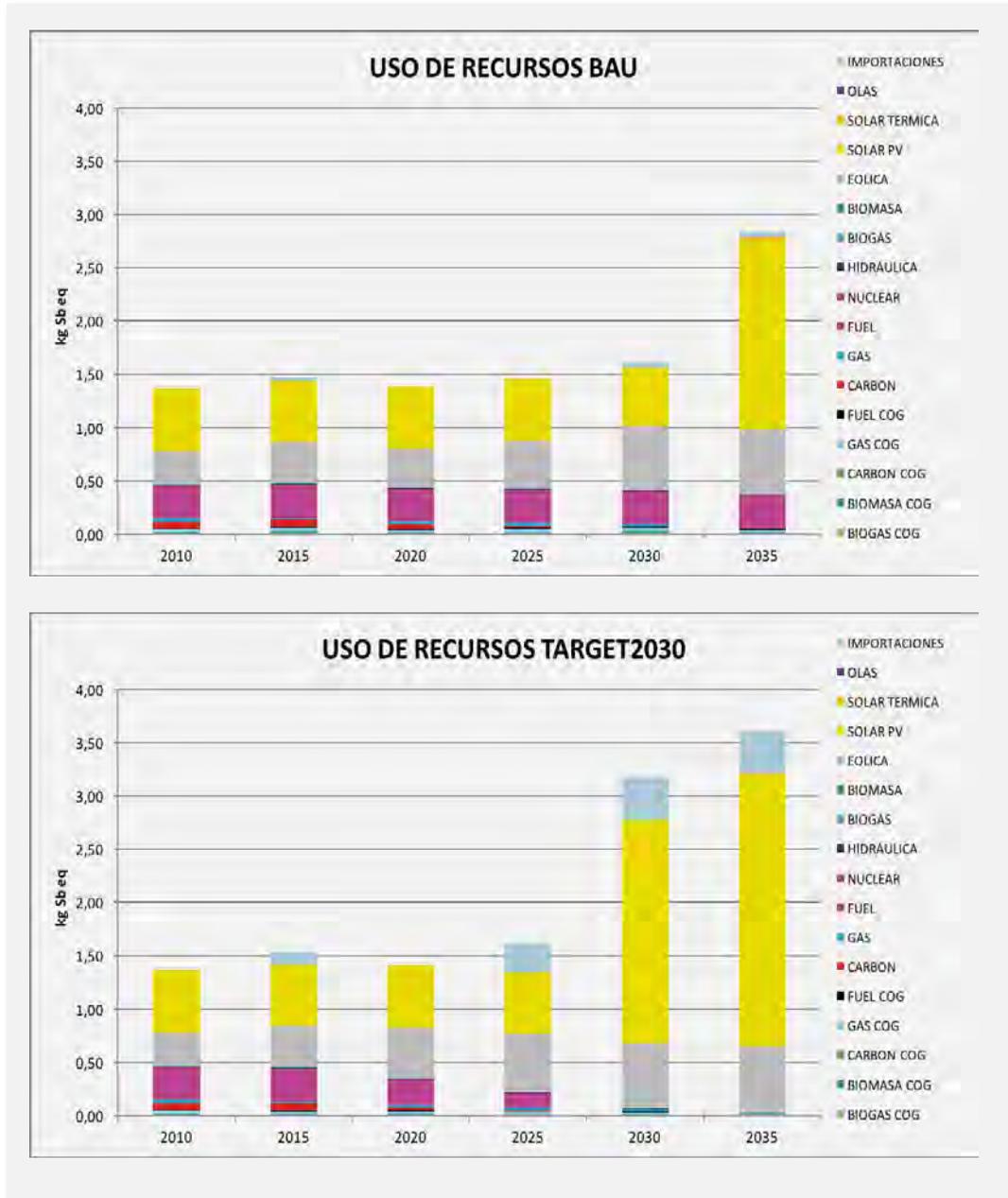
m <sup>3</sup> equiv/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	2,67 E-03	2,72 E-03	2,52 E-03	2,29 E-03	2,12 E-03	2,06 E-03
<b>TARGET2030</b>	2,67 E-03	2,81 E-03	2,13 E-03	1,93 E-03	1,54 E-03	1,78 E-03

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.8 Impactos sobre el uso de recursos

Tal y como muestra la Figura 22, el impacto sobre el consumo de recursos aumenta en ambos escenarios, siendo mayor el crecimiento en el escenario TARGET 2030 (140%). Las principales tecnologías que contribuyen a este impacto son la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. La importancia de estas tecnologías es mucho mayor en el escenario TARGET 2030 ya que el impacto de esta tecnología por unidad de producción de la Figura 15 es de los más altos en comparación con otras tecnologías y además su contribución al mix de generación de electricidad es muy superior a la del escenario BAU.

Figura 22. Impactos sobre consumo de recursos de los escenarios analizados



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se refleja el consumo de recurso promedio por unidad de energía producida en los distintos escenarios energéticos.

**Tabla 12. Impactos sobre consumo de recursos por kWh generado en los escenarios analizados**

kg Sb eq/kWh	2010	2015	2020	2025	2030	2035
<b>BAU</b>	4,78 E-06	5,10 E-06	5,13 E-06	5,25 E-06	5,48 E-06	9,04 E-06
<b>TARGET2030</b>	4,78 E-06	5,36 E-06	5,44 E-06	5,81 E-06	1,11 E-05	1,16 E-05

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 CONCLUSIONES

Las emisiones de gases de efecto invernadero totales disminuyen en los dos escenarios analizados, pero lo hacen de forma mucho más significativa en el escenario TARGET2030 debido a una mayor participación de las energías renovables. Al final del periodo las emisiones de este escenario TARGET2030 son un 53% inferiores a las del escenario BAU y son debidas casi exclusivamente a las emisiones producidas por la generación de electricidad con gas en el sector industrial.

Los impactos sobre acidificación del suelo y eutrofización terrestre y marina se reducen también en los dos escenarios analizados a medida que penetran en el sistema las energías renovables. Destacan los impactos producidos por la generación de electricidad con fuel, a pesar de su reducida contribución a la generación eléctrica. El escenario TARGET2030 reduce de forma mucho más rápida las emisiones de compuestos acidificantes y eutrofizantes teniendo, al final del periodo un 54 y un 58% -para acidificación y eutrofización terrestre y marina respectivamente- menos impactos que el escenario BAU.

Si se analizan los impactos sobre eutrofización de agua dulce destacan los impactos producidos por el uso de carbón. Ambos escenarios reducen los impactos de forma muy significativa pero en el escenario TARGET2030 lo hace de forma anticipada. Sin embargo, la ecotoxicidad de agua dulce tiende a aumentar en ambos escenarios a medida que aumenta la energía producida por eólica y solar fotovoltaica. Estos impactos están vinculados a los procesos de gestión de los residuos de estas tecnologías.

Los impactos sobre usos del suelo, medidos en términos de pérdida de C debida al cambio de uso, siguen una pauta descendente en ambos escenarios, ligeramente más marcada en el escenario BAU que en el escenario TARGET2030 a pesar de la mayor penetración de energías renovables.

En cuanto al consumo de agua, éste disminuye hasta el año 2030 aunque a partir de ese momento vuelve a aumentar, a medida que penetración de la energía solar térmica cobra mayor peso. Destaca el consumo de agua de la generación nuclear, así como de las importaciones que en su mayoría son energía nuclear de Francia.

Finalmente, en cuanto al uso de recursos, ambos escenarios siguen una pauta ascendente fundamentalmente motivada por el aumento de generación fotovoltaica. Este impacto está vinculado al uso de plata y zinc en la fabricación de los módulos.

En conclusión, podemos decir que ambos escenarios tienden a reducir todos los impactos sobre el nexo con la excepción de la ecotoxicidad acuática y el uso de recursos, y que esta reducción es más marcada en general en el escenario TARGET2030.



## ▪ 3 ▪

# Caso de Estudio II: Balance sobre las mejoras en la eficiencia de la producción agrícola en España

El crecimiento económico y poblacional, así como la globalización de los mercados y un contexto ambiental cambiante han contribuido a aumentar sustancialmente la demanda de agua, tierra y energía a escala global. Este aumento de la demanda incrementa la competencia por unos recursos cada vez más escasos y obliga a sectores como la agricultura, altamente demandantes de recursos, a buscar soluciones que permitan aumentar su productividad pero a la vez también garanticen su sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos

En el contexto mediterráneo, y en España en particular, el vínculo entre agricultura y el medio ambiente ha sido armónico durante muchas décadas, y ha contribuido a diversificar el paisaje rural y su biodiversidad, optimizar los ciclos de nutrientes (nitrógeno, fósforo) y contribuir a la producción de alimentos. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX esta relación cambia rápidamente, como consecuencia de numerosos factores que incluyen la puesta en marcha de políticas productivistas encaminadas a solucionar los problemas de escasez de alimentos, el abandono de los sistemas menos rentables, la tecnificación y modernización del sector agrícola y en definitiva su industrialización. Si antes se producía para autoabastecerse, ahora se produce para abastecer los mercados nacionales e internacionales. Esta transformación del sector ha permitido aumentar sustancialmente la productividad, mejorar las condiciones de vida de los agricultores y abaratar los precios de los alimentos, pero también ha ocasionado un número creciente de problemas ambientales, a medida que ha aumentado la necesidad de inputs (agua, tierra, fertilizantes, energía) y se ha roto la sincronización entre los ciclos ecológicos y de producción.

A día de hoy la agricultura a pesar de ser un sector clave en España es quizás también uno de los sectores que tiene un impacto ambiental mayor. Sin duda desde el punto de vista territorial, pero también en términos de necesidades de agua, energía y emisiones de gases de efectos invernadero (GEI). Como se describe en el apartado 1, casi la mitad del territorio nacional (46,4%) se destina a la producción agraria. La superficie regada entre 1950 y 2007 se ha multiplicado por 3,3 (de 1 millón de hectáreas en 1950 a las 3,5 millones que se estima existían en 2007). Como resultado el uso del agua para riego entre 1950-2007 se ha incrementado en un 50% (de 12.375 hm<sup>3</sup> a 24.450 hm<sup>3</sup>), y el consumo de energía se ha multiplicado por 18 (de 3.000 GWh a 5.800 GWh) (Corominas 2011).

Aunque buena parte del proceso de modernización y aumento de la competitividad del sector agrícola ya se inició en el siglo pasado, a lo largo de la primera década del siglo XXI también se han experimentado cambios importantes como resultado de varios factores. Por un lado, políticas y medidas con una incidencia directa sobre el sector tales como la política agraria comunitaria (PAC), las reformas de 2003 y 2009 y los cambios en la demanda y precios de muchos cultivos. El propio clima y las garantías hídricas también tienen un peso específico en las decisiones sobre los cultivos. Pero también las reformas y cambios promovidos desde otros sectores han tenido incidencia en la agricultura. Véase, por ejemplo, los planes de modernización de regadíos promovidos con el objetivo de reducir el elevado consumo de agua de la agricultura y aliviar las situaciones de escasez en muchas regiones productoras, la reforma del sector eléctrico y el aumento de las tarifas eléctricas, el aumento del precio de los fertilizantes o incluso factores ambientales como la sequía de 2004-2005 que marcó el inicio de la conversión del regadío de aguas superficiales a subterráneas a fin de asegurar las garantías de abastecimiento.

El objetivo de este caso de estudio es evaluar de manera retrospectiva si la modernización e intensificación de la agricultura en España en el transcurso de la última década han contribuido a mejorar la eficiencia en la utilización de recursos naturales (tierra, agua y energía) y a reducir los impactos ambientales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del agua y suelo. Para ello, se han combinado dos metodologías ampliamente utilizadas para abordar este tipo de estudios. Por un lado, se ha llevado a cabo un análisis sobre la huella territorial, hídrica y energética de la producción agrícola y se ha evaluado su evolución en el tiempo tanto en términos absolutos como relativos. Por otra parte, con la finalidad de evaluar la trayectoria en términos de emisiones y la contaminación de suelo y agua, se ha desarrollado un análisis del ciclo de vida de la producción agrícola. La combinación de ambas metodologías permite tener una visión amplia sobre los avances del sector agrícola en materia de sostenibilidad ambiental y los retos pendientes.

## 3.1 ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA, TERRITORIAL Y ENERGÉTICA DE LA AGRICULTURA

### 3.1.1 Introducción y objetivos

La agricultura española consume un promedio anual de 25.000 hm<sup>3</sup>, lo que equivale al 80% de la demanda nacional de agua (INE, 2015). El elevado consumo de agua por parte del sector agrícola es uno de los factores responsables de que muchas cuencas hidrográficas españolas experimenten problemas de escasez, y, como resultado, surjan numerosos conflictos entre usuarios que compiten por unos recursos cada vez más escasos.

Con el objeto de aliviar los problemas de escasez ocasionados por la agricultura y al mismo tiempo modernizar y aumentar la resiliencia del sector, se han puesto en marcha numerosas iniciativas en el transcurso de los últimos años para mejorar la eficiencia en el uso del agua. La iniciativa más ambiciosa ha sido sin duda, como ya se ha puesto en evidencia, el plan de modernización de regadíos, cuyo objetivo inicial fue modernizar 1,5 millones de hectáreas, equivalente al 54% de la superficie actualmente regada en España.

Los resultados de este plan deben ser todavía evaluados detalladamente, aunque los datos más recientes apuntan a que gracias a la modernización se ha conseguido reducir el consumo de agua, pero se han generado efectos colaterales. Quizás el más evidente ha sido el sustancial incremento en el consumo de energía asociado a la sustitución de sistemas de gravedad por nuevas tecnologías más eficientes en el uso del agua como el riego de precisión y localizado. En menor medida, parte del aumento de la energía asociada al riego ha tenido que ver con la expansión de regadíos en lugares situados a mayores cotas y alejados de las zonas de captación, lo que encarece el transporte del agua desde el punto de vista energético y económico.

El incremento del consumo de energía para riego también tiene su explicación en el fuerte aumento del uso de aguas subterráneas. Principalmente a raíz de la sequía de 2005-2008, el uso de las aguas subterráneas ha experimentado un incremento sustancial debido, fundamentalmente, a las garantías que ofrece este recurso frente a las aguas superficiales, especialmente en situaciones de sequía prolongada.

Por consiguiente, las medidas puestas en marcha para aumentar la eficiencia en el uso del agua en el regadío, han venido acompañadas por una ineficiencia en el uso de la energía con los consiguientes impactos asociados (ej. incremento de los costes de producción, aumento de emisiones, etc). Asimismo, este incremento del consumo energético también aumenta la vulnerabilidad del sector, debido a la alta dependencia energética de España de las importaciones de petróleo.

El objetivo de este segundo caso de estudio es analizar la evolución de la agricultura en España entre 2000-2011 en términos de uso de agua, tierra y energía para riego y caracterizar los impactos que determinadas medidas sectoriales en materia de agua y energía han tenido en el nexa AET.

### 3.1.2 Datos, enfoque metodológico y limitaciones del estudio

#### 3.1.2.1 Huella territorial

La huella territorial es un indicador que mide la cantidad de tierra necesaria para la producción de un producto. En este trabajo se ha evaluado la huella territorial de los cultivos más representativos a nivel provincial para la serie temporal 2000-2011, en términos absolutos (ha) y por unidad de producto (ha/t).

Los datos empleados para el cálculo de la huella territorial proceden del Anuario de Estadística Agraria publicados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA, 2015a). En concreto, se han recopilado datos de superficies y producción de los principales cultivos de secano y regadío al aire libre cultivados en las 50 provincias españolas, para las campañas agrícolas comprendidas entre 1999-2000 y 2010-2011.<sup>12</sup> Se excluyen de este análisis los regadíos bajo plástico, por considerarse sistemas agrícolas con un manejo muy específico y con una representatividad, en términos de superficie, limitada en el conjunto de España.

La huella territorial de un cultivo  $i$  en una provincia  $j$  y año  $k$  ( $HTcult_{i,j,k}$  ha) equivale a la suma de sus superficies en producción de secano ( $S_{sec,i,j,k}$  ha) y regadío ( $S_{reg,i,j,k}$  ha).

$$HTcult_{i,j,k} \quad (ha) = S_{sec,i,j,k} + S_{reg,i,j,k}$$

La HTcult anual de los distintos cultivos se ha agregado a nivel provincial y nacional con el objeto de evaluar la dinámica de la huella territorial de la producción agrícola en su conjunto para cada año.

Asimismo, se ha calculado la huella territorial de los cultivos en términos relativos ( $HTcult\_r_{i,j,k}$  ha/t) para cada año. Su cálculo permite valorar las mejoras de eficiencia en el uso de la tierra para la producción agrícola, y se obtiene dividiendo la superficie en producción de un cultivo  $i$  en el año  $k$  y provincia  $j$  ( $S_{i,j,k}$  ha) entre la producción anual ( $P_{i,j,k}$  t) tanto de secano como regadío.

<sup>12</sup> El listado de los cultivos incluidos en este estudio se encuentra en el Anexo I. El criterio de selección ha estado determinado por la representatividad que tienen los distintos cultivos en términos de superficie. En conjunto, los cultivos seleccionados representan el 75% de la superficie cultivada en producción en el año 2011.

$$HT_{cult} - r_{sec,i,j,k} \left( \frac{ha}{t} \right) = \left( \frac{S_{sec,i,j,k}}{P_{sec,i,j,k}} \right)$$

$$HT_{cult} - r_{reg,i,j,k} \left( \frac{ha}{t} \right) = \left( \frac{S_{reg,i,j,k}}{P_{reg,i,j,k}} \right)$$

### 3.1.2.2 Huella hídrica

La huella hídrica es un indicador que cuantifica el volumen de agua consumida en la producción de un bien o un servicio (Hoekstra et al., 2011). En este trabajo se ha estimado la huella hídrica de la producción agrícola en secano y regadío en España, para la serie temporal 2000-2011, con la finalidad de evaluar su evolución en términos absolutos y también las posibles mejoras en la eficiencia de producción (m<sup>3</sup>/t). Un objetivo añadido de este análisis ha sido cuantificar para los cultivos en regadío la huella hídrica azul de origen superficial y/o subterráneo.

Para calcular la huella hídrica se han recopilado datos climáticos y de cultivos. Los datos referentes al clima fueron obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y se refieren a medias mensuales de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración de referencia de un total de 50 estaciones meteorológicas (una por provincia) para la serie temporal 2000-2011. La relación de estaciones meteorológicas incluidas en este análisis se adjunta en el Anexo IV.

Los datos de cultivos se refieren a superficies, producciones y rendimientos anuales de los principales cultivos de secano y regadío al aire libre existentes en las 50 provincias de España para las campañas agrícolas comprendidas entre 1999-2000 y 2010-2011. La información sobre cultivos ha sido obtenida de MAGRAMA, (2015a) y el listado de cultivos seleccionados se adjunta en el Anexo V. También se han utilizado otras variables en los cálculos intermedios como el coeficiente de cultivo (Kc), que expresa las necesidades de agua que tiene un determinado cultivo a lo largo de su fase de crecimiento.

Para el cálculo de la huella hídrica de los cultivos se ha aplicado la metodología desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004). A dicha metodología se le han incorporado una serie de aportaciones con el fin de obtener la mayor precisión posible en los resultados.

La huella hídrica de un cultivo *i* es igual a la suma de la evaporación directa del agua del suelo y la transpiración de las plantas durante el periodo de crecimiento, y se considera equivalente a la demanda evaporativa. En este estudio se ha estimado la evapotranspiración mensual de cada cultivo (ET<sub>i</sub>, mm, mes) según la ecuación de Penman-Monteith. Para su cálculo, se multiplica la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>, mm, mes) por el coeficiente del cultivo (Kc).

$$ET_i \text{ (mm,mes)} = ET_o \times Kc$$

Los datos mensuales de  $ET_o$  han sido facilitados por la AEMET y la constante  $Kc$  se ha obtenido de Allen et al. (1998). Para obtener las necesidades hídricas mensuales del cultivo  $i$  ( $CWR_i$ ) en  $m^3/ha$  se ha multiplicado por el factor corrector 10.

$$CWR_i \text{ (} m^3/ha, \text{mes)} = ET_i \times 10$$

En los cultivos de secano el único aporte de agua para cubrir sus necesidades hídricas es el agua de lluvia o agua verde. En los cultivos de regadío se asume que las necesidades hídricas siempre se cubren. Por ello, si existen diferencias entre las necesidades hídricas,  $CWR_i$  y el agua de lluvia aportada, ésta se cubre mediante agua de riego o agua azul.

Para calcular la huella hídrica de un cultivo  $i$  en secano en la provincia  $j$  es necesario estimar la evapotranspiración de agua de lluvia o agua verde mes a mes ( $z$ ) durante la campaña  $k$  ( $ETg_{ij,z,k}$   $m^3/ha, \text{mes}$ ). En el caso de los cultivos de regadío, la huella hídrica requiere calcular la evapotranspiración mensual de agua verde ( $ETg_{ij,z,k}$   $m^3/ha, \text{mes}$ ) y la evapotranspiración mensual de agua azul ( $ETb_{ij,z,k}$   $m^3/ha, \text{mes}$ ) durante la campaña  $k$ .

$ETg_{ij,z,k}$  es igual a la precipitación efectiva ( $P_{eff,j,z,k}$   $m^3/ha, \text{mes}$ ) siempre que ésta no supere las necesidades hídricas,  $CWR_i$ .

$$ETg_{i,j,z,k} \text{ (} m^3/ha, \text{mes)} = \min(CWR_i; P_{eff,j,z,k})$$

Para obtener la precipitación efectiva, es decir, el agua procedente de la lluvia que realmente puede ser aprovechada por la planta durante los meses de campaña, se han seguido las fórmulas propuestas por Brouwer y Heibloem (1986), en función de la precipitación mensual ( $p$ , mm/mes) de cada provincia.

$$P_{eff,j,z,k} \text{ (} mm/mes) = 0,8 \times p - 25, \text{ si } p > 75 \text{ mm/mes}$$

$$P_{eff,j,z,k} \text{ (} mm/mes) = 0,6 \times p - 10, \text{ si } p < 75 \text{ mm/mes}$$

$$P_{eff,j,z,k} \text{ (} m^3/ha, \text{mes)} = \max(0; 10 \times P_{eff,j,z,k})$$

En el caso de los cultivos de regadíos, la evapotranspiración de agua azul ( $ETb_{ij,z,k}$ ,  $m^3/ha, mes$ ) será positiva siempre que la precipitación efectiva mensual no satisfaga la demanda hídrica del cultivo.

$$ETb_{i,j,z,k} (m^3/ha, mes) = \max(0, CWR_i - P_{eff,j,z,k})$$

Para el cálculo de  $ETg_{ij,k}$  y  $ETb_{ij,k}$  se ha considerado que las fechas de siembra y recolección para cada cultivo se mantienen constantes a lo largo de los años y en las distintas provincias. También se ha asumido que el calendario de siembras y recolección un cultivo producido en secano y regadío es el mismo. Dicha información ha sido obtenida del calendario de siembra, recolección y comercialización, años 2000-2011 (MAPA, 2001).

Calculados los valores de  $ETg_{ij,z,k}$  y  $ETb_{ij,z,k}$  se puede determinar la huella hídrica anual de cada cultivo en secano ( $HHcult_{sec,ij,k}$ ,  $m^3$ ) y regadío ( $HHcult_{reg,ij,k}$ ,  $m^3$ ) a nivel provincial.

$$HHcult_{sec,i,j,k} (m^3) = \left( \sum_{z=1}^n ETg_{i,j,z,k} \times S_{sec,i,j,k} \right)$$

$$HHcult_{reg,i,j,k} (m^3) = \left( \sum_{z=1}^n ETg_{i,j,z,k} \times S_{reg,i,j,k} + \sum_{z=1}^n ETb_{i,j,z,k} \times S_{reg,i,j,k} \right)$$

Donde  $S_{sec}$  es la superficie de secano dedicada al cultivo  $i$ , en la provincia  $j$  y año  $k$ ,  $S_{reg}$  la superficie de regadío y  $n$  es el número de meses que dura el ciclo de producción del cultivo  $i$ . Asimismo, la huella hídrica de una provincia  $j$  en un año  $k$  ( $HHprov_{j,k}$ ,  $m^3$ ) se ha calculado como la suma de las huellas hídricas de todos los cultivos de secano y regadío durante esa campaña.

$$HHprov_{j,k} (m^3) = \sum_{i=1}^n HHcult_{sec,i,j,k} + \sum_{i=1}^n HHcult_{reg,i,j,k}$$

En el cálculo de la huella hídrica azul de los cultivos de regadíos, se ha diferenciado si el origen de ese agua es superficial o subterráneo. Para ello, se ha empleado la información sobre el ratio anual de uso de aguas de origen subterránea, obtenida de la encuesta sobre uso del agua en el sector agrario para la serie 2000-2011 (INE, 2012) (ver Anexo VI). Dado que la información sobre el uso del agua de las encuestas se proporciona a escala de comunidad autónoma, se asume que todos los cultivos dentro de una comunidad autónoma en la campaña del año  $k$  usan el mismo porcentaje de aguas subterráneas y superficiales.

$$HHazul_{sup,i,j,k} (m^3) = \left( \sum_{z=1}^n ETb_{i,j,z,k} \times S_{reg,i,j,k} \right) \times (1 - ratio_{subt})$$

$$HHazul_{subt,i,j,k} (m^3) = \left( \sum_{z=1}^n ETb_{i,j,z,k} \times S_{reg,i,j,k} \right) \times ratio_{subt}$$

Finalmente, con el objeto de evaluar las mejoras en eficiencia del uso de agua en la agricultura, se ha estimado también la huella hídrica por unidad de producto ( $m^3/t$ ). En los cultivos de secano, la huella hídrica relativa de un cultivo ( $HHcult\_r_{sec,i,j,k}$ ) se obtiene de dividir la evapotranspiración anual de agua verde para el cultivo  $i$  en la provincia  $j$  y año  $k$  ( $ETg_{i,j,k}$   $m^3/ha$ ) entre el rendimiento en secano ( $Y_{sec,i,j,k}$   $t/ha$ ).

$$HHcult\_r_{sec,i,j,k} (m^3/t) = \frac{\sum_{z=1}^n ETg_{i,j,z,k}}{Y_{sec,i,j,k}}$$

Los cultivos en regadío consumen agua azul y verde. Por tanto, la huella hídrica azul por unidad de producto ( $HHcult\_r_{reg-azul,i,j,k}$   $m^3/t$ ) resulta de dividir la evapotranspiración anual de agua azul ( $ETb_{i,j,k}$ ) entre su rendimiento en regadío ( $Y_{reg,i,j,k}$   $t/ha$ ), mientras que la huella hídrica verde ( $HHcult\_r_{reg-verde,i,j,k}$   $m^3/t$ ) se obtiene al dividir la evapotranspiración anual de agua verde ( $ETg_{i,j,k}$ ) entre el rendimiento en regadío.

$$HHcult\_r_{reg-verde,i,j,k} (m^3/t) = \frac{\sum_{z=1}^n ETg_{i,j,z,k}}{Y_{reg,i,j,k}}$$

$$HHcult\_r_{reg-azul,i,j,k} (m^3/t) = \frac{\sum_{z=1}^n ETb_{i,j,z,k}}{Y_{reg,i,j,k}}$$

### 3.1.2.3 Huella energética del regadío

El cálculo de la huella energética de la agricultura se ha centrado en estimar el consumo de energía asociado al riego con aguas superficiales y subterráneas en dos fases: 1) captación y bombeo de la fuente de agua; y 2) riego en parcela. Para el cálculo energético se ha asumido que la electricidad es la principal fuente de energía para el riego. Esta asunción parece razonable, dado que tal y como apunta Corominas (2010), en los últimos años el aumento de la demanda energética ligada a la modernización de los sistemas de riego, así como la mayor cobertura de líneas de distribución eléctrica, y el relativo encarecimiento del combustible frente a la electricidad, han contribuido a que la mayor parte de los regadíos pasen a depender casi en su totalidad de energía eléctrica.

La huella hídrica de la energía asociada al riego de un cultivo  $i$ , en una provincia  $j$ , un año  $k$  y con una fuente de agua superficial y/o subterránea se calcula como:

$$HEcult_{i,j,k} (kWh) = HHazul_{sup,i,j,k} \times q_{bombeo\_sup,j,k} + HHazul_{sup,i,j,k} \times q_{riego,j,k} + HHazul_{subt,i,j,k} \times q_{bombeo\_subt,j,k} + HHazul_{subt,i,j,k} \times q_{riego,j,k}$$

Donde  $HHazul_{sup,i,j,k}$  ( $m^3$ ) es la huella hídrica azul de origen superficial del cultivo  $i$  en la provincia  $j$  y año  $k$ ,  $HHazul_{subt,i,j,k}$  ( $m^3$ ) es la huella hídrica azul de origen subterráneo,  $q_{bombeo\_sup,j,k}$  ( $kWh/m^3$ ) se refiere al consumo eléctrico promedio asociado al bombeo y captación de agua superficial,  $q_{bombeo\_subt,j,k}$  ( $kWh/m^3$ ) es el consumo eléctrico asociado al bombeo de aguas subterráneas, y  $q_{riego,j,k}$  ( $kWh/m^3$ ) se refiere al consumo promedio de energía asociado al riego en parcela.

Con el objetivo de incorporar el efecto de la modernización de los regadíos, el valor de  $q_{riego,j,k}$  ( $kWh/m^3$ ) se ha calculado para cada provincia y año en función de la representatividad de los distintos sistemas de riego.

$$q_{riego,j,k} (kWh / m^3) = \sum^n \omega_\sigma \times r_{\sigma,j,k}$$

Donde  $\omega$  es el consumo promedio de energía ( $kWh/m^3$ ) asociado al riego en parcela de un sistema de riego  $\sigma$  (gravedad, aspersión-automotriz, localizado) y  $r$  es la proporción del sistema de riego en la provincia  $j$  en el año  $k$ . La Tabla 13 resume los valores de  $\omega$  empleados según los distintos sistemas de riego en parcela.

**Tabla 13. Energía empleada por unidad de agua ( $\omega$ , kWh/m<sup>3</sup>) para los distintos sistemas de riego en parcela y fuentes de agua**

Sistema de riego	En parcela	Captación y bombeo aguas superficiales
<b>Gravedad</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>
<b>Aspersión y automotriz</b>	<b>0,24</b>	<b>0,05</b>
<b>Localizado</b>	<b>0,18</b>	<b>0,10</b>

Fuente: Corominas (2010)

En el caso del consumo de agua asociado a la captación y bombeo de las aguas superficiales ( $q_{\text{bombeo\_sup},j,k}$ , kWh/m<sup>3</sup>), también se ha calculado una media ponderada de los consumos promedios de energía de los distintos sistemas de riego.

$$q_{\text{bombeo\_sup},j,k} \text{ (kWh / m}^3\text{)} = \sum^n \omega_\sigma \times r_{\sigma,j,k}$$

Donde  $\omega$  es el consumo promedio de energía (kWh/m<sup>3</sup>) asociado al bombeo y captación de agua superficial para un sistema de riego  $\sigma$  y  $r$  es la proporción de sistema de riego en la provincia  $j$  en el año  $k$ .

El consumo eléctrico en la captación y bombeo de las aguas subterráneas ( $q_{\text{bombeo\_subt},j,k}$ , kWh/m<sup>3</sup>) está muy condicionado por la profundidad de bombeo que presenta una alta variabilidad regional e interanual. Para calcular  $q_{\text{bombeo\_subt},j,k}$  se ha aplicado el método de Karimi et al. (2012).

$$q_{\text{bombeo\_subt},j,k} \text{ (kWh / m}^3\text{)} = \left( \frac{2,73 \times D_{j,k} \times V_{j,k}}{Ef \times (1 - TI) \times 1000} \right) \times r_{u/c}$$

Donde  $D$  es la profundidad de bombeo promedio (m) en la provincia  $j$  y año  $k$ ,  $V$  es el volumen de agua subterránea bombeada (m<sup>3</sup>),  $Ef$  es la eficiencia de la bomba eléctrica;  $TI$  son las pérdidas de transmisión y distribución de la bomba; y  $r_{u/c}$  es el ratio entre agua usada y consumida. Para calcular  $D$ , se recopiló información de la red oficial de seguimiento del estado cuantitativo de las masas de agua subterráneas (MAGRAMA, 2015d), sobre la profundidad de nivel de todos los piezómetros en las distintas provincias para la serie 2000-2011. En el anexo VII se adjunta los niveles piezométricos promedio obtenidos y empleados en este análisis para cada provincia y año. El valor de  $V$  equivale a la huella hídrica de las aguas subterráneas ( $HH_{\text{subt},j,k}$ , en m<sup>3</sup>) en la provincia  $j$  y año  $k$ . Se ha asumido que la eficiencia de las bombas eléctricas es del 60%, y que las

pérdidas de transmisión y distribución son del 10%. De acuerdo con estas asunciones, el coste energético asociado al bombeo de 1.000 m<sup>3</sup> a una profundidad de 1 metro es equiparable a 4,6 kWh o 0,17 kWh/m<sup>3</sup> si tenemos en cuenta que la profundidad media del nivel piezométrico durante el periodo analizado, y a pesar de las enormes diferencias regionales, se ha mantenido en torno a 38 m. Este valor es menor que las determinaciones de Corominas (2010) que estima un consumo promedio de bombeo de 0,39 kWh/m<sup>3</sup>.

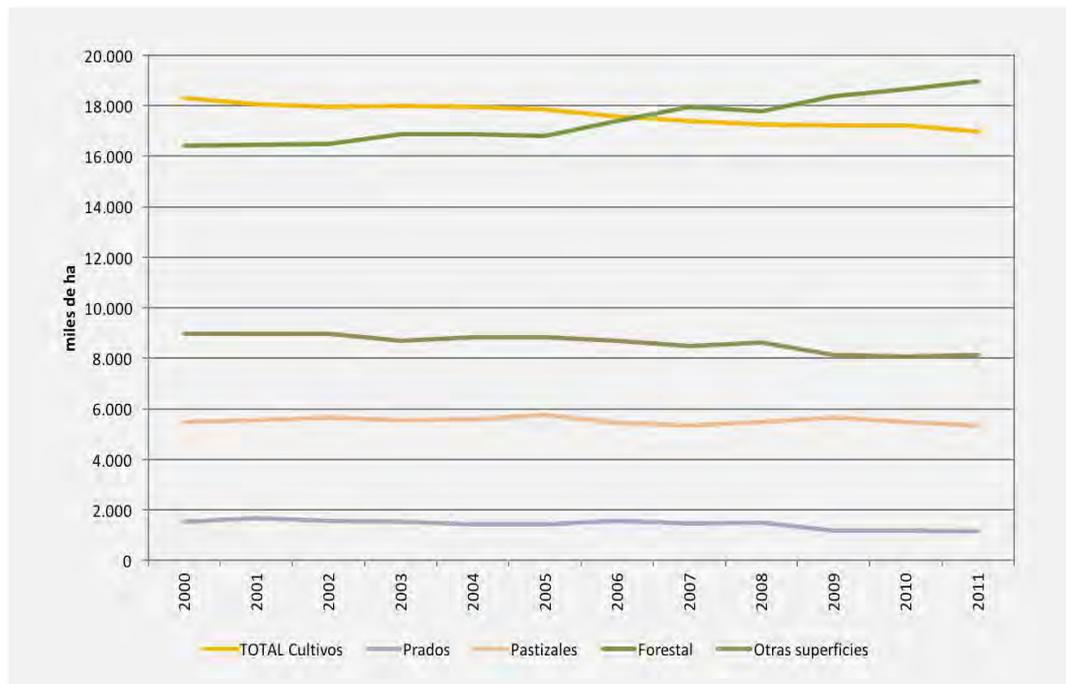
El uso de datos de consumo de agua (huella hídrica azul) en lugar de uso o volumen de agua aplicada en el cálculo de la HEcult, implica que las estimaciones de energía asociadas al riego probablemente son inferiores a las reales, principalmente porque el volumen de agua bombeado y distribuido en una parcela para riego es normalmente superior al consumo real de agua por un cultivo. Esta diferencia es mayor cuando el sistema de riego es poco tecnificado (ej. gravedad) y disminuye a medida que aumenta el grado de tecnificación (ej. en sistemas de riego localizados). Para abordar esta limitación, se ha introducido un factor corrector ( $r_{w/c}$ ) en los cálculos de la huella energética de los distintos tipos de cultivos y años, en función del sistema de riego que presentan. En el caso de los regadíos por gravedad se ha asumido que la diferencia entre volumen de agua usada y consumida es del 20%, mientras que en los regadíos por aspersión y automotriz se ha asumido que la diferencia se reduce al 15%. Por último, en el caso de los regadíos localizados se ha asumido que el uso del agua es un 10% mayor que el consumo real.

### 3.1.3 Resultados

#### 3.1.3.1 Huella territorial

En el transcurso de la primera década del siglo XXI la superficie agraria en España ha experimentado importantes cambios (Figura 23). Entre 2000 y 2011 la superficie de cultivos se ha reducido en más de 1,3 millones de hectáreas (Mha), lo que significa una reducción del 7%. Las superficies de prados y pastizales también se han reducido sensiblemente durante este periodo (380.000 ha y 160.000 ha, respectivamente), así como las superficies clasificadas como “otras superficies”, que incluyen láminas de agua, zonas improductivas y áreas urbanas. La disminución de estas superficies se ha visto compensada con el aumento de las áreas forestales, que incrementaron su superficie en 2,5 Mha entre 2000 y 2011. Todas estas transformaciones territoriales implican que en el transcurso de sólo 11 años el 5% de la superficie de España ha cambiado de uso, y es probable que esta tendencia haya continuado entre 2011 y 2015.

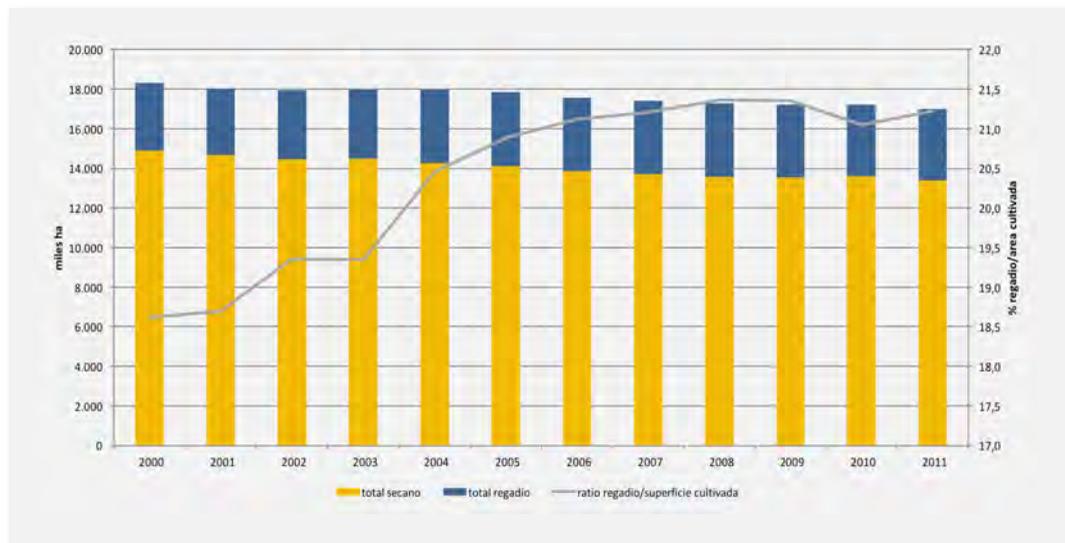
Figura 23. Evolución de la superficie de usos del territorio en España, periodo 2000-2011



Fuente: MAGRAMA (2011)

La reducción de la superficie agrícola en el conjunto de España se explica por la pérdida de áreas de secano (de 14,9 Mha en el año 2000 a 13,4 Mha en 2011), aunque estas pérdidas han sido parcialmente compensadas por la intensificación del regadío (Figura 24). Si en el año 2000 la superficie de regadío representaba el 18,6% de la superficie total cultivada (3,4 Mha), en 2011 este ratio alcanzó el 21,2% (3,6 Mha).

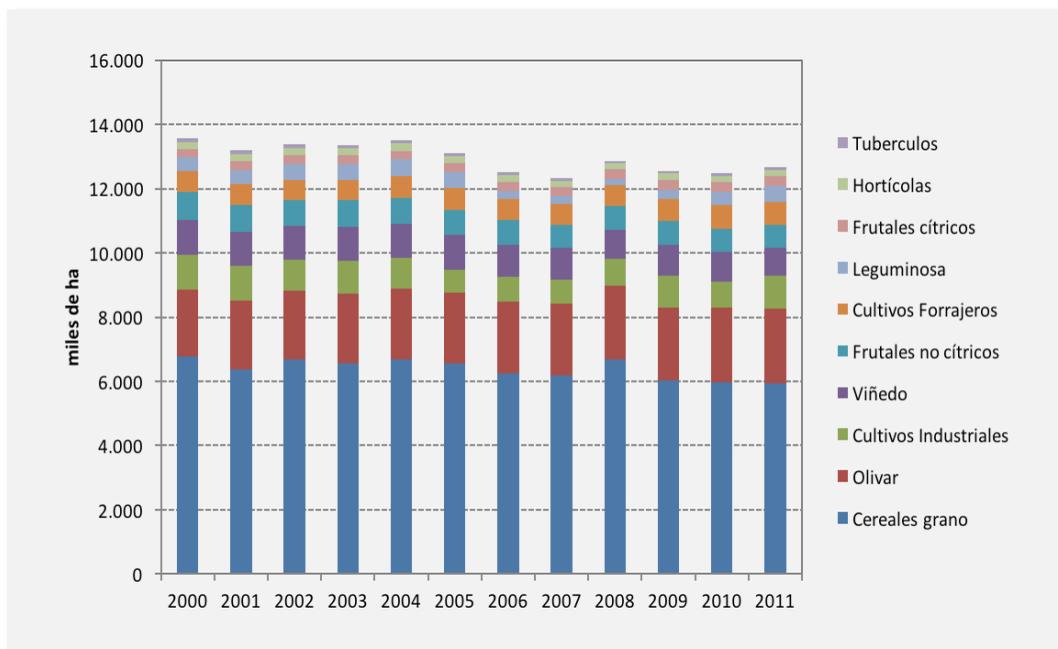
**Figura 24. Evolución de la huella territorial de las superficies agrícolas en producción en España entre 1990 y 2011**



Los datos incluyen áreas en producción y en barbecho.  
Fuente: MAGRAMA (2011)

La pérdida de superficie de secano se explica principalmente por la reducción de las superficies dedicadas al cultivo del cereal (850.000 ha), y en menor medida del viñedo (250.000 ha) y los frutales no cítricos (120.000 ha) (Figura 25). Esta disminución ha sido parcialmente compensada por el aumento de la superficie dedicada al olivar de transformación (250.000 ha), siendo la mitad nuevos regadíos. También durante este periodo se han creado más de 100.000 ha de frutales cítricos y viñedos en regadío.

Figura 25. Superficie y evolución de los principales grupos de cultivos en España



Los datos se refieren a superficies de producción de secano y regadío al aire libre, quedando excluidos los barbechos y los regadíos bajo plástico.

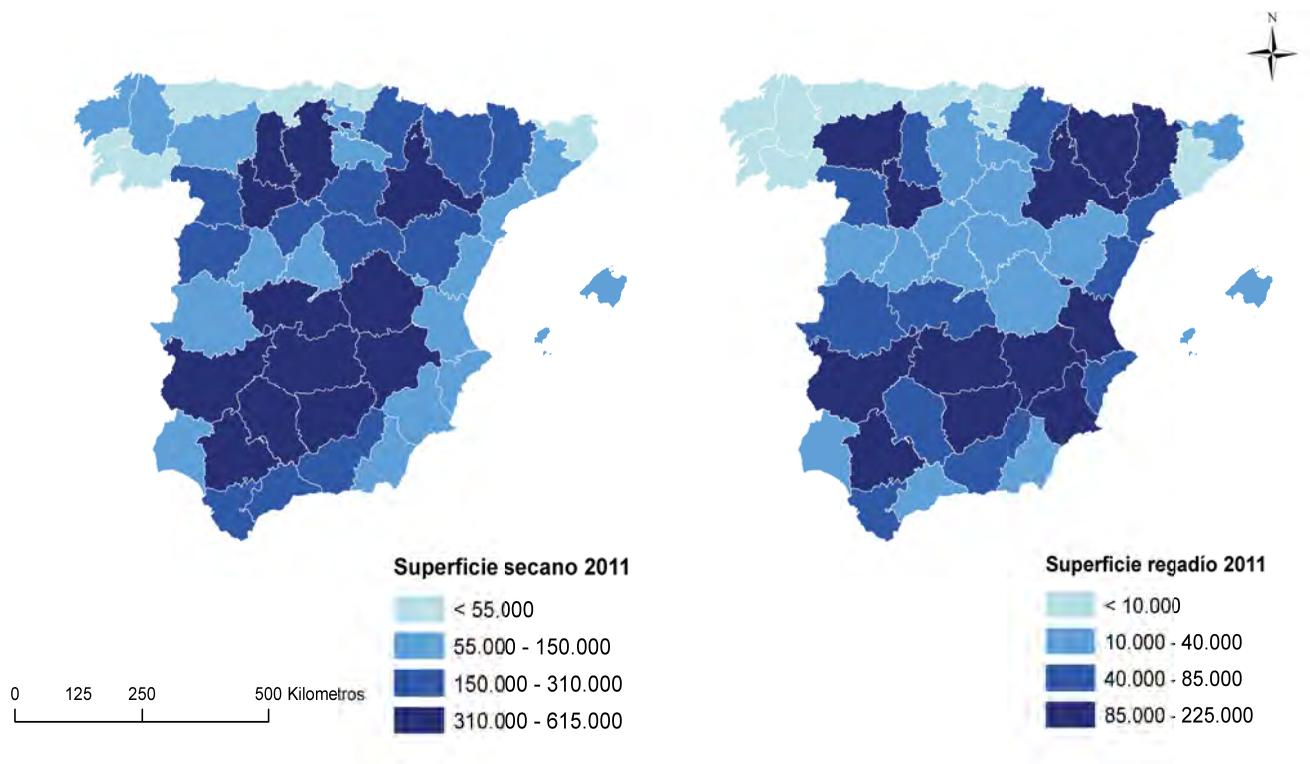
Fuente: elaboración propia con datos de MAGRAMA (2011)

Los factores que explican esta evolución son complejos y requerirían análisis más detallados que trascienden el objetivo del proyecto, pero a groso modo están relacionados con el precio de los cultivos, la tendencia hacia la especialización agrícola, las subvenciones para el fomento del regadío, y las ayudas de la PAC. La Figura 26 muestra la distribución de las superficies de secano y regadío en producción para el año 2011. Los cultivos de secano se concentran en torno a tres grandes regiones. En la mitad sur peninsular destaca la producción de cereales y el viñedo, sobre todo en Castilla-La Mancha. En Andalucía además de los cereales destaca la producción del olivar en secano, principalmente en las provincias de Jaén y Córdoba. Por otra parte, en Castilla y León los cultivos de secano más importantes son los cereales al igual que ocurre en Aragón.

Con respecto a los regadíos, las superficies más importantes se concentran en el este peninsular, donde destaca la producción de cítricos y hortalizas. En Andalucía, buena parte de la superficie regada se destina a la producción del olivar y de cultivos industriales como el algodón y el girasol, despuntando también los cítricos. Por otra parte, en Castilla-La Mancha los regadíos más

importantes son para el cultivo de cereales como el trigo, la cebada y el maíz. Los regadíos de cereales también predominan en Castilla y León, aunque aquí también cobran importancia los regadíos de cultivos industriales como la remolacha y el girasol. Por último, en Aragón destacan los regadíos de cereales, principalmente maíz, y también de cultivos forrajeros como la alfalfa.

**Figura 26. Distribución de las superficies de secano y regadío en producción (hectáreas), año 2011**



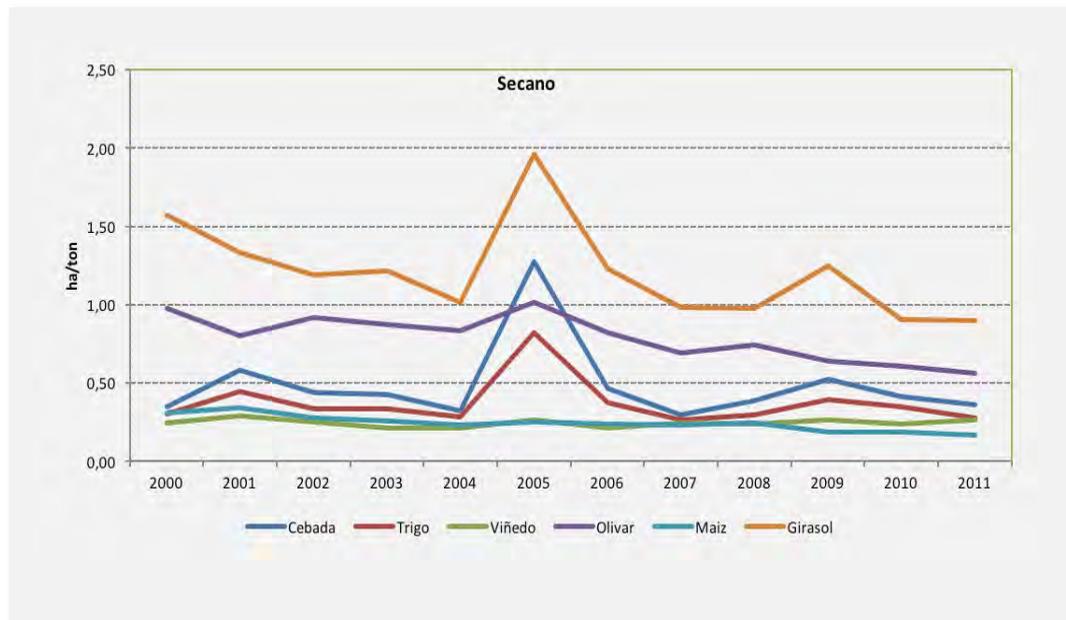
Las superficies de regadío representadas no tienen en cuenta los cultivos bajo plástico.

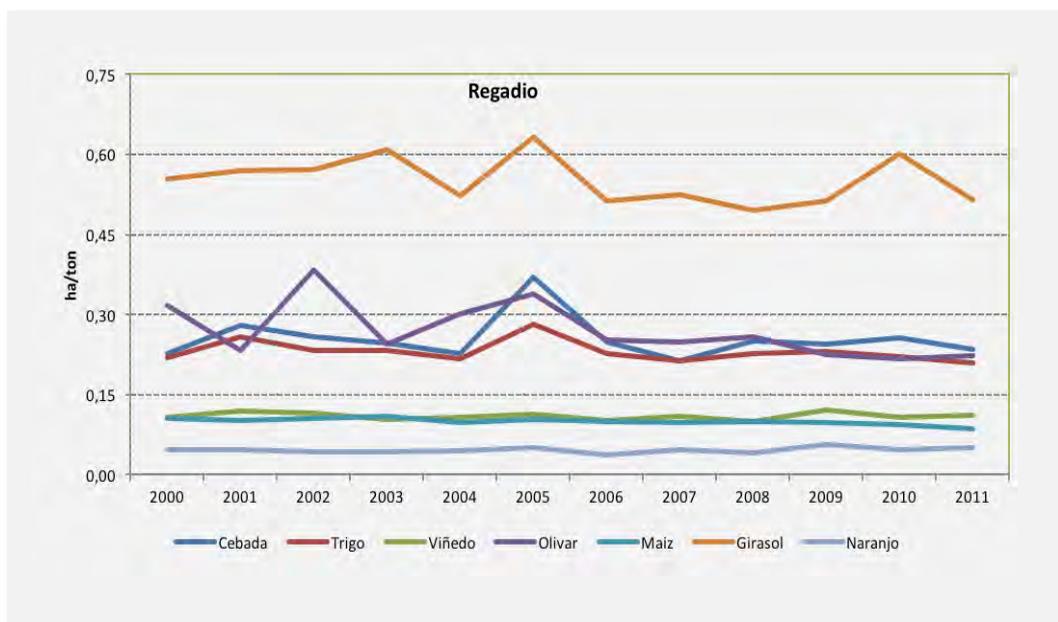
Fuente: elaboración propia con datos de MAGRAMA (2011).

Más allá de los cambios en superficies, los cultivos de secano y del regadío no han experimentado mejoras sustanciales en productividad en el transcurso de los dos últimos lustros (Figura 27). La huella territorial de los principales cultivos de secano (ha/t) se ha mantenido bastante estable en el tiempo, con la excepción del año 2005 que presentó valores muy altos como resultado de la fuerte sequía. Únicamente en el olivar y el girasol se aprecia una mejora en la eficiencia de producción entre 2000 y 2011. En el caso del olivar, la huella territorial por unidad de superficie se ha reducido en un 42%, lo que implica que ha aumentado la eficiencia en su producción, y las necesidades de territorio han pasado de 0,98 hectáreas por tonelada de aceituna en el año 2000 a tan solo 0,56 en el año 2011. La huella territorial del girasol en secano a pesar de la variabilidad que muestra, también presenta una tendencia a la baja. Si en el año 2000 se requerían 1,6 ha/t, en el año 2011 esta cifra se redujo hasta 0,9 ha/t.

En el caso de los regadíos, la huella territorial es menos variable, en general muestra una ligera tendencia a la baja, sobre todo en el caso del olivar. Entre el año 2000 y el 2011 el olivar en regadío ha visto reducida su huella territorial un 29%, pasando de 0,32 ha/t a 0,22 ha/t. El hecho de que la huella territorial del olivar en regadío es un 50% más pequeña que en secano, explica la conversión al regadío que buena parte del olivar ha experimentado en la primera década del siglo XXI.

**Figura 27. Huella territorial de los principales cultivos en España, periodo 2000-2011**





Fuente: Elaboración propia

La escasa mejora de la productividad de la agricultura en España durante la primera década del siglo XXI es coherente con la tendencia observada en Europa occidental. Como se aprecia en la Tabla 14 los países más desarrollados experimentaron ya los mayores incrementos de productividad durante el siglo pasado, siendo ahora el turno de las economías emergentes y países en vías de desarrollo.

**Tabla 14. Incrementos anuales de los rendimientos del maíz, arroz y trigo (Expresados en % (1961-2010))**

Región	Maíz		Trigo		Arroz	
	1961-1990	1991-2010	1961-1990	1991-2010	1961-1990	1991-2010
<b>Mundo</b>	<b>2.33</b>	<b>1.82</b>	<b>2.73</b>	<b>1.03</b>	<b>2.14</b>	<b>1.09</b>
Norte América	2.19	1.75	1.38	0.98	1.22	1.33
Europa Occidental	3.73	1.32	3.21	0.83	0.62	0.70
Europa Oriental	2.54	1.93	3.19	0.18	0.51	3.49
Asia y Pacífico (excl. China)	1.96	2.88	2.96	1.39	1.83	1.49
China	4.39	0.81	5.76	2.05	3.06	0.64
América Latina y Caribe	2.01	3.22	1.67	1.52	1.39	3.10
África Sub-sahariana	1.30	1.70	2.88	1.84	0.83	1.03

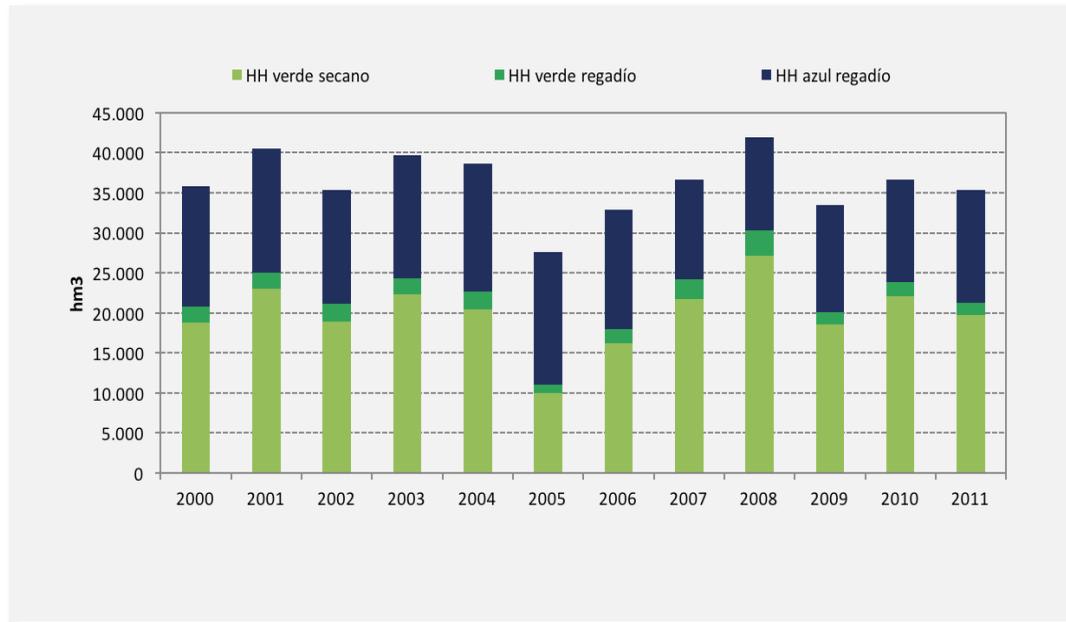
Fuente: Alston et al. (2014).

En síntesis, se puede concluir que la tendencia de reducción de la superficie agrícola en España observada entre 2000 y 2011, a pesar de haber sido parcialmente compensada por el desarrollo de nuevos regadíos y las mejoras en productividad de algunos cultivos, ha traído consigo una reducción de la capacidad de producción en términos absolutos (de 91,7 millones de toneladas producidas en el año 2000 a 81,1 millones de toneladas en 2011). Sin embargo, el valor económico de la producción vegetal se ha incrementado en un 7%, de 22.450 millones de euros en el año 2000 a 24.200 millones de euros en 2011 (MAGRAMA, 2015). Este incremento se debe al aumento de los precios desde 2007 de los cereales y los forrajes, y a la especialización productiva que ha propiciado el aumento de la producción y la calidad de frutales, aceite de oliva y viñedo.

### 3.1.3.2 Huella hídrica

La huella hídrica de la agricultura de secano y regadío en España se ha mantenido relativamente constante durante el periodo de estudio analizado, con una reducción de apenas un 1,5% entre 2000 y 2011, lo que equivale a una disminución en términos absolutos de 35.840 hm<sup>3</sup> en el año 2000 a 35.300 hm<sup>3</sup> en el año 2011 (Figura 28). Esta tímida reducción se debe a la disminución de un 7% de la huella hídrica del regadío (15.000 hm<sup>3</sup> en el año 2000 y 14.000 hm<sup>3</sup> en 2011) y a la elevada variabilidad interanual que muestra la huella hídrica del secano.

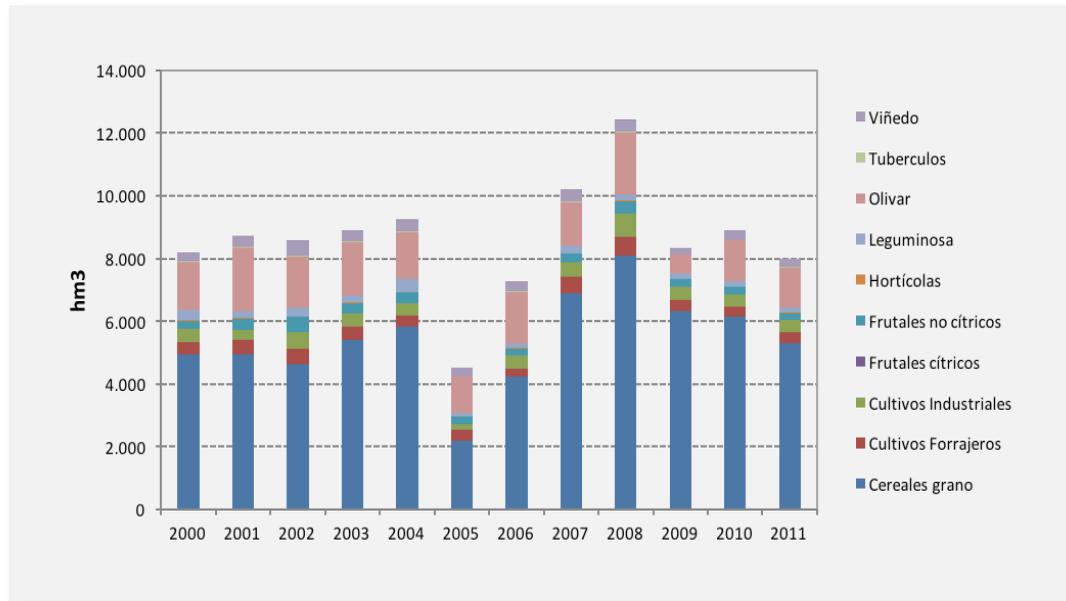
Figura 28. Huella hídrica de la agricultura de secano y regadío en España, periodo 2000-2011



Fuente: Elaboración propia

Entre 2000 y 2011 no se detecta una tendencia clara de evolución en la huella hídrica del secano a pesar de que la superficie en producción se ha reducido en casi 1,2 Mha. Esto se debe, por un lado a que el consumo de agua verde o agua edáfica está estrechamente relacionada con la climatología, y de ahí la elevada variabilidad interanual de su huella hídrica durante el periodo analizado, con valores que varían desde los 10.000 hm<sup>3</sup> en un año seco como 2005, hasta los 27.150 hm<sup>3</sup> contabilizados para 2008 (Figura 29). Por otro lado, la reducción de la superficie de cereales observada se ha compensado en parte con un aumento de las superficies de olivar, girasol y leguminosas en secano, cultivos que en general también son más intensivos en el uso de agua (Figura 30).

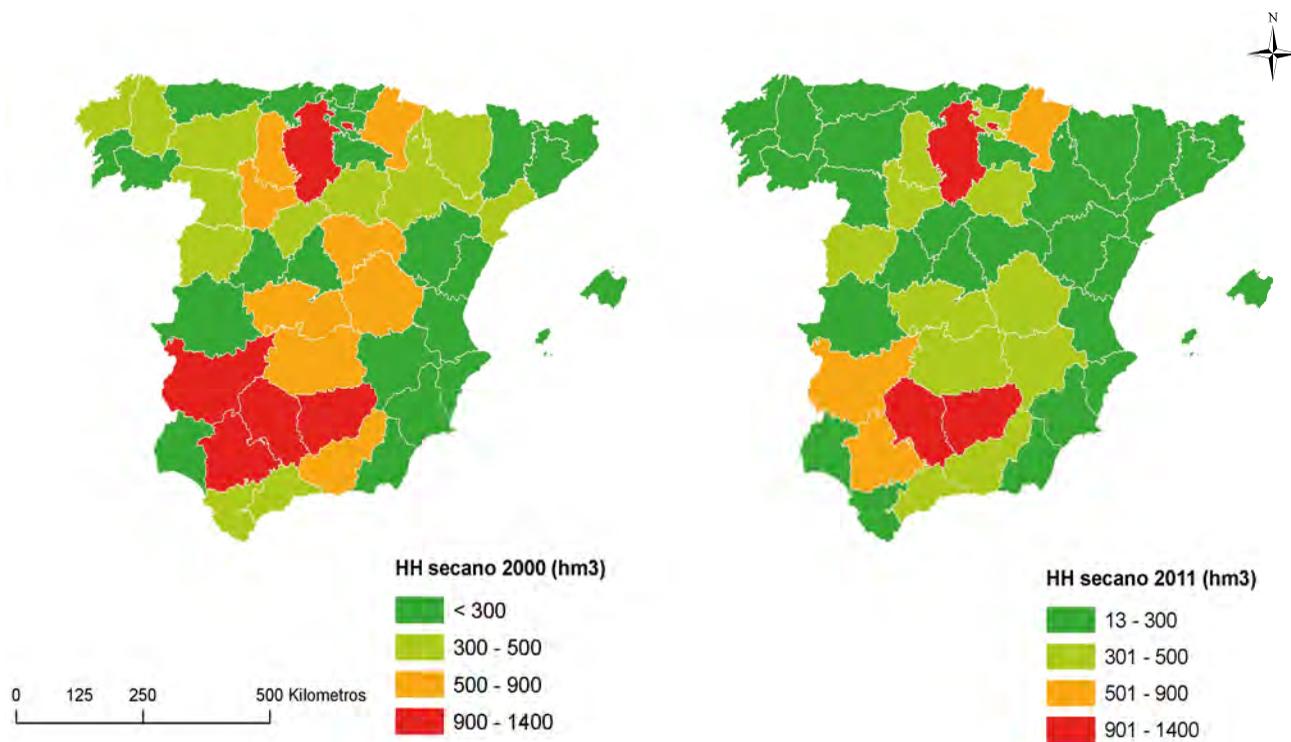
**Figura 29. Huella hídrica del secano en producción por grupos de cultivos, periodo 2000-2011**



Fuente: elaboración propia.

Cuando se compara la huella hídrica de los cultivos de secano en producción entre 2000 y 2011 por provincias (Figura 30), se observa que en ambos periodos los mayores consumos se concentran en la mitad sur peninsular, concretamente en las provincias de Sevilla, Córdoba, Jaén, Badajoz, y también en Burgos. Entre 2000 y 2011 se ha producido un descenso generalizado en el consumo de agua verde en todas las provincias, incluidas las provincias de mayor consumo.

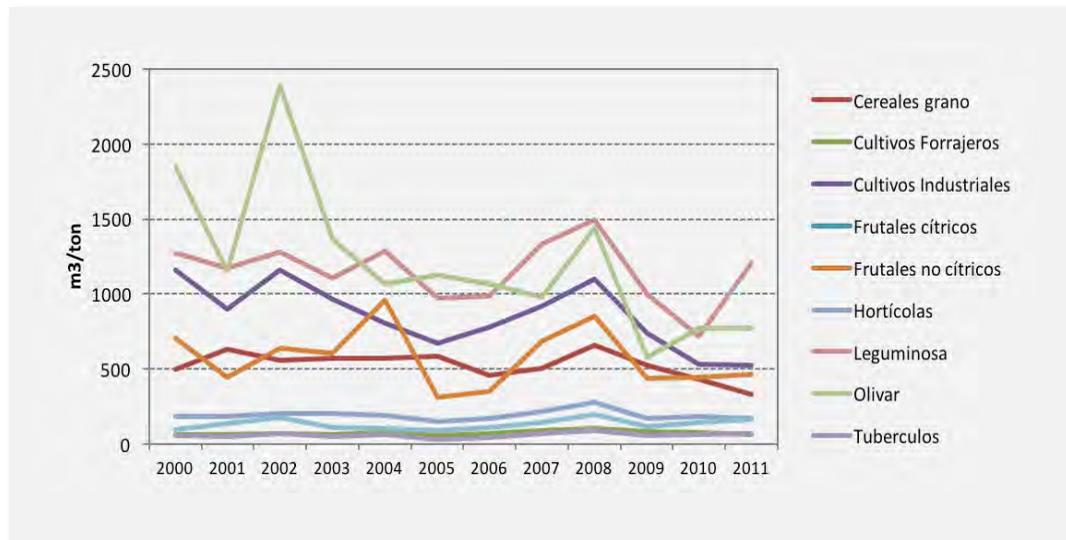
Figura 30. Huella hídrica de los cultivos de secano en producción (en hectómetros cúbicos) por provincias, periodo 2000-2011



Fuente: Elaboración propia

A pesar de la alta variabilidad que tiene la huella hídrica de los cultivos de secano en producción, el consumo relativo de agua verde ( $m^3/t$ ) ha disminuido en el caso del olivar, los cultivos industriales (el girasol principalmente) y de manera más atenuada en el caso de las leguminosas como la alfalfa y los cereales (Figura 31). Estas variaciones se deben a la mejora en los rendimientos de los cultivos ( $ha/t$ ), que también fueron identificadas en el estudio de indicadores de sostenibilidad de la agricultura en Garrido et al. (2012).

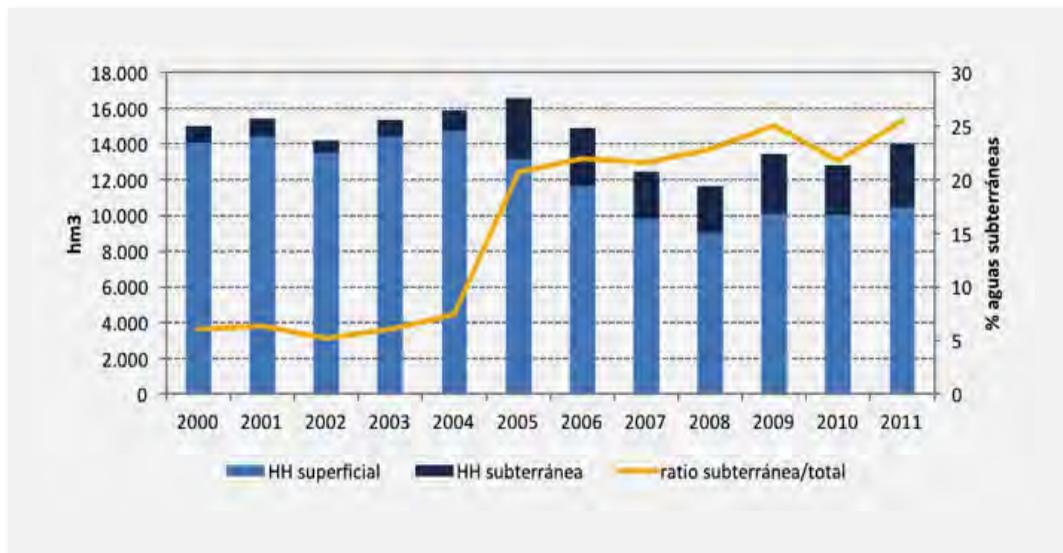
**Figura 31. Evolución de la huella hídrica ( $m^3/t$ ) de los grupos de cultivos en secano, periodo 2000-2011**



Fuente: elaboración propia

Con respecto a la evolución del regadío, la Figura 32 resume la evolución y composición de la huella hídrica azul de los regadíos al aire libre en producción entre 2000 y 2011.<sup>13</sup> Durante este periodo el consumo de aguas superficiales ha experimentado una reducción del 26% ( $\approx 3.670 \text{ hm}^3$ ). Sin embargo, este descenso ha sido compensado por un incremento del consumo de aguas subterráneas del 290% (de  $913 \text{ hm}^3$  en 2000 a  $3.574 \text{ hm}^3$  en 2011). Estos cambios ponen de manifiesto la conversión que el regadío ha experimentado en España en tan sólo 10 años, siendo 2005 el año que marca el punto de inflexión y el inicio de la explotación a gran escala de las aguas subterráneas. Según los análisis realizados, las aguas subterráneas representaban en 2011 el 25% de la huella hídrica del regadío en España.

Figura 32. Evolución de la huella hídrica azul en el regadío de España, periodo 2000-2011



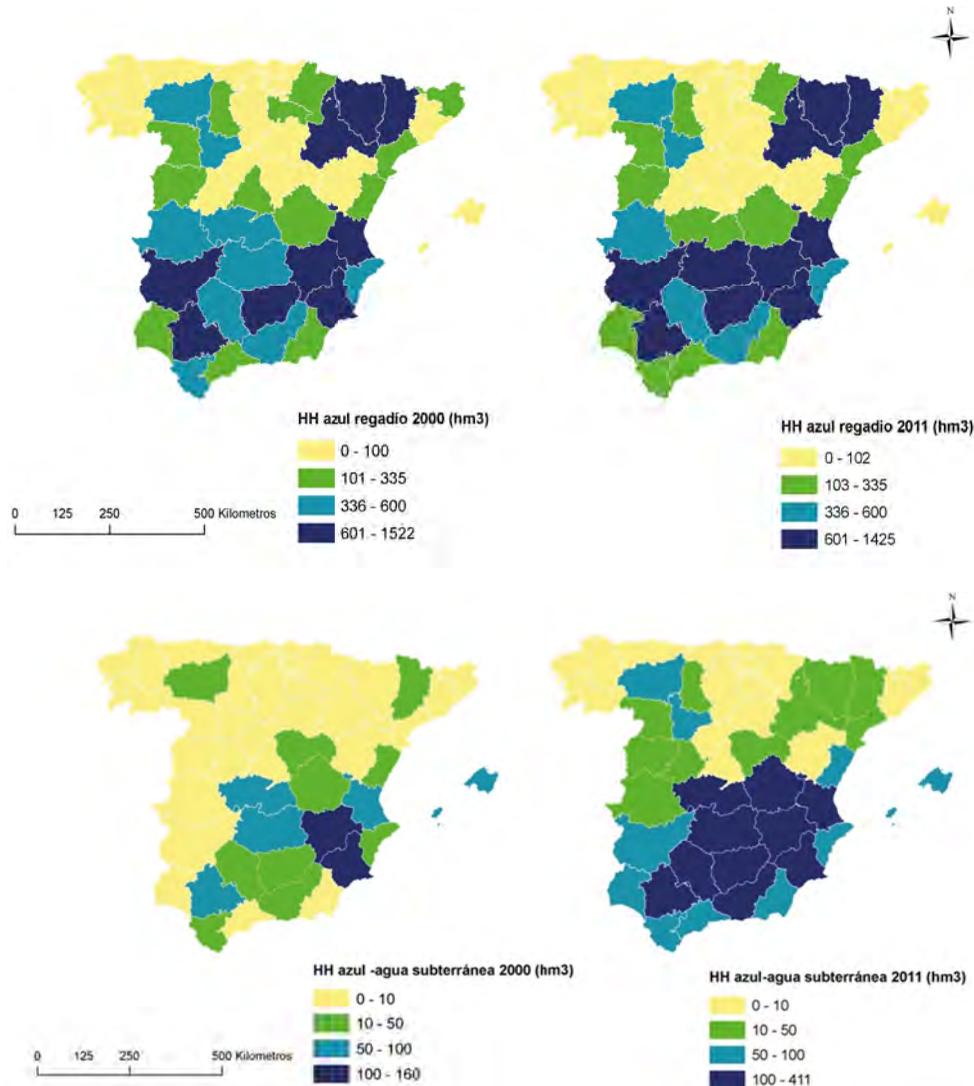
Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista territorial el consumo de aguas subterráneas se ha incrementado en buena parte de España pero especialmente en el sur y este peninsular (Figura 33). En muchas de las provincias donde la huella hídrica de aguas subterráneas en 2011 era elevada, también

<sup>13</sup> Tal y como se describen en los métodos el análisis de huella hídrica del regadío que aquí se presenta sólo afecta a las superficies de regadío al aire libre, quedando excluidos los regadíos bajo plástico de este estudio.

presentaban un consumo alto de aguas superficiales en el año 2000, lo que confirma el cambio del sistema riego en las principales zonas productoras del país.

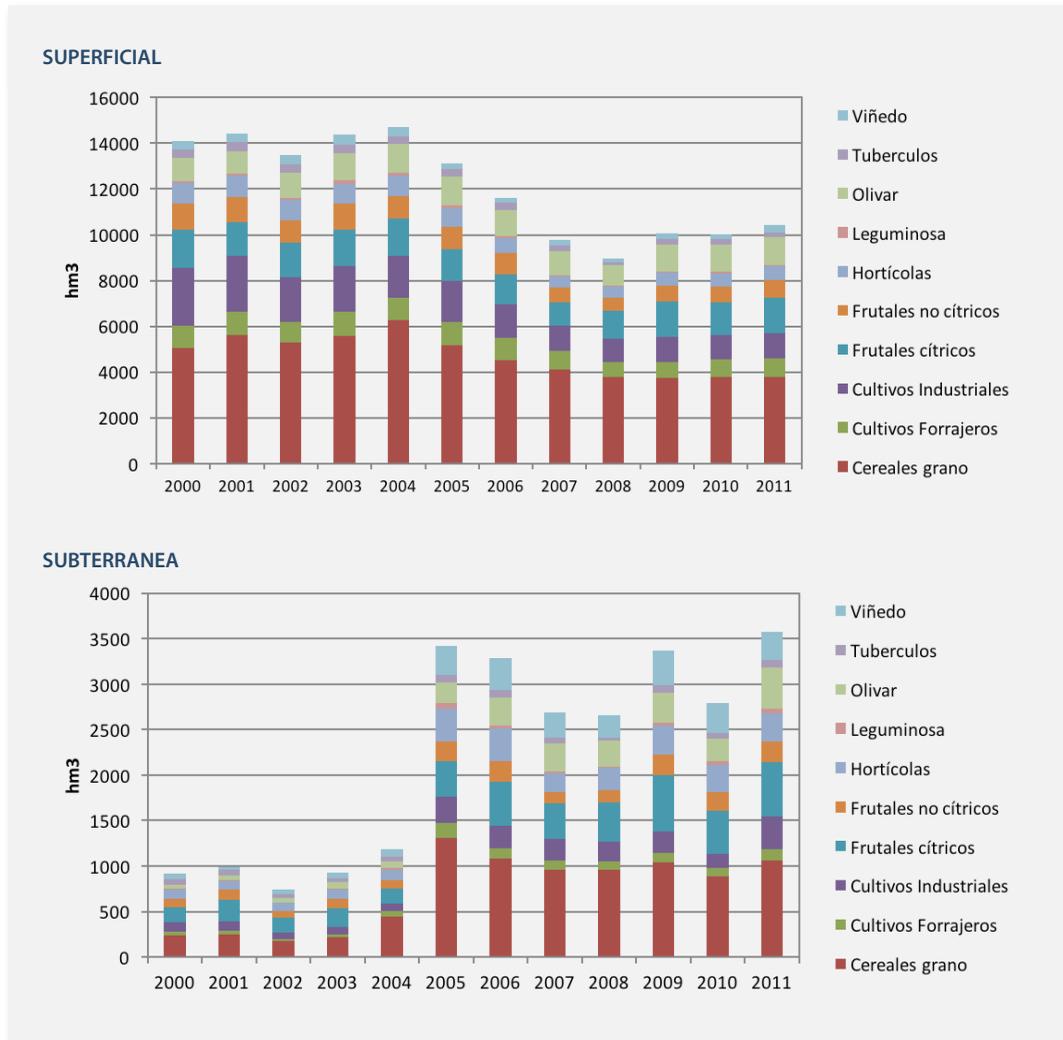
Figura 33. Huella hídrica de aguas superficiales y subterráneas en España en 2000 y 2011



Fuente: Elaboración propia.

Cuando se analiza la composición de la huella hídrica azul por grupos de cultivos se confirma la tendencia generalizada de sustitución de los regadíos de aguas superficiales por aguas subterráneas, sobre todo a partir del año 2005 (Figura 34).

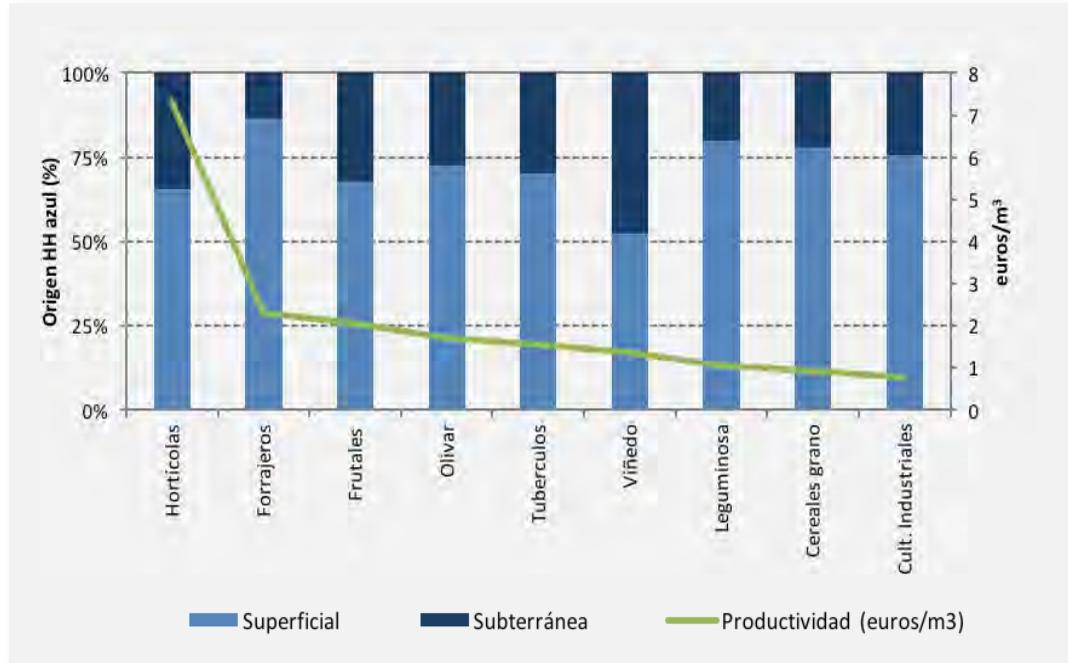
**Figura 34. Evolución de la huella hídrica azul superficial y subterránea por tipos de cultivos, periodo 2000-2011**



Fuente: Elaboración propia.

A pesar del incremento generalizado del uso de aguas subterráneas en los distintos grupos de cultivos, la proporción de huella hídrica de aguas subterráneas tiende a ser mayor en los cultivos de alto valor económico como el viñedo, los hortícolas, tubérculos y olivar (Figura 35).

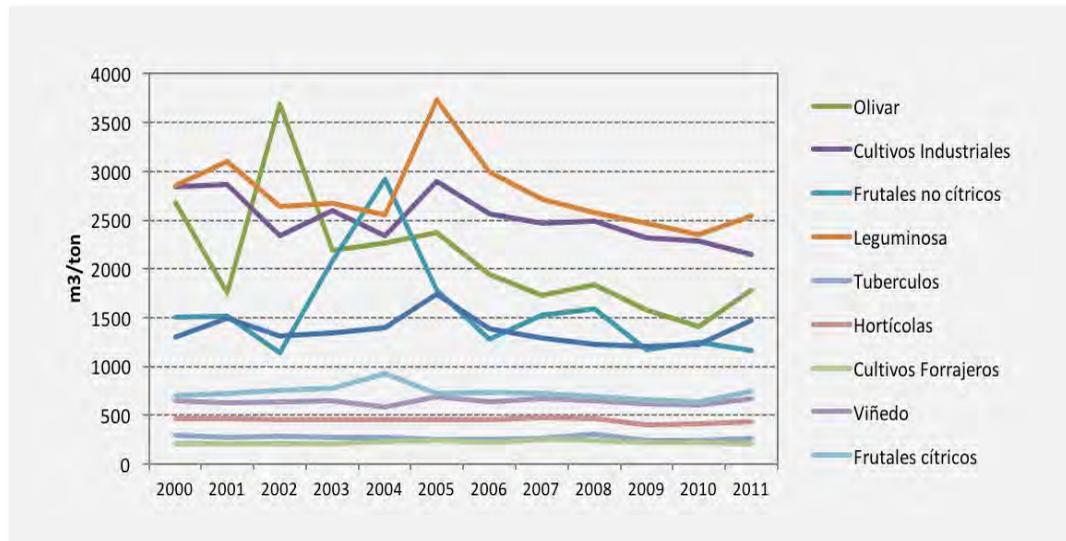
Figura 35. Composición de la huella hídrica azul de los regadíos al aire libre en España y productividad económica del agua de riego (euros/m<sup>3</sup>), año 2011



Nota: Los datos económicos se refieren al valor de producción en precios básicos. La productividad de los cultivos hortícolas está calculada sobre la base del valor de producción agregado de regadíos al aire libre y bajo plástico. Fuente: Elaboración propia con datos de MAGRAMA (2015a,b).

Desde el punto de vista de la eficiencia en el uso del agua, el consumo de agua azul, como se describe antes, se ha reducido un 7% en términos absolutos. En términos relativos ( $m^3/t$ ) también ha mejorado la productividad de diversos regadíos, especialmente del olivar (+34%), de los cultivos industriales (+24%) y leguminosas (+11%) (Figura 36).

**Figura 36. Productividad ( $m^3/ton$ ) de los cultivos de regadío al aire libre en España, periodo 2000-2010**



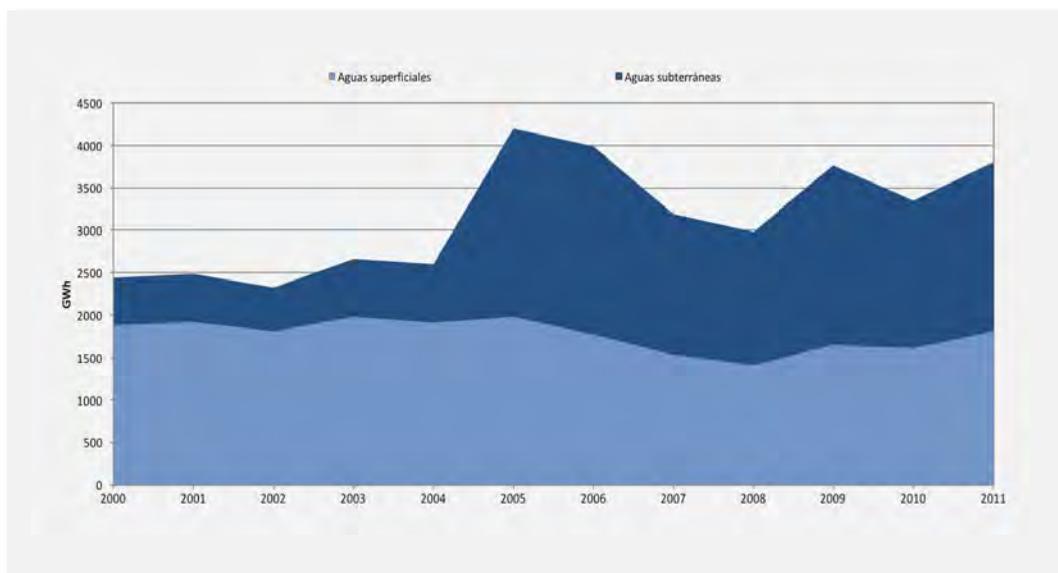
Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la huella hídrica de la agricultura de secano y regadío al aire libre en España se ha mantenido relativamente estable en el transcurso del tiempo. Las variaciones en el consumo de agua de los cultivos de secano durante el periodo de estudio se deben principalmente a la variabilidad climática interanual registrada, por encima de las mejoras en rendimientos que han experimentado algunos cultivos. En el caso de los regadíos, a pesar del aumento de la superficie regada, el consumo total de agua ha disminuido ligeramente y se puede atribuir al aumento de la productividad de cultivos como el olivar o los cultivos industriales. Cabe destacar que durante este periodo se inicia la gran conversión del regadío en España, y el inicio de la explotación a gran escala de las aguas subterráneas que comienzan a sustituir en muchos casos a los regadíos de aguas superficiales. Los regadíos con aguas subterráneas se destinan fundamentalmente a la producción de cultivos de alto valor económico.

### 3.1.3.3 Huella energética del riego

Los cambios que el sector agrícola ha experimentado entre el año 2000 y 2011 en relación con el desarrollo de nuevos regadíos y las mejoras en eficiencia han venido acompañadas de un incremento del consumo de energía asociado al riego del 56% (Figura 37). En términos absolutos este aumento supone que en el año 2000 el consumo eléctrico de los regadíos al aire libre ascendía a 2.442 GWh y en 2011 se ha incrementado hasta los 3.800 GWh. La mayor parte de incremento se debe al consumo eléctrico asociado al riego con aguas subterráneas, que se ha multiplicado casi por tres veces y media en tan sólo 11 años (de 560 a 1.996 GWh). Si bien el riego con aguas subterráneas en el año 2000 apenas representaba el 23% del consumo eléctrico total, en 2011 pasó a representar el 52%. Por otra parte, el consumo eléctrico asociado al riego con aguas superficiales se ha reducido un 4% entre 2000 y 2011, pasando de 1.880 GWh a 1.810 GWh. Tal y como se aprecia en la Figura 38, en el año 2005 se alcanza el pico de consumo máximo, y a partir de ese momento vuelven a estabilizarse los consumos, aunque no logran volver a los niveles previos a 2005.

Figura 37. Evolución del consumo de energía del riego en España, periodo 2000-2011

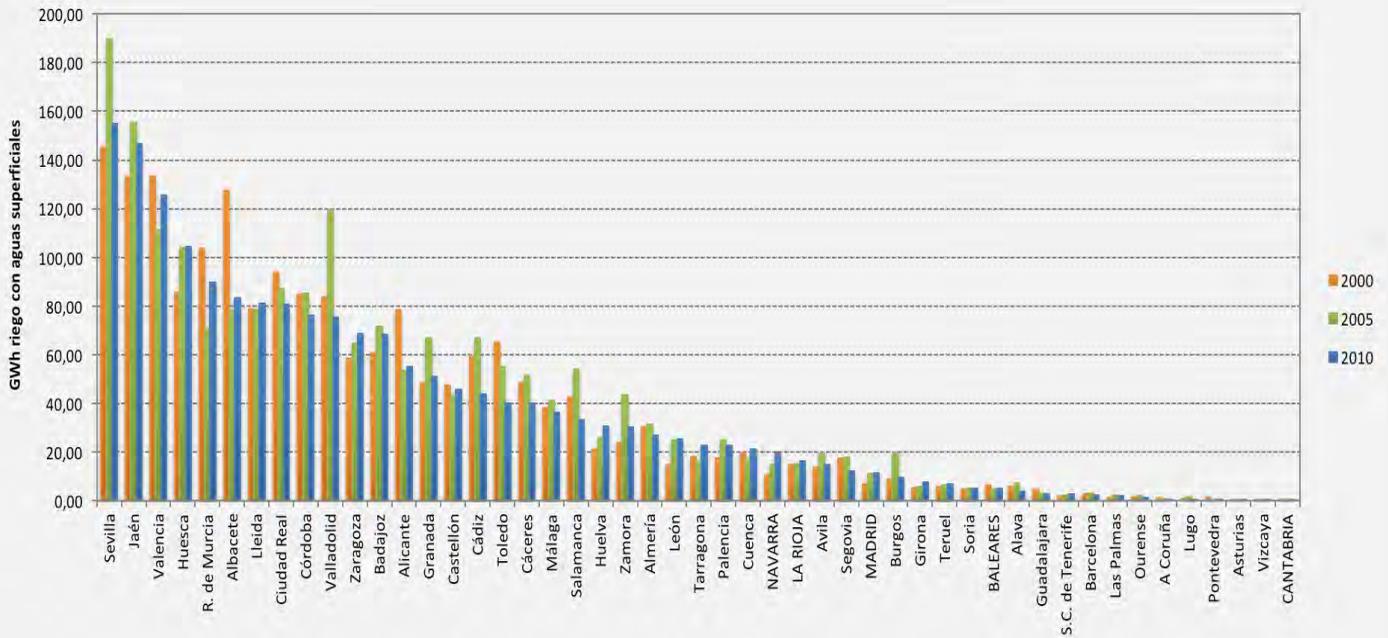


Fuente: elaboración propia

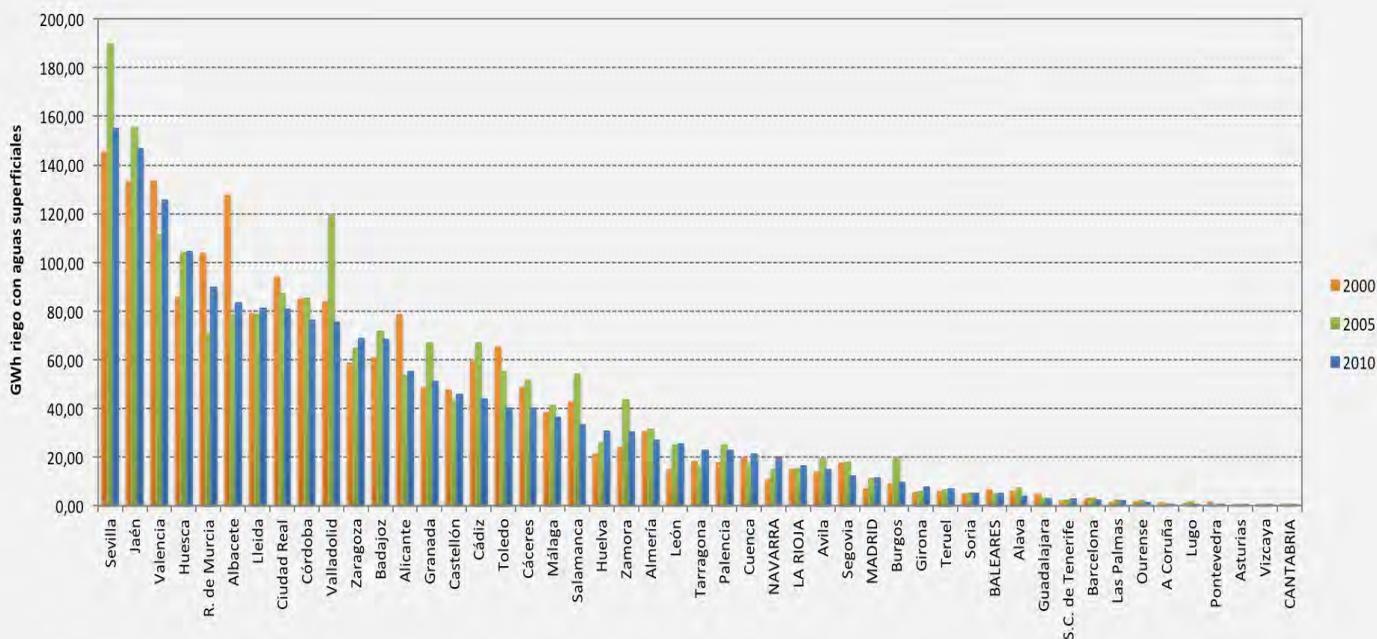


■ índice

Cuando se analiza la evolución del consumo eléctrico por provincias se observa que las provincias que mayor consumo tienen asociado al uso de aguas superficiales son Sevilla, Jaén y Valencia (Figura 38). En menor medida, Huesca, Murcia, Albacete, Ciudad Real, Córdoba, Valladolid y Zaragoza. Estas provincias conjuntamente suman el 60% de la factura anual total de 2011. En relación al consumo de energía con aguas subterráneas las provincias que tienen la mayor factura energética son Murcia, Albacete, Jaén y Ciudad Real. Estas cuatro provincias acumulan el 54% del consumo total de energía asociada al riego en 2011.



**Figura 38. Evolución del consumo de energía eléctrica (GWh) asociada al bombeo y riego en parcela con aguas superficiales y subterráneas en las distintas provincias de España, años 2000, 2005, 2010**

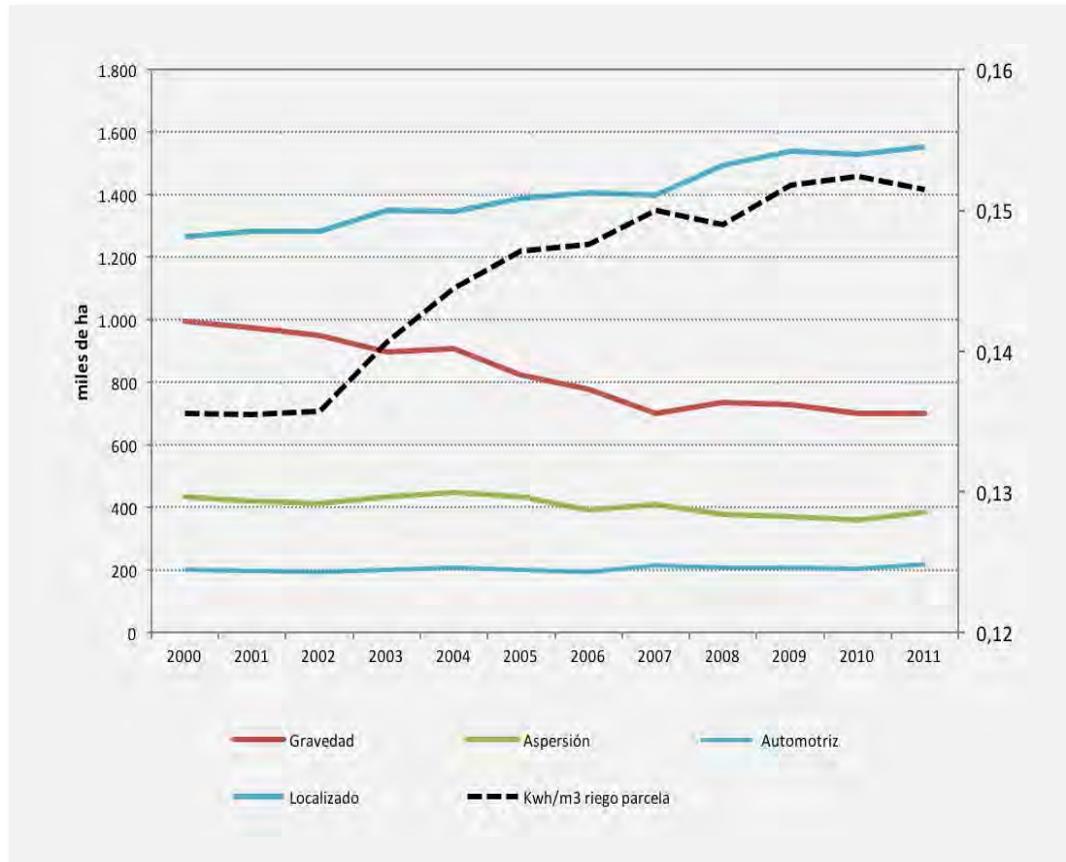


Fuente: elaboración propia

Existen varios factores que explican la evolución y transformación del modelo energético en el regadío de España. Por un lado, los planes de modernización de regadíos que, si bien fueron concebidos con la finalidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, han tenido efectos negativos colaterales, entre ellos un aumento del gasto energético asociado al riego. La progresiva sustitución del regadío de gravedad por sistema de riego a presión a través de conducciones en carga, y la implantación de sistemas de riego por aspersión o localizados, conllevan un aumento del consumo energético de hasta 0,20 kWh/m<sup>3</sup> (Hardy y Garrido, 2010). Tal y como muestra la Figura 42, entre 2000 y 2011 los regadíos al aire libre con riego localizado han

aumentado un 23% (equivalente a 286.000 ha), y los que disponen de riego automotriz también han experimentado un incremento del 9% (equivalente a 18.000 ha). Esta modernización ha contribuido a aumentar el gasto energético ligado a la distribución de agua en la parcela en torno a un 12%, pasando de 0,14 kWh/m<sup>3</sup> a 0,15 kWh/m<sup>3</sup> (Figura 39) según nuestras estimaciones.

**Figura 39. Transformación de los sistemas de riego en España entre 2000 y 2011 y evolución del consumo eléctrico (kWh/m<sup>3</sup>) asociado al riego en parcela**



Fuente: elaboración propia con datos de Corominas (2010), Hardy y Garrido (2010) y MAGRAMA (2015c).

Además de la modernización del riego en parcela, la explotación creciente de las aguas subterráneas también constituye un factor determinante a la hora de explicar el significativo incremento del gasto eléctrico desde comienzos del siglo XXI. Como se describe anteriormente, la sequía de 2005 marco el inicio de la explotación de las aguas subterráneas a gran escala. La conversión de regadíos dependientes de aguas superficiales a subterráneas ha contribuido a aumentar la fiabilidad de acceso al recurso para muchos agricultores, pero al mismo tiempo también ha aumentado considerablemente los costes de captación y bombeo (Tabla 15). El coste de bombeo (kWh/m<sup>3</sup>) de aguas subterráneas es en promedio casi cuatro veces superior al coste de captación y bombeo de aguas superficiales, y representa entre el 70 y el 77% del coste eléctrico total dependiendo del año.

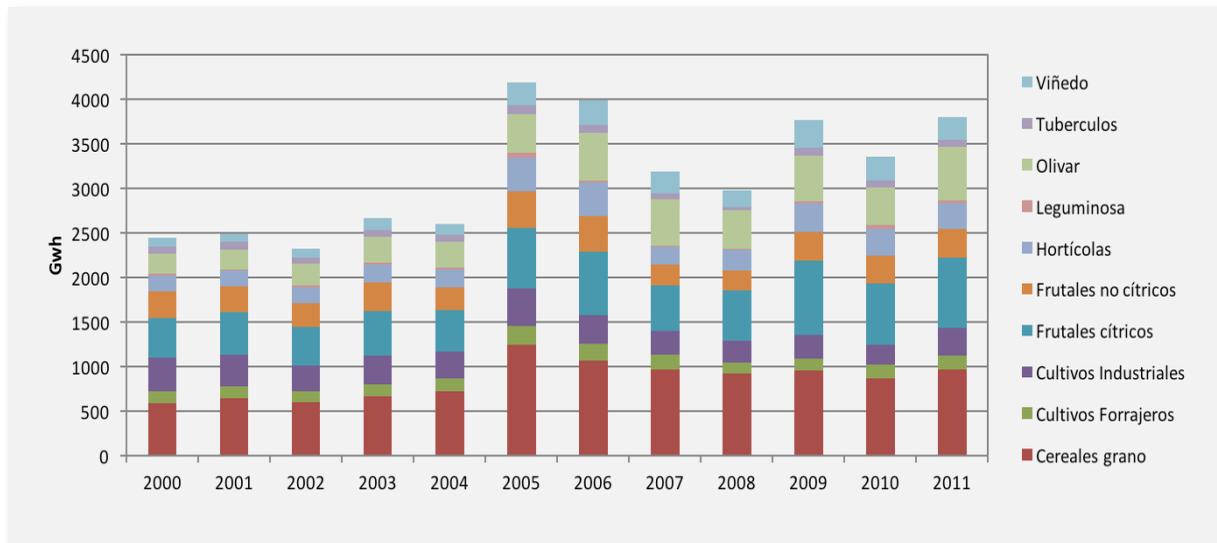
**Tabla 15. Evolución de coste unitario (kWh/m<sup>3</sup>) de captación y bombeo de aguas superficiales y subterráneas entre 2000 y 2011**

Año	Aguas superficiales				Aguas subterráneas			
	kWh/m <sup>3</sup> bombeo	Riego parcela (GWh)	Bombeo (GWh)	% coste bombeo	kWh/m <sup>3</sup> bombeo	Riego parcela (GWh)	Bombeo (GWh)	% coste bombeo
2000	0,06	1.812	35	1,9	0,26	150	410	73,2
2001	0,06	1.841	37	1,9	0,27	150	424	73,8
2002	0,06	1.748	39	2,2	0,29	123	399	76,5
2003	0,06	1.906	39	2,0	0,28	155	530	77,4
2004	0,06	1.827	39	2,1	0,29	168	525	75,7
2005	0,06	1.720	40	2,3	0,30	562	1.659	74,7
2006	0,07	1.508	40	2,6	0,30	559	1.662	74,8
2007	0,07	1.321	40	3,0	0,30	451	1.206	72,8
2008	0,07	1.197	40	3,2	0,29	447	1.126	71,6
2009	0,07	1.376	38	2,7	0,28	562	1.559	73,5
2010	0,07	1.377	38	2,7	0,27	476	1.269	72,7
2011	0,07	1.520	37	2,3	0,27	597	1.399	70,1

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los consumos de energía por tipos de cultivos (Figura 40), se aprecia que la mayor parte de la factura eléctrica está asociada al riego de cereales de grano, los frutales cítricos y el olivar. Estos tres grupos de cultivos representan el 60% de la factura energética del regadío en España y son también los que más han visto aumentado su consumo desde el año 2000. El caso del olivar es particularmente llamativo, dado que el consumo de energía para riego se ha incrementado en un 169% (de 222 GWh en el año 2000 y 598 GWh en 2011).

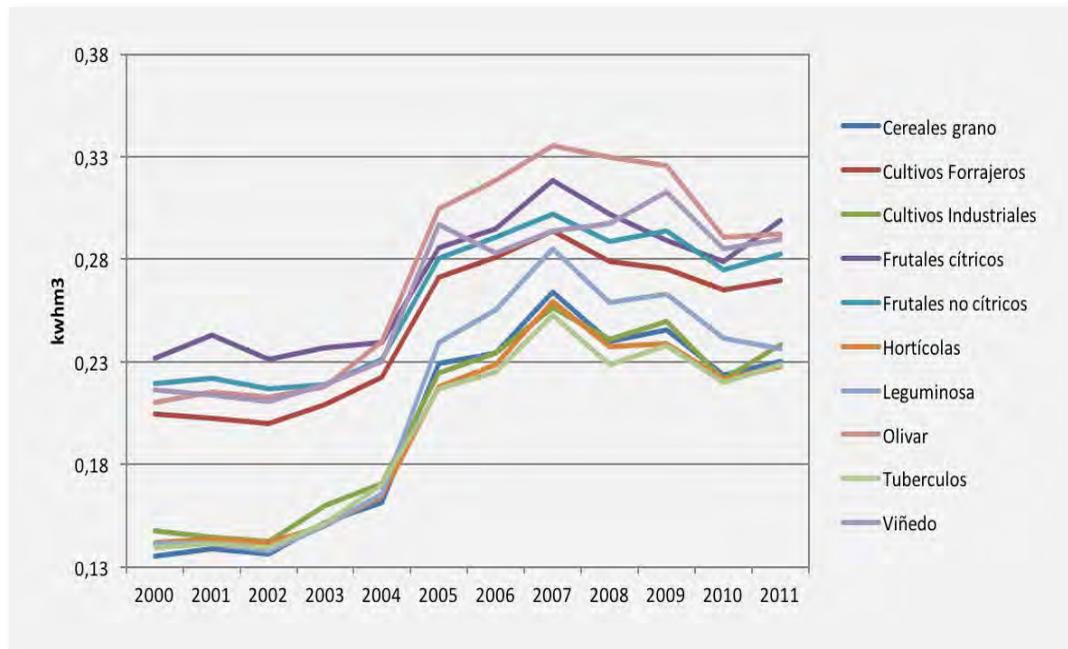
**Figura 40. Evolución del consumo de energía asociado al riego para los grandes cultivos en España, periodo 2000-2011**



Fuente: Elaboración propia

El aumento de la factura energética asociada a la modernización y uso de aguas subterráneas, ha contribuido a aumentar el coste unitario para todos los cultivos, pero especialmente en el olivar (+39%), viñedo (34%) y en los frutales cítricos y no cítricos (+29% en ambos casos) (Figura 41).

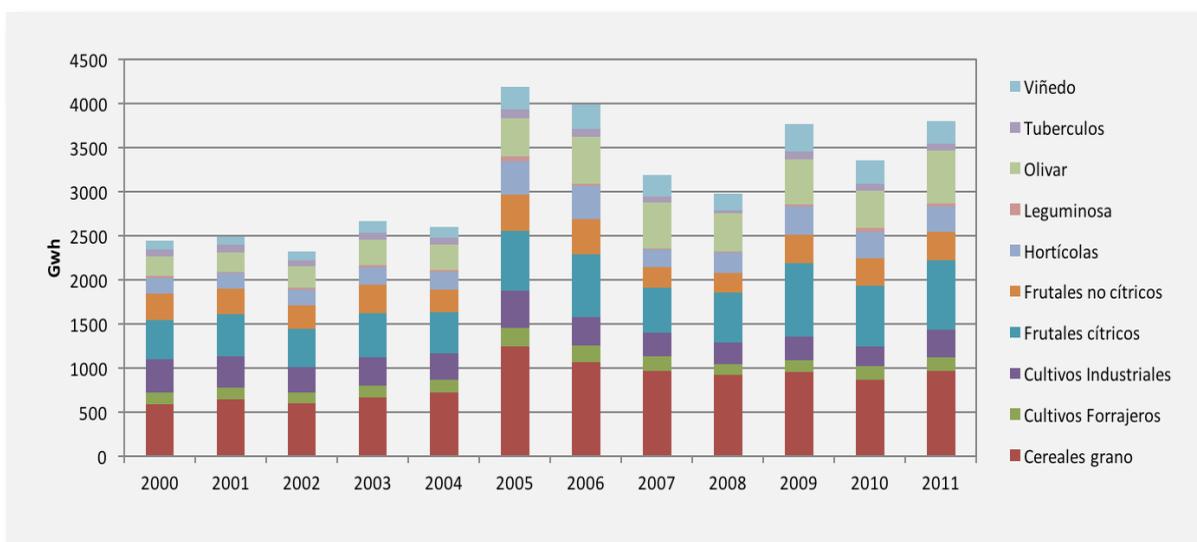
**Figura 41. Evolución del gasto energético (kWh/m<sup>3</sup>) de los principales grupos de cultivos en España, periodo 2000-2011**



Fuente: Elaboración propia

Cuando se analizan los consumos relativos por tonelada producida se observa que las mejoras en los rendimientos han logrado compensar en parte el incremento de consumo energético para muchos de los cultivos, excepto para las leguminosas que han visto incrementado su consumo energético en un 22% (de 364 kWh/t a 442kWh/t). El olivar es otro ejemplo de cultivo donde el consumo de energía ha aumentado a un ritmo mayor que las mejoras en rendimientos (Figura 42).

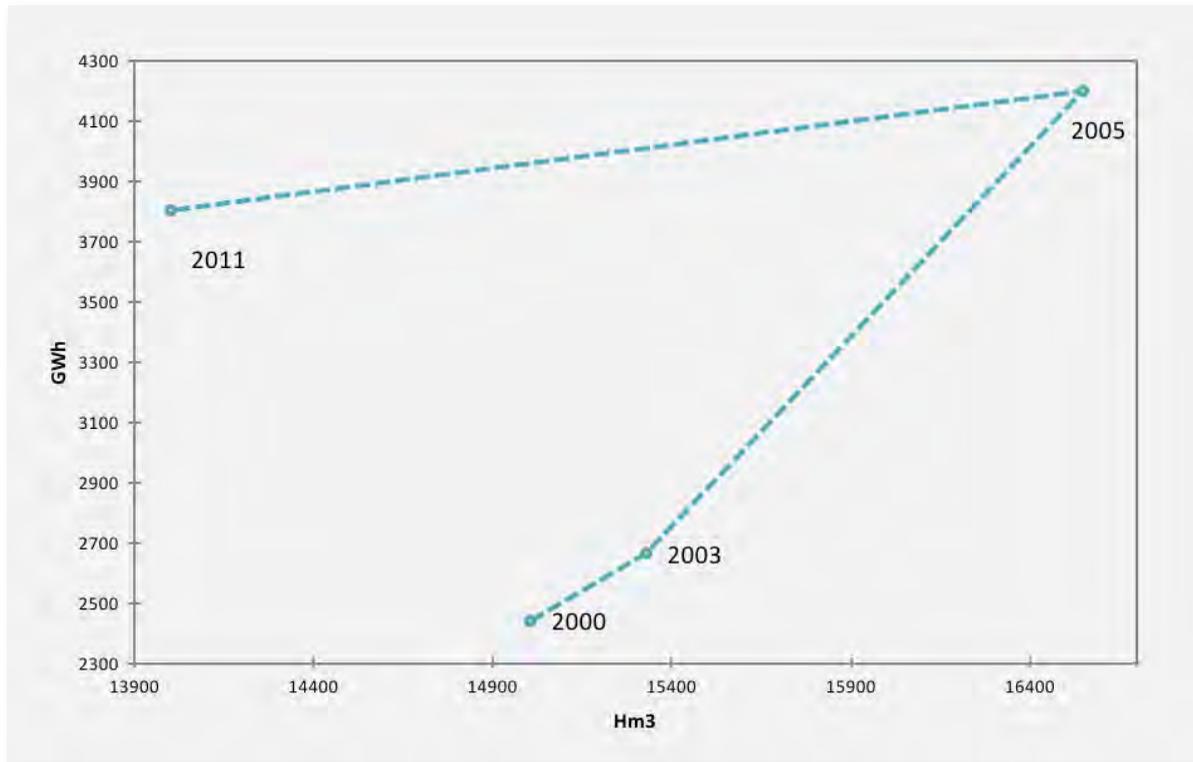
**Figura 42. Evolución relativa de los consumos energéticos (kWh/t) para grandes grupos de cultivos en España, periodo 2000-2011**



Fuente: Elaboración propia

En términos absolutos entre 2000 y 2011 el consumo de agua en el regadío ha disminuido un 6,7% y el consumo de energía ha aumentado un 56% (Figura 43). En síntesis se puede concluir que a lo largo de la primera década del siglo XXI el sector agrícola español ha continuado la senda de su modernización iniciada a lo largo del siglo pasado, y gracias a la cual se ha fomentado cada vez más el desacoplamiento entre producción y uso de recursos hídricos y territoriales. Sin embargo, esta tecnificación e intensificación de la agricultura ha traído consigo un incremento sustancial del gasto energético, con el consiguiente aumento de los costes de producción para el agricultor. Y es probablemente este aumento del coste económico, lo que ha tenido un efecto disuasorio y ha contribuido a reducir el consumo de energía desde el pico alcanzado en 2005.

Figura 43. Evolución del consumo de agua (hm<sup>3</sup>) y energía (GWh) en los regadíos al aire libre en España



### 3.1.4 Conclusiones

Las transformaciones de la agricultura sucintamente descritas en los epígrafes anteriores han supuesto cambios importantes en el uso de la tierra, el agua y la energía. Se ha reducido la huella territorial de la producción vegetal agraria de manera significativa. Habría que imputar el impacto en necesidades de huella territorial del sector ganadero, pero es probable que haya descendido también, por el descenso significativo de las cabañas de ovino, caprino y de vacuno de leche y de carne, y la estabilización de la cabaña porcina y avícola.

La huella hídrica ha descendido también en su vertiente más importante de agua azul, siendo la componente verde de menor importancia y totalmente vinculada a las precipitaciones, y por tanto muy variables a lo largo del período estudiado.

Mirados conjuntamente, ambos resultados, los de la huella de agua y territorial, unidos a los ligeros aumentos de productividad, suponen que por unidad de producto la agricultura ha seguido una clara evolución positiva. Durante el periodo estudiado, la eficiencia en el uso del agua y la tierra han aumentado un 9,2% y un 6,3%, respectivamente.

Sin embargo, son también evidentes, por un lado, el intercambio de aguas superficiales por subterráneas, y por otro, el consiguiente aumento de las necesidades energéticas de la agricultura de regadío. Este resultado no es independiente del anterior: la mejora en la productividad de agua y tierra viene determinada por la transformación del regadío en las superficies de los cultivos, en las técnicas de riego, en los sistemas de distribución del agua en las zonas regables (transformación del regadío), y un aumento del uso de las aguas subterráneas que, obviamente, requieren la energía del bombeo. Indudablemente, una parte de los usos de aguas subterráneas son asimilables a minería de recursos no renovables o recuperables a lo largo de periodos extensos<sup>14</sup>. Pero sin duda el porcentaje más elevado se refiere a la sustitución de aguas superficiales por subterráneas. Desde el punto de vista energético, el consumo energético ha aumentado un 56%, y la eficiencia en el uso de la energía ha disminuido un 28%.

Por último, un factor que a buen seguro ha tenido un efecto disuasorio del consumo en el regadío ha sido el encarecimiento de la energía. Muchos autores han estudiado el efecto de la reforma del sector eléctrico de 2010, que eliminó las bonificaciones sobre el sector del riego y encareciendo tanto el término de potencia como el coste del kWh (Hardy et al. 2012). El hecho cierto es que el consumo de energía tuvo y ha tenido el mismo impacto que una tarifa volumétrica sobre el consumo de agua. Además, los datos muestran el súbito aumento de la huella energética de los productos en los años 2004 al 2007, coincidiendo con el fuerte ritmo de modernización de regadíos y con el cambio de regulación del sector eléctrico, y su posterior ajuste y estabilización tras 2008. Es sin duda un cambio de régimen notable y muy marcado.

Podemos concluir, finalmente, que la agricultura española ha seguido una senda desde 2000 en la que los abastecimientos de agua y energía han ido cambiando a un fuerte ritmo hasta 2006 y posteriormente ha seguido disminuyendo el consumo de agua, y muy ligeramente el consumo de energía, motivado por el encarecimiento notable de la energía para el sector. Posteriores disminuciones del consumo de energía por hectárea y por metro cúbico empleado se pueden lograr y se están logrando mediante auditorías energéticas, optimización de redes y sistemas de impulsión y una mejor gestión.

14 Proyecto "Minería de Aguas Subterráneas en España" Custodio (2015).

## 3.2 BALANCE DE EMISIONES Y CONSUMOS DE ENERGÍA FÓSIL DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN ESPAÑA

### 3.2.1 Introducción y objetivos

La agricultura en España supuso en 2013 el 14% del total de emisiones de gases de efecto invernadero según los datos publicados en el Inventario Nacional de Emisiones (MAGRAMA, 2015), con unas emisiones totales en 40.218,84 kt de CO<sub>2</sub> equivalente. Según los datos del inventario, la evolución de este sector está básicamente determinada por las emisiones de CH<sub>4</sub> procedentes de la fermentación entérica, pero también por las de N<sub>2</sub>O de suelos agrícolas. No están incluidas en este inventario las emisiones originadas en otros sectores que surten de insumos al sector agrícola, como podrían ser las empresas de fabricación de fertilizantes y las refinerías que producen el combustible diésel utilizado en la maquinaria agrícola, así como las emisiones directas de la combustión. Resulta interesante conocer, por tanto, las emisiones que directa e indirectamente son atribuibles al sector agrícola, lo que dará una medida clara del peso de este sector en el inventario total del país. Asimismo, el análisis de la importancia de las distintas actividades en las emisiones finales de GEI producidas y en los consumos energéticos totales permitirá diseñar de forma más eficiente y efectiva políticas de mitigación orientadas a este sector.

Coherente con lo anterior, en este estudio, se analizan a partir de la metodología del análisis del ciclo de vida, los impactos asociados a la producción agrícola de los principales cultivos en España y su evolución durante el periodo 2000-2011 en términos relativos (por unidad de producto y superficie cosechada) y absolutos. Este análisis se aborda, además, con el convencimiento de aportar conocimiento relevante sobre las relaciones entre los componentes del nexa AET.

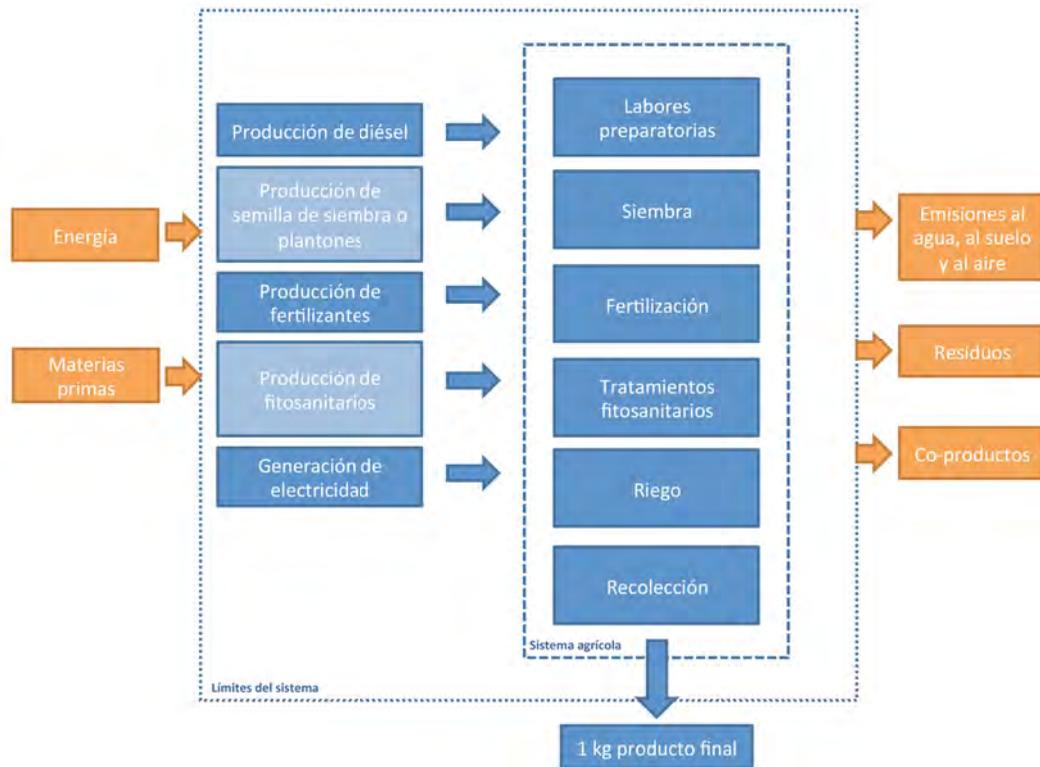
### 3.2.2 Datos, enfoque metodológico y limitaciones del estudio

#### 3.2.2.1 Metodología

Como se ha expresado, la caracterización del balance de emisiones de gases de efecto invernadero y el cálculo del consumo agregado de energía fósil en el ciclo de vida de los cultivos se realiza a continuación utilizando el ACV, cuya descripción general se incluye en el Anexo III.

La Figura 44 muestra los límites del sistema analizado y los procesos incluidos dentro del mismo. El sistema agrícola, mostrado en el recuadro interior, comprende las actividades realizadas en campo tales como las labores preparatorias del suelo, la siembra, la aplicación de fertilizantes y los tratamientos fitosanitarios. Asimismo se incluyen los procesos de recolección.

**Figura 44: Límites del sistema analizado para evaluar la eficiencia de la producción agrícola en España desde la perspectiva del ACV**



Fuente: elaboración propia

El sistema analizado incluye los procesos de producción de todos los insumos necesarios en la actividad agrícola como son: el combustible diésel para la maquinaria utilizada, los fertilizantes aplicados, el material de siembra o plantación, los productos fitosanitarios y la electricidad necesaria para el riego.

Los bloques señalados en color más claro representan los procesos para los que no ha sido posible recopilar datos y por tanto se han excluido del análisis. De otros ACV publicados sobre cultivos agrícolas se desprende que estos procesos no tienen una relevancia importante en los resultados por lo que su exclusión no invalida las conclusiones de este estudio (IDAE, 2011).

Fuera de los límites del sistema, y por tanto no incluidos en este análisis, quedan la fabricación de las infraestructuras agrícolas (ej. naves para el resguardo de la maquinaria y las bombas e infraestructuras de riego, etc) y algunos insumos menores como aceite lubricante o envases.

Algunos de los sistemas agrícolas analizados dan lugar a co-productos tales como la paja de cereales o leguminosas que por tener un uso y un valor económico no pueden considerarse residuos. De acuerdo a la metodología de ACV, deberíamos asignar parte de los impactos ocasionados entre el producto principal (grano) y el co-producto (paja), pero en este estudio, al estar interesados en los impactos globales de la agricultura, no se ha realizado ningún tipo de asignación.

### **3.2.2.2 Datos de entrada agrícolas**

En la medida de lo posible se han recopilado datos que permitan analizar la evolución temporal de los principales parámetros. La información sobre superficies y producciones se ha obtenido del Anuario de Estadísticas Agrarias (MAGRAMA, 2015a), y se refiere a datos provinciales para la serie 2000-2011. Las necesidades de fertilización se refieren a la dosis de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O recomendada por tonelada cosechada, y se han obtenido del manual de fertilización racional de los cultivos en España (García-Serrano et al., 2010) y del manual de cultivos herbáceos extensivos (García, 1999). En el Anexo VIII se resumen las necesidades promedio que se han asignado a los distintos cultivos.

Las necesidades de energía para riego se han obtenido de los resultados de huella energética detallados en el apartado 3.1.3.3. El uso de combustible en las labores agrícolas de los distintos cultivos analizados se ha tomado del estudio de Indicadores de Sostenibilidad de la agricultura y ganadería españolas (Garrido, 2012) que proporciona datos para varios cultivos en el periodo 2000-2009 y del informe de resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas por comunidades autónomas del MAGRAMA (MAGRAMA, 2013) que proporciona datos en el periodo 2000-2013.

Para los cultivos de los que no se disponía de datos en estas fuentes como son el algodón, la colza, las leguminosas para grano, la patata y el triticale, se han buscado fuentes de datos alternativas en la literatura (Junta de Andalucía, 2009; IDAE, 2011; de Juan Valero, 2003; Fernández Alcázar, 2012)

### **3.2.2.3 Análisis de inventario y factores de impacto**

A continuación se detallan los procedimientos de cálculo y las hipótesis realizadas en el ACV de los cultivos analizados, así como los factores de impacto de los principales insumos (Tabla 16). Los factores de impacto en este caso de estudio se refieren a las emisiones y consumos de energía fósil derivadas de la producción y uso de los distintos insumos agrícolas.

Para la realización de este estudio, y teniendo en cuenta su objetivo y alcance, se han analizado los impactos sobre el cambio climático y la demanda agregada de energía fósil y para ello se han utilizado los métodos de evaluación recomendados por la Comisión Europea (EC,2011).

**Tabla 16. Categorías de impacto consideradas**

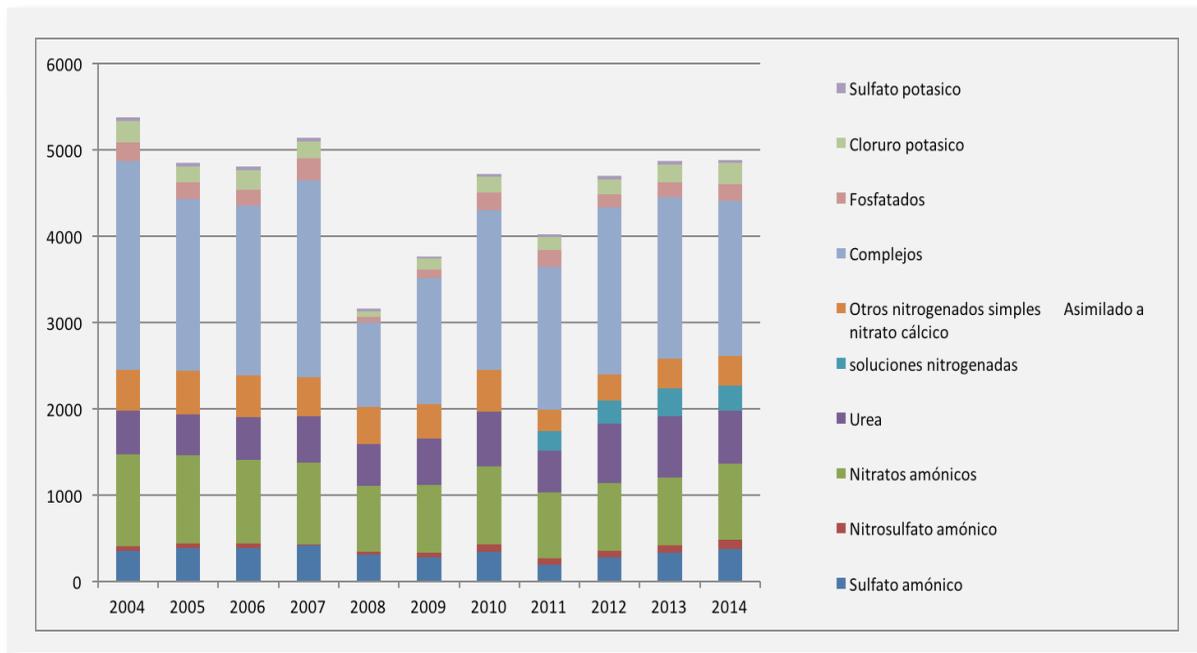
CATEGORÍA	MÉTODO	INDICADOR	UNIDAD
Cambio Climático	Modelo de referencia de 100 años del IPCC	Potencial de calentamiento global	kg CO2 eq
Demanda de Energía Fósil	Ecoinvent	Energía no renovable, fósil	MJ de energía fósil

### **A. Emisiones de la producción de fertilizantes**

El crecimiento de un cultivo está condicionado por los aportes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) que recibe. Cada cultivo tiene unas necesidades diferentes de NPK que obtiene del suelo y sobre todo de la aplicación de fertilizantes. En el mercado existen distintos compuestos químicos para satisfacer las necesidades de NPK y cada uno de ellos tiene distintas emisiones y consumos energéticos asociados a su producción.

Con el objetivo de evaluar las emisiones y el uso de energía asociados a la producción de fertilizantes de los grandes cultivos en España para la serie 2000-2011, se han tenido en cuenta los consumos de cada tipo de producto en cada uno de los años analizados. Con este objetivo se han consultado los datos publicados por la Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes (ANFFE) (<http://www.anffe.com/>) sobre el consumo agrícola de fertilizantes, disponibles desde el año 2004 y que se muestran en la Figura 45.

Figura 45. Consumos de fertilizantes en el sector agrícola español en miles de toneladas (t)



Para el caso de los fertilizantes nitrogenados se han considerado los impactos asociados a la producción y aplicación de los más utilizados dentro del sistema agrícola español:

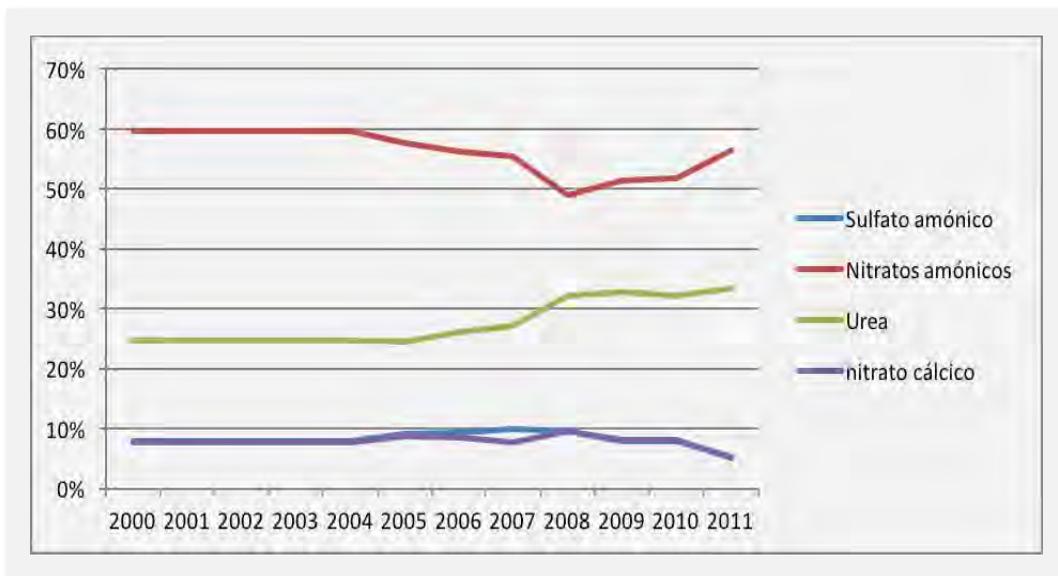
- Sulfato amónico
- Nitratos amónicos
- Urea
- Fertilizantes complejos ( se ha considerado una riqueza media del 8% en N y que este N está en forma de nitrato amónico)
- Soluciones nitrogenadas (se ha considerado que el 50% del N está en forma de nitrato amónico y el 50% en forma de urea)
- Otros nitrogenados simples que se han asimilado a nitrato cálcico

Asimismo se han considerado los impactos potenciales asociados a la producción de cloruro potásico como abono potásico y superfosfato triple como abono fosfatado.

Para evaluar los impactos asociados a la producción y aplicación de estos agroquímicos se han calculado, en primer lugar, los factores de impacto de cada uno de estos fertilizantes utilizando, para ello, la base de datos Ecoinvent v.3. Esta base ofrece un inventario detallado para cada producto, en el que se cuantifican las entradas en forma de energía y materias primas y las salidas en forma de emisiones debidas a la producción de estos fertilizantes. Asimismo, cuenta con más de 10.000 inventarios de productos y servicios, interconectados, de modo que es posible calcular los impactos de la producción de los fertilizantes analizados teniendo en cuenta todas las etapas del ciclo de vida.

Una vez calculados los factores de impacto de cada fertilizante, se ha tenido en cuenta su participación en el consumo de cada uno de ellos en el sistema agrícola español durante los últimos años. Los porcentajes anuales de cada fertilizante se muestran en la Figura 46. Para los años 2000 a 2003, para los que no se dispone de datos en ANFFE se ha considerado la misma participación de cada fertilizante que en el año 2004.

**Figura 46. Evolución temporal de la participación en el consumo de fertilizantes de cada tipo de producto**



Vemos cómo hasta 2008 ha existido una tendencia a reducir el consumo de nitratos amónicos y a aumentar el consumo de urea, tendencia que se ha revertido en los últimos años analizados con un aumento importante de los nitratos amónicos y una reducción del consumo de sulfato amónico y nitrato cálcico.

Los factores de impacto anuales representan el impacto potencial del mix de fertilizantes utilizado cada año en el sistema agrario español (Tabla 17 y Figura 47). Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos para cada composición anual. Estos factores se utilizarán posteriormente para evaluar los impactos totales del sistema, teniendo en cuenta las cantidades totales aplicadas cada año.

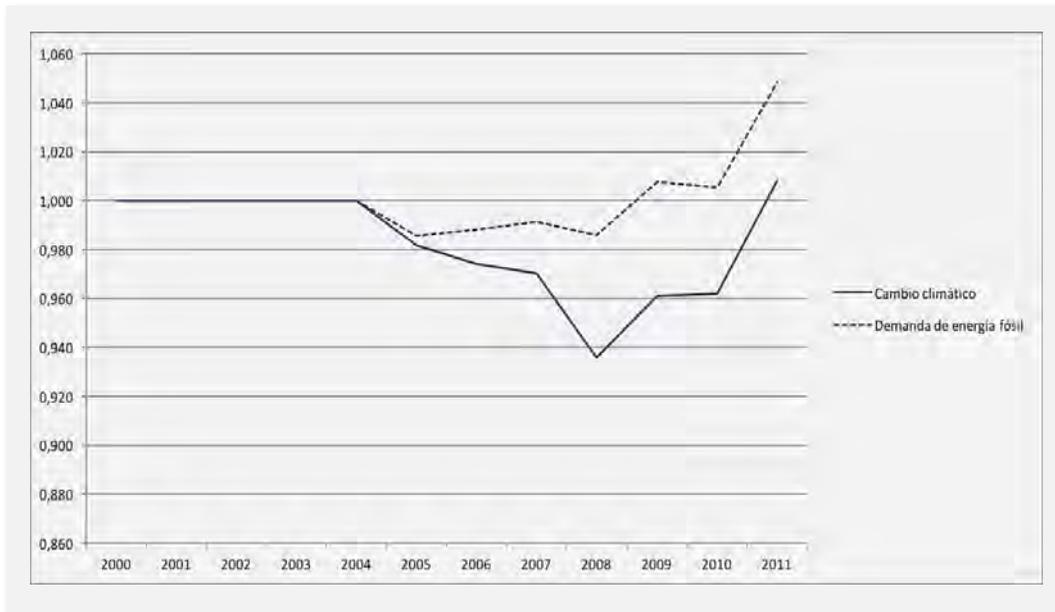
Tabla 17. Factores de impacto anuales por kilo (kg) de Nitrógeno (N)

IMPACTO	UNIDAD/kg de N	FACTORES DE IMPACTO ANUALES (2000-2005)					
		2000	2001	2002	2003	2004	2005
Cambio Climático	kg CO <sub>2</sub> eq	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,31
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	57,8

IMPACTO	UNIDAD/kg de N	FACTORES DE IMPACTO ANUALES (2006-2011)					
		2006	2007	2008	2009	2010	2011
Cambio Climático	kg CO <sub>2</sub> eq	7,26	7,23	6,97	7,16	7,16	7,51
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	58,64	58,64	58,64	58,64	58,64	57,8

Figura 47. Evolución temporal de los factores de impacto. Impacto en 2000=1



Se observa una reducción de los factores de impacto, especialmente de cambio climático, hasta el año 2008, seguido de un aumento en los últimos años motivado por el repunte en el consumo de nitratos amónicos y urea.

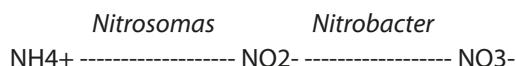
A continuación se muestran los impactos originados en la producción de los fertilizantes potásicos y fosfatados (Tabla 18). Como se puede observar, el impacto sobre el cambio climático es mucho más relevante en el caso de los fertilizantes nitrogenados que emiten alrededor de 7,5 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de N que en el caso de los fertilizantes potásicos y fosfatados que emiten alrededor de 0,6 y 1,6 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> respectivamente.

Tabla 18. Factores de impacto anuales por kg de K<sub>2</sub>O y kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

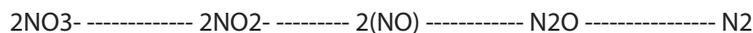
IMPACTO	UNIDAD	FACTORES DE IMPACTO	
		K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Cambio Climático	kg CO <sub>2</sub> eq	0,589	1,57
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	62,16	19,71

## B. Emisiones de N<sub>2</sub>O asociadas al uso de fertilizantes nitrogenados

En esta sección se calculan las emisiones que se producen en campo tras la aplicación de los fertilizantes nitrogenados. Tras la aplicación de estos fertilizantes, empiezan a producirse una serie de reacciones químicas en el suelo que conducen a la emisión de importantes cantidades de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) a la atmósfera. El N<sub>2</sub>O en los suelos se produce principalmente debido a la acción de los microorganismos que viven en él, mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. La nitrificación es un proceso de oxidación de amonio a nitrato, en presencia de la acción secuencial de dos bacterias aerobias de los géneros *Nitrosomas* y *Nitrobacter*.



La desnitrificación es el proceso de reducción de nitratos hasta la obtención del nitrógeno molecular en condiciones anaerobias o con baja presencia de oxígeno.



No sólo la presencia de O<sub>2</sub> influye en el proceso, sino que también es dependiente de la concentración de N y C orgánico en el suelo, de la temperatura y del pH.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno dependen tanto de los procesos de nitrificación como de los de desnitrificación, de la difusión de los gases de N<sub>2</sub>O y NO tanto a la atmósfera como en el suelo y del consumo de estos gases por parte de los organismos desnitrificantes. (Van Cleemput et al., 1994 en Teira-Estimages et al., 1998). Por lo tanto, la emisión de estos gases depende de complejas relaciones entre los procesos de producción, los de su consumo y la difusión dentro del suelo y a la atmósfera.

Los factores que influyen en estos procesos, y por lo tanto, en la producción de N<sub>2</sub>O, son principalmente el clima, el tipo de suelo y las prácticas agrícolas (Skiba et al., 1997). En general se admite que en condiciones de elevada pluviosidad, pobre drenaje y alto contenido en carbono orgánico, se promueven la desnitrificación y las emisiones asociadas de N<sub>2</sub>O y NO. En áreas de baja pluviometría y suelos bien drenados y aireados se favorece la nitrificación y su producción asociada de N<sub>2</sub>O y NO.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) establece una metodología general para estimar las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) desde los suelos agrícolas procedente de las adiciones de nitrógeno a los mismos y que incluye las emisiones indirectas originadas por deposición y lixiviación (IPCC, 2006). La metodología, como es usual en los métodos del IPCC, se estructura en tres niveles (Tiers) cada uno de los cuales tiene distintas necesidades de información.

La metodología Tier 1 propuesta por el IPCC es la adoptada en este estudio para estimar las emisiones de  $N_2O$  desde el suelo tras la aplicación de los fertilizantes. Esta metodología no tiene en cuenta diferencias en la cobertura del suelo, tipo de suelo, condiciones climáticas o de cultivo a la hora de recomendar factores de emisión.

La metodología incluye las siguientes fuentes de N:

- Fertilizantes nitrogenados sintéticos (FSN)
- Fertilizantes nitrogenados orgánicos (FON)
- N de restos de cosechas (FCR)
- Residuos animales depositados en los pastos por el ganado (FPRP)
- N mineralizado asociado a la pérdida de materia orgánica del suelo por cambio de uso del suelo (FSOM)
- Cultivo de suelos orgánicos (FOS)

De todas estas categorías sólo los FSN y los FCR son de aplicación en este estudio. El cálculo de los restos de cosechas se ha realizado siguiendo la aproximación propuesta en esta metodología general del IPCC.

Siguiendo esta metodología, y teniendo en cuenta tanto las emisiones directas como las indirectas, resultan los siguientes factores agregados:

- para la fertilización mineral, el factor de emisión sería de 1,325%
- para los restos de cosechas, el factor de emisión sería de 1,225%.

De esta forma, tras la aplicación del fertilizante nitrogenado, por cada kg de N aplicado se emiten a la atmósfera 0,01325 kg de N en forma de  $N_2O$ . El N contenido en los restos de cosechas que quedan en campo da lugar también a la emisión de 0,01225 kg de  $N_2O$  por cada kg de N contenido en estos restos.

### **C. Emisiones de $CO_2$ por hidrólisis de la urea utilizada en fertilización**

También se han calculado las emisiones de  $CO_2$  procedentes de la aplicación de la urea, que de acuerdo con la metodología del IPCC se pueden estimar a través de la siguiente fórmula:

Emisiones de CO<sub>2</sub> (t C) = Urea aplicada (t urea/ha) \* FE (t C/ t urea)

Dónde FE es un factor de emisión cuyo valor por defecto es 0,20 para la urea.

#### D. Emisiones del uso de combustible en las labores

Las distintas labores que se deben realizar para asegurar el crecimiento de los cultivos llevan asociadas el uso de maquinaria y por tanto, el consumo de combustible. Las emisiones asociadas al consumo de este combustible también han sido estimadas. Los datos empleados para calcular los consumos de combustible para la serie 2000-2011 han sido obtenidos de las fuentes antes mencionadas. Para los cultivos en los que no ha sido posible encontrar datos de consumos de combustible, éstos se han estimado en función de las horas por hectárea (ha) empleadas en las labores y el consumo de combustible por cada tipo de labor utilizando para ello los datos de la Plataforma de conocimiento para el medio rural y pesquero del MAGRAMA.<sup>15</sup>

Una vez determinados los consumos de combustible por ha, utilizando nuevamente inventarios de la base de datos Ecoinvent v.3), se han calculado los factores de impacto del uso de la maquinaria agrícola (Tabla 19). Dentro de estos factores se ha tenido en cuenta la producción y consumo del combustible diésel en un tractor agrícola, así como la fabricación de la propia maquinaria. La siguiente tabla muestra los factores por litro de diésel.

Tabla 19. Factores de impacto por litro de combustible diésel

IMPACTO	UNIDAD	FACTOR DE IMPACTO
Cambio Climático	kg CO2 eq	3,14
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	41,6

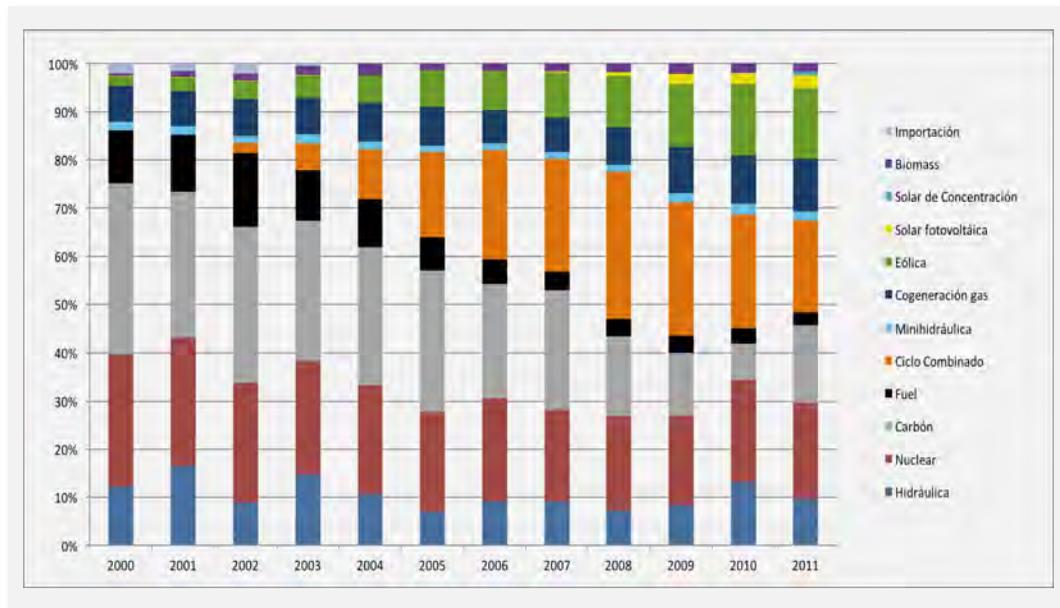
#### E. Emisiones en la producción de electricidad

La fuente energética principal del riego es la electricidad, por ello es necesario conocer los factores de impacto asociados a la electricidad generada en España durante los años incluidos

<sup>15</sup> Fuente: <http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/>

en el análisis. Red Eléctrica Española (REE) publica anualmente un informe del sistema eléctrico español con información detallada sobre la oferta eléctrica que ha servido para calcular los mixes anuales (REE,2001; 2002; 2003; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010;2011; 2012). La Figura 48 muestra el porcentaje en el que cada tecnología ha participado en la generación de electricidad durante los años de estudio.

Figura 48. Mix de tecnologías de la generación de electricidad de los años 2000 a 2011



Se puede observar cómo la participación de tecnologías fósiles como el carbón y el fuel han disminuido a la vez que se ha incrementado el ciclo combinado de gas natural y las tecnologías renovables, principalmente la energía eólica y, en menor medida, la biomasa y la solar fotovoltaica. Sin embargo, en el último año analizado se experimentó un repunte en la producción con carbón y una reducción del gas natural en ciclo combinado, a la vez que fue un mal año hidrológico.

Teniendo en cuenta esta composición, y utilizando nuevamente los datos de inventario que proporciona la base de datos Ecoinvent v.3) para las distintas tecnologías de generación de electricidad, se han calculado unos factores de impacto referencia para cada año estudiado. Estos factores anuales describen los potenciales impactos por kWh de electricidad generada considerando el mix del año al que se refieren y se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Factores de impacto anuales por kWh de electricidad del mix

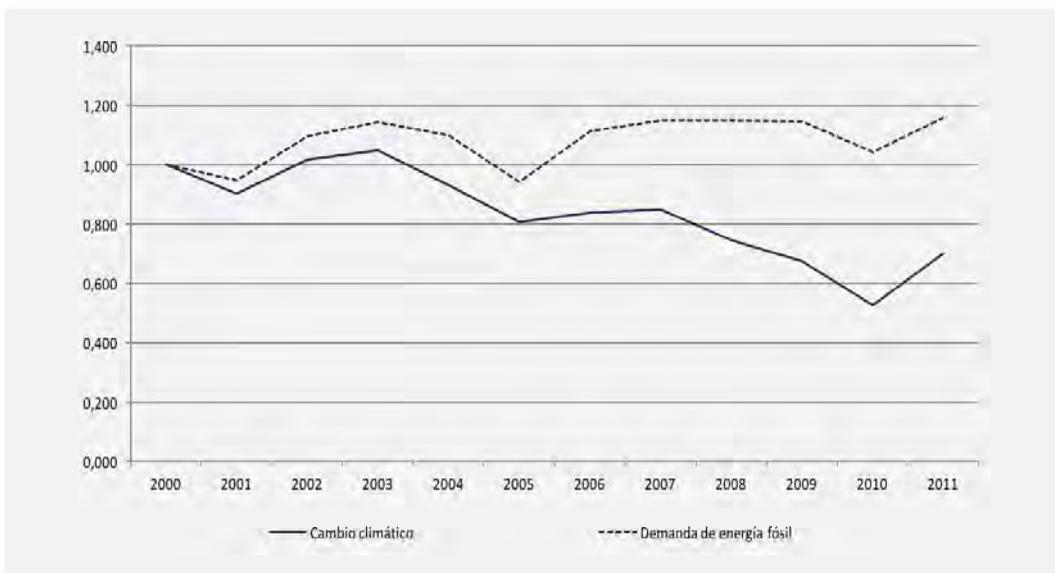
IMPACTO	UNIDAD /kWh de electricidad	FACTORES DE IMPACTO ANUALES (2000-2005)					
		2000	2001	2002	2003	2004	2005
Cambio Climático	kg CO <sub>2</sub> eq	0,567	0,512	0,578	0,595	0,528	0,457
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	6,53	6,18	7,16	7,48	7,19	6,15

IMPACTO	UNIDAD /kWh de electricidad	FACTORES DE IMPACTO ANUALES (2006-2011)					
		2006	2007	2008	2009	2010	2011
Cambio Climático	kg CO <sub>2</sub> eq	0,475	0,481	0,422	0,382	0,298	0,398
Demanda de Energía Fósil	MJ fósil	7,28	7,52	7,51	7,5	6,81	7,56

Como se puede observar en la Figura 49, existe una marcada tendencia a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por kWh generado debido fundamentalmente a la introducción de tecnologías renovables en el sistema. Esta tendencia se revierte en el último año analizado por el repunte de la producción de carbón y la reducción de la participación de los ciclos combinados y la hidráulica.

Figura 49. Evolución temporal de los factores de impacto de la producción de electricidad por el sistema de generación español. Impacto en 2000=1



En cuanto al consumo de energía fósil, la evolución es ligeramente al alza debido fundamentalmente al incremento de la eólica que utiliza algunos materiales intensivos en el uso de este tipo de energía como el acero y algunos materiales de construcción de las palas.

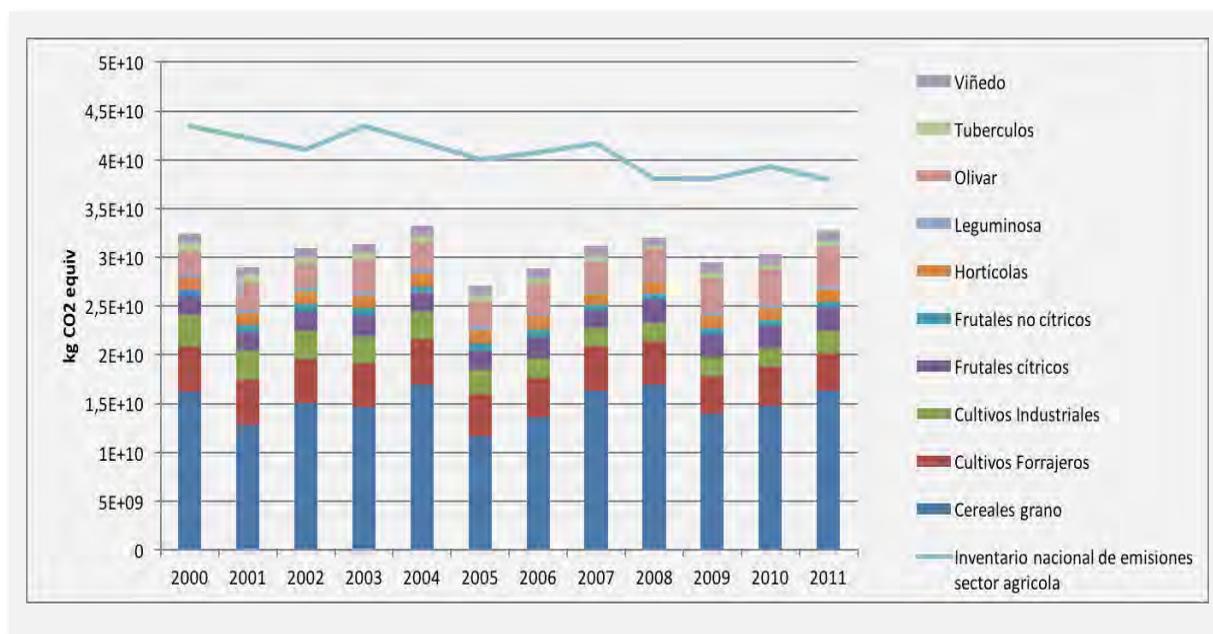
### 3.2.3 Resultados

A continuación se muestran los resultados de los análisis realizados en cuanto al impacto sobre el cambio climático y sobre el consumo de energía fósil de los sistemas de producción agrarios españoles.

#### 3.2.3.1 Impactos sobre el cambio climático

Según los cálculos realizados, durante los últimos diez años, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) atribuibles a la actividad agrícola desde una perspectiva de ciclo de vida presentan una gran variabilidad interanual como se puede observar en la Figura 50. Las emisiones de gases de efecto invernadero al final del periodo analizado apenas son un 1% superiores a las del año 2000. Sin embargo, entre los años 2000-2001, 2004-2005 y 2008-2009 hay reducciones importantes de estas emisiones cuantificadas en un 11%, 18% y 8% respectivamente. La línea azul superior representa la evolución del total de emisiones de GEI del sector agrícola según las estimaciones del Inventario Nacional de Emisiones (MAGRAMA, 2015 d). Al comparar estas emisiones se ha de tener en cuenta que las emisiones de la producción de fertilizantes y parte de las emisiones del uso del combustible pertenecen a otros sectores del inventario diferentes del agrícola.

**Figura 50. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero totales de los cultivos analizados expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente**

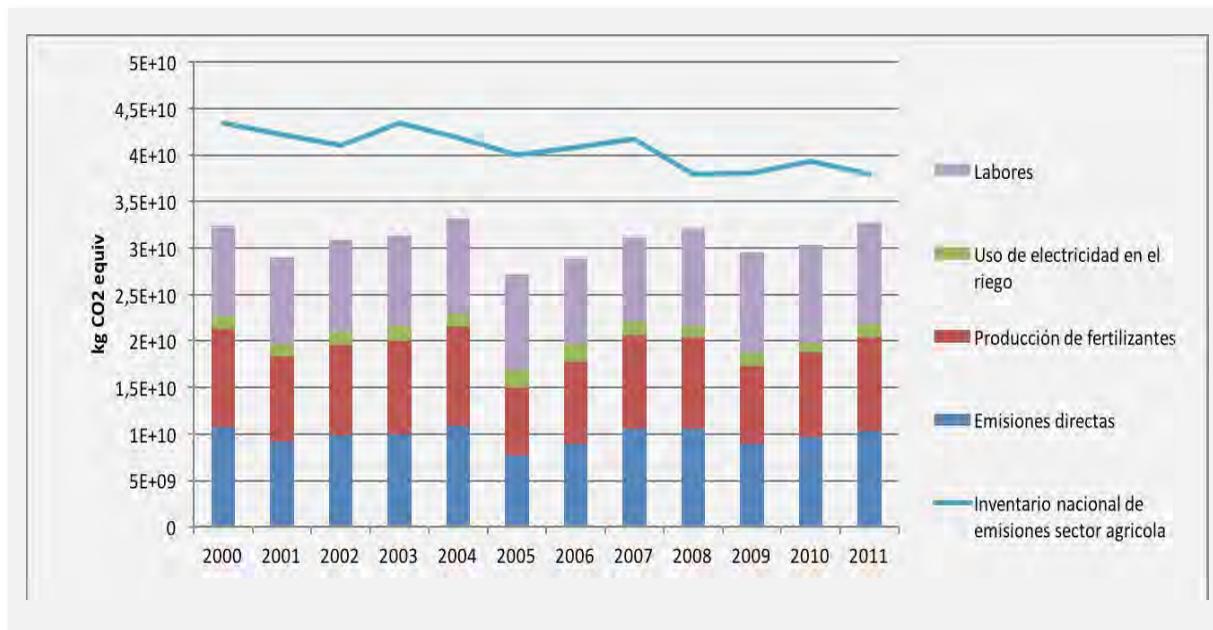


Como muestra la Figura 51 alrededor del 50% del impacto total es atribuible al cultivo de cereal, seguido de los cultivos forrajeros y el olivar. La contribución del olivar a los GEI totales se ha incrementado notablemente durante el periodo analizado. La contribución en el año 2000 a los GEI anuales era del 7%, y en 2011 pasa a ser de un 12%. Este incremento se debe fundamentalmente al aumento de la superficie dedicada al olivar de transformación en regadío.

Distinguiendo entre las emisiones debidas a las distintas actividades agrícolas analizadas, la mayor parte de las emisiones son debidas a la fertilización tanto de forma directa (emisiones directas de óxido nitrógeno producidas al aplicar el fertilizante en campo) como indirecta (emisiones originadas por los procesos de producción de los fertilizantes utilizados) (Figura 54). Las emisiones directas de óxido nitrógeno suponen alrededor del 30-34% de las emisiones totales del cultivo. La estimación de estas emisiones está sujeta a un grado bastante alto de incertidumbre tanto por la propia naturaleza de las emisiones (muy variables en el tiempo y en el espacio), como por la falta de factores adaptados a las condiciones edafoclimáticas características de la agricultura española. Algunos autores sugieren que estas emisiones, especialmente en los secanos, pueden llegar a ser una décima parte de las calculadas por la metodología general del IPCC (Aguilera et al., 2013).

Las emisiones debidas a la fabricación de los fertilizantes, suponen alrededor del 29 al 33% de las emisiones totales, por lo que en conjunto la fertilización es responsable de más un 60%, de las emisiones totales de GEI de la actividad agraria.

**Figura 51. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero totales distinguiendo entre los distintos componentes expresadas en kg CO<sub>2</sub> equivalente**



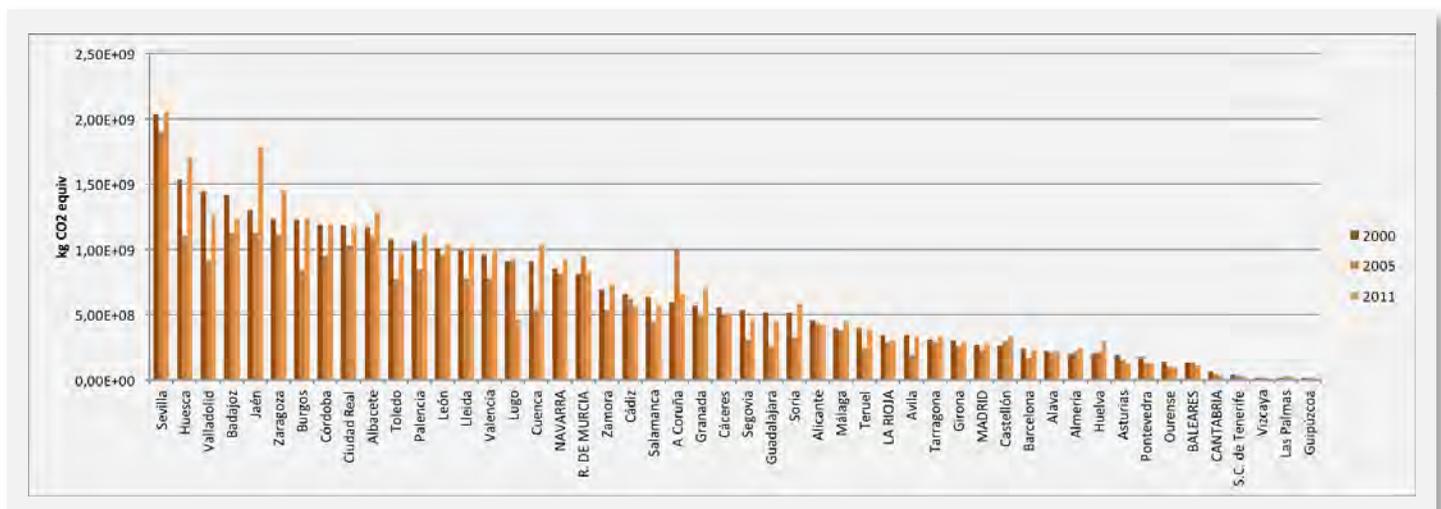
Las emisiones atribuibles al riego suponen desde un 3% a un 7%, dependiendo de los años. Finalmente el consumo de combustible en labores supone alrededor de un 29 a un 36% de las emisiones totales dependiendo de los años, sin observarse una tendencia clara.

Si analizamos las emisiones en cada una de las provincias (Figura 52), vemos como las mayores emisiones se originan en las provincias de Sevilla, Huesca, Valladolid, Badajoz, Jaén y Zaragoza con alguna variabilidad dependiendo de los años, especialmente en el caso de las provincias de Jaén y Huesca. En cuanto a las emisiones provinciales distinguiendo entre el secano y regadío (Figura 53), se observa que las emisiones de las provincias de Sevilla, Huesca y Jaén son fundamentalmente debidas a los cultivos en regadío, mientras que en las emisiones de las provincias de Valladolid y Badajoz contribuyen de forma importante tanto los cultivos de secano como los de regadío. En las provincias de Sevilla, Huesca y Jaén y en los cultivos de regadío, el

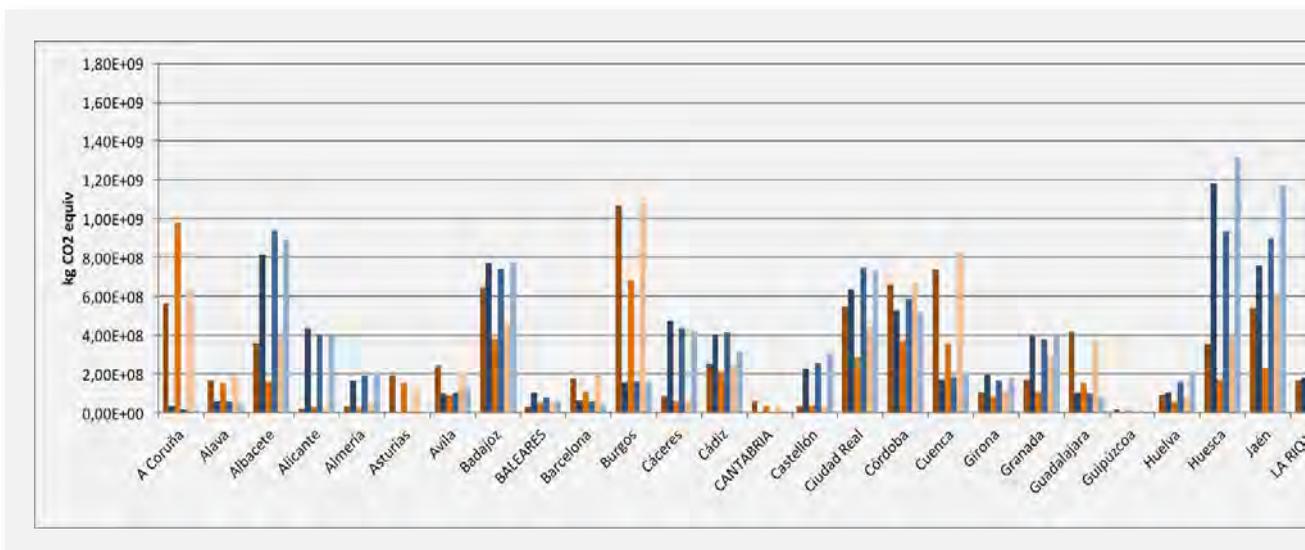
consumo de electricidad para riego es responsable tan solo del 5%, 2.5% y 9% respectivamente del total de emisiones, mientras que son las labores las responsables de la mayor parte de las emisiones con una participación del 52%, 43% y 57% del total de emisiones respectivamente. La contribución a las emisiones totales debidas al riego es bastante variable según las regiones según se puede observar en la Figura 54. Así, en la región de Murcia, estas emisiones suponen un 21% del total, un 15% en Alicante, un 13% en Almería y Albacete y un 10% en Tenerife y Valencia. En el otro extremo se sitúan las provincias de la cornisa cantábrica cuyas emisiones representan un porcentaje menor del 0,5%, y las provincias de Teruel, Soria, Burgos Álava y Barcelona en las que estas emisiones suponen menos del 1% del total.

Las emisiones debidas a la fabricación de fertilizantes varían entre el 29% (Asturias) y 47% (Las Palmas) en los cultivos de secano y entre el 12% (Santa Cruz de Tenerife ) y 30% (Valencia) en los cultivos de regadío. Las emisiones debidas a las labores de cultivo son sensiblemente más importantes en los cultivos de regadío en los que estas emisiones suponen entre un 36% (Vizcaya) y un 74% (Valencia) dependiendo de las provincias. En los cultivos de secano la contribución de las labores a las emisiones totales varía entre un 4% en la provincia de Asturias y un 44% en Castellón.

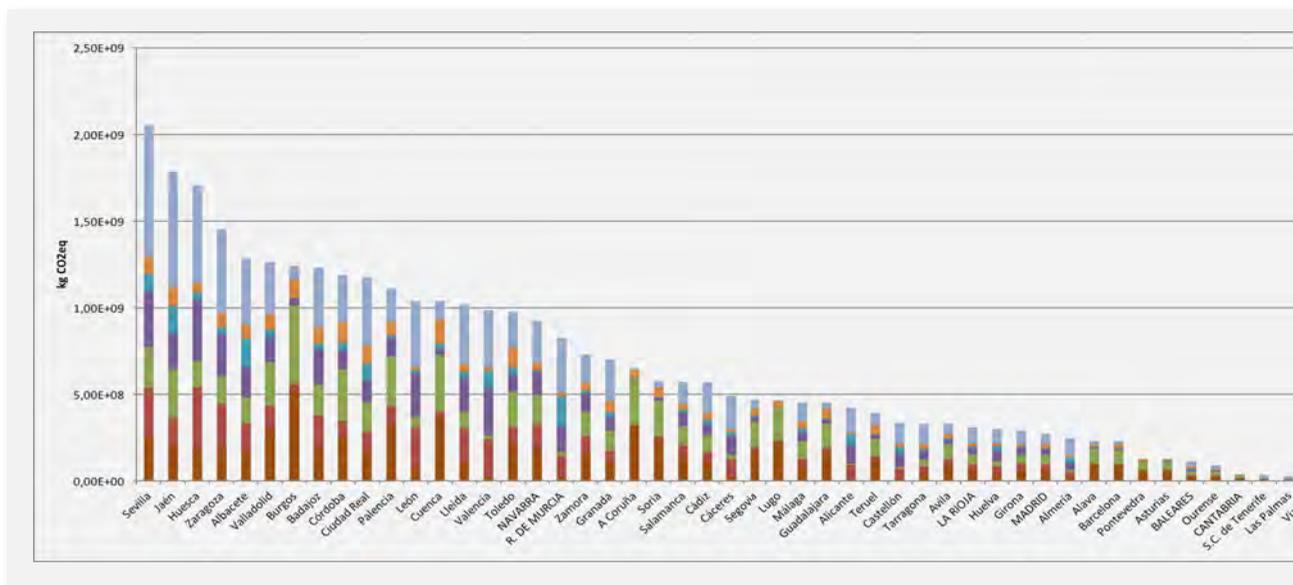
**Figura 52. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales expresadas en kg CO<sub>2</sub> equivalente**

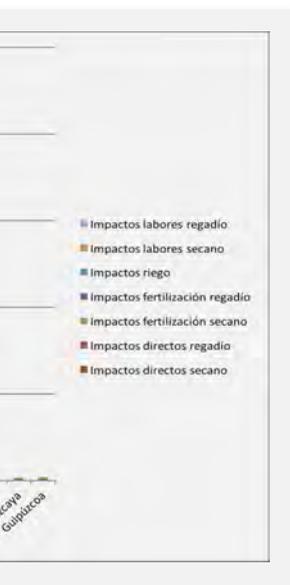
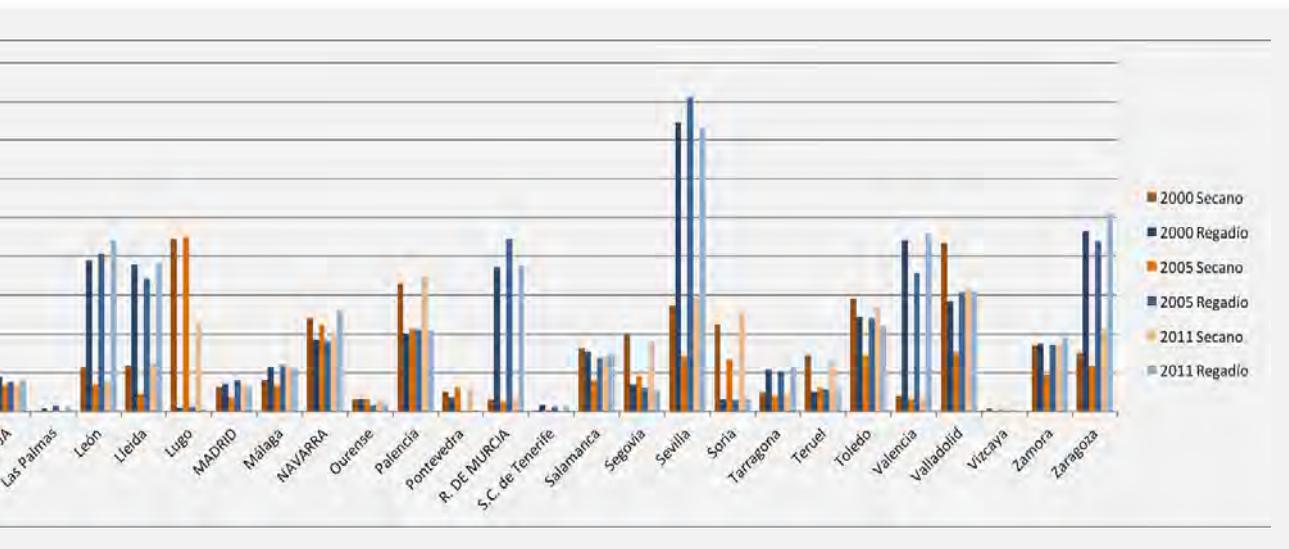


**Figura 53. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales en secano y regadío expresadas en kg CO<sub>2</sub> equivalente**



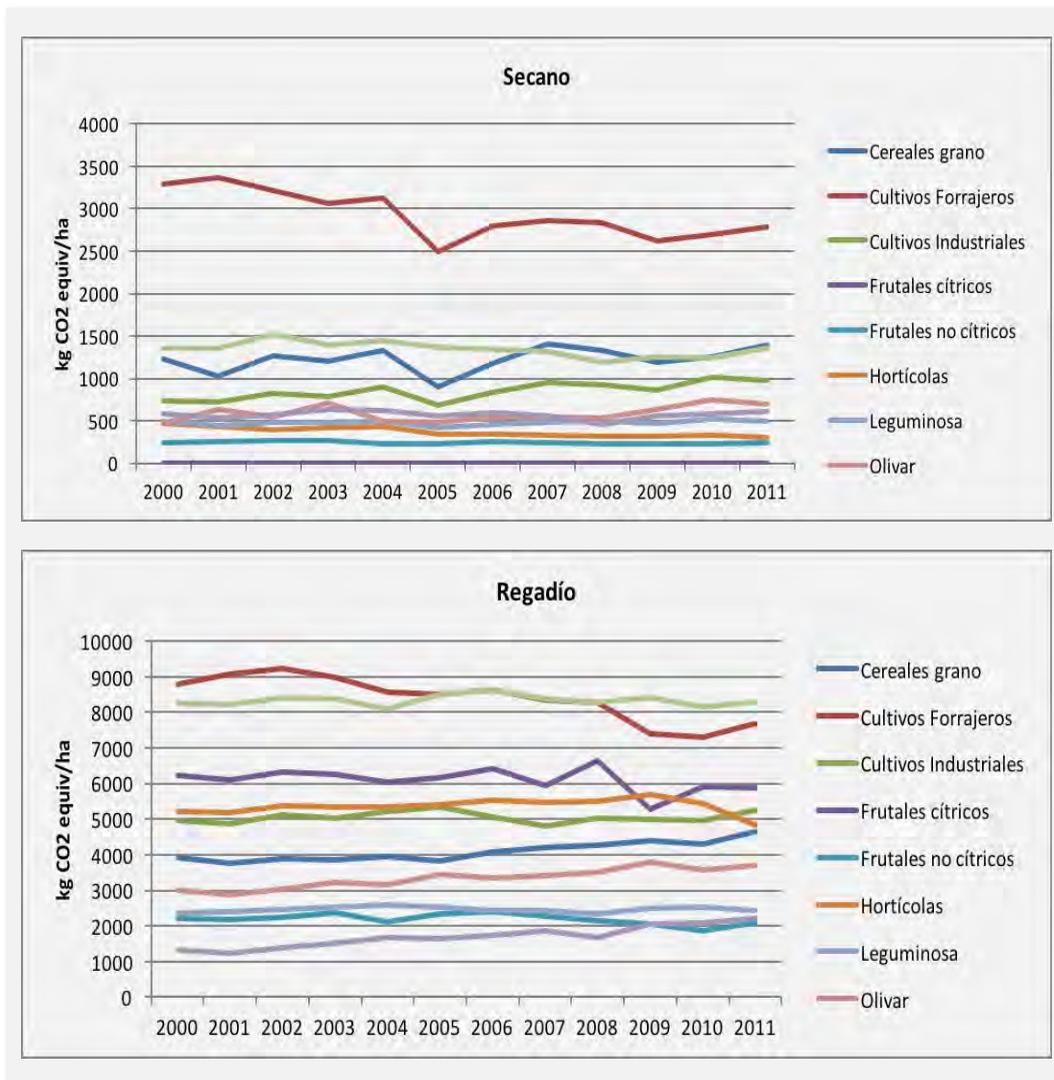
**Figura 54. Emisiones de gases de efecto invernadero totales provinciales por tipo de impacto para el año 2011 expresadas en CO<sub>2</sub> equivalente**





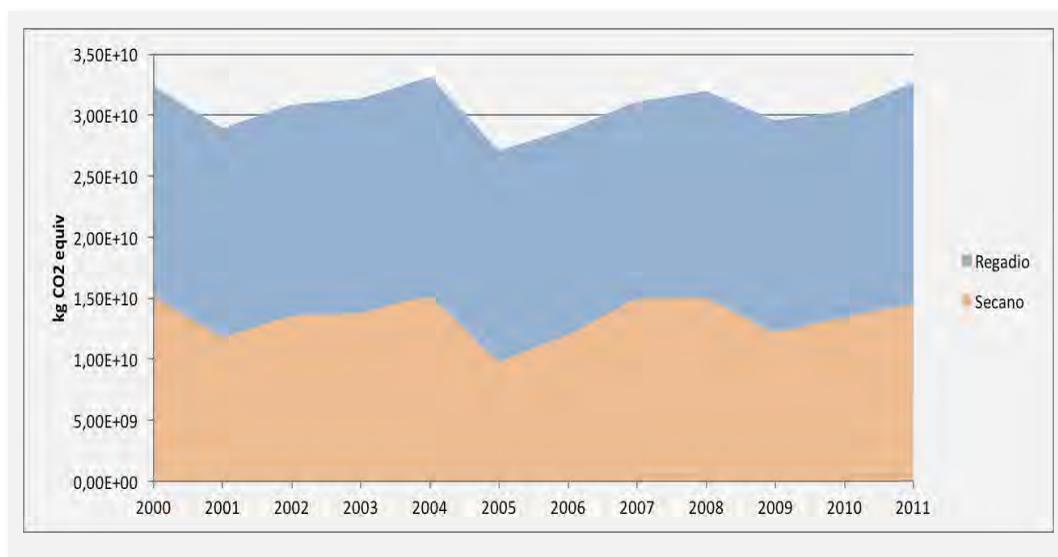
Si analizamos las emisiones por ha cultivada (Figura 55) tanto en secano como en regadío, vemos cómo las emisiones en secano son sensiblemente inferiores a las emisiones en regadío, fundamentalmente debido a las menores producciones y, por tanto, menores aportes de fertilización. Los cultivos con mayores emisiones en secano son los cultivos forrajeros, con una marcada tendencia decreciente, seguidos de los tubérculos y los cereales grano. Algunos cultivos como los cereales y los cultivos industriales muestran una tendencia creciente en las emisiones que pudiera ser debida a un aumento de las producciones esperadas por ha junto con el aumento de los factores de emisión de los fertilizantes nitrogenados en los últimos años. En regadío, también los cultivos forrajeros y los tubérculos son los cultivos de mayores emisiones por ha, seguidos de los frutales no cítricos. Cultivos como el viñedo, el olivar y los cereales muestran en regadío un aumento de las emisiones por ha debido fundamentalmente al aumento de los factores de emisión considerados.

Figura 55. Emisiones de gases de efecto invernadero por ha expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectárea



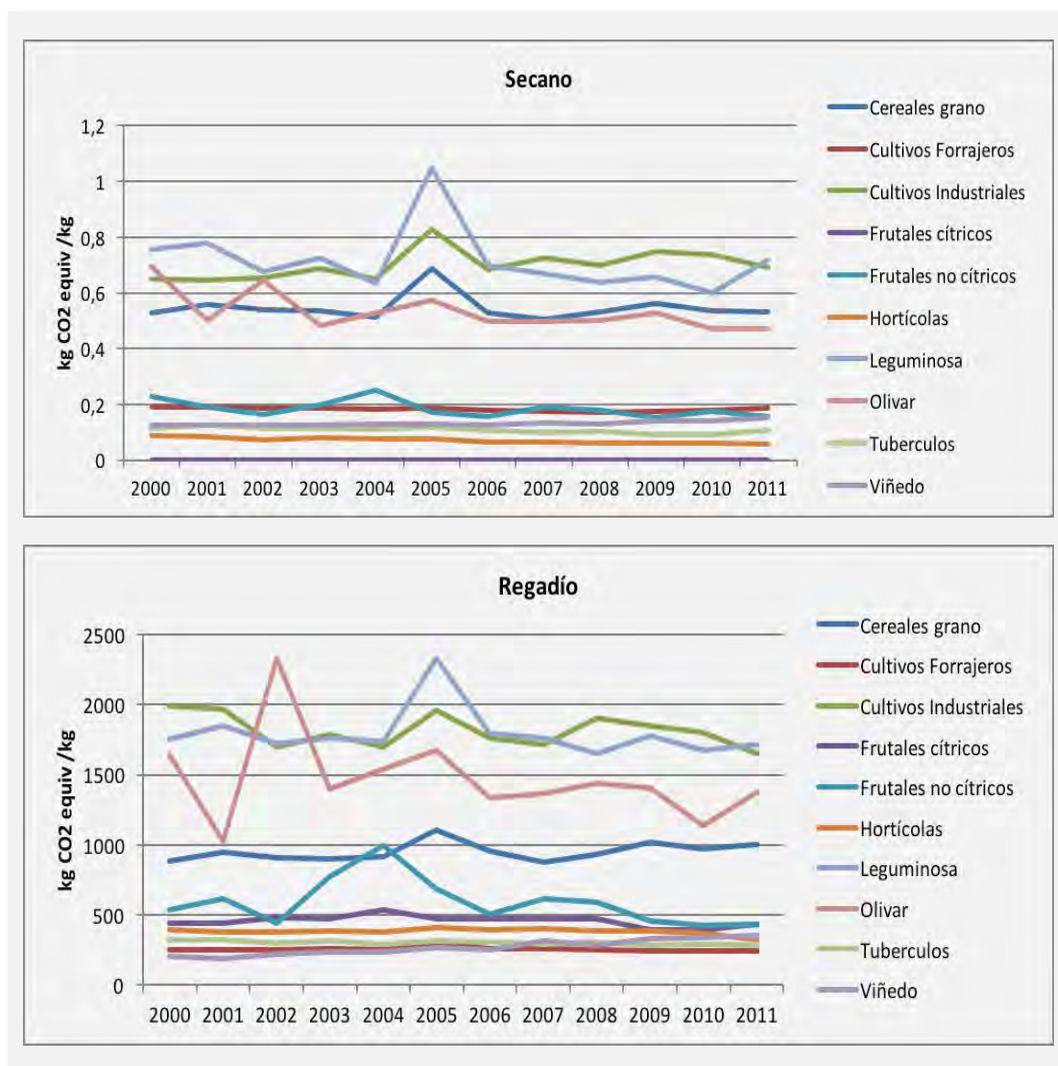
Las emisiones por ha del regadío son sensiblemente superiores a las del secano, debido a las mayores producciones esperadas, que hacen que se aumente el nivel de fertilización, y al consumo energético en el riego. En total, las emisiones producidas por todos los cultivos en secano son solo algo menores a las producidas por todos los cultivos en regadío como puede verse en la Figura 56. Tanto las emisiones del secano como las del regadío varían poco en el tiempo, con una tendencia a disminuir las emisiones del cultivo en secano (que se han reducido en un 4% en la década analizada) y a aumentar las emisiones del cultivo en regadío (que se ha incrementado en un 5%).

**Figura 56. Emisiones de gases de efecto invernadero totales del secano y el regadío expresadas en kg CO<sub>2</sub> equivalente**



En relación a las emisiones por kg de producto (Figura 57), los valores muestran una gran variación interanual con numerosos picos de emisiones que coinciden con años de bajos rendimientos como el año 2005 en el caso del cultivo en secano y regadío de leguminosas, cereales y cultivos industriales.

Figura 57. Emisiones de gases de efecto invernadero por kg expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por kg

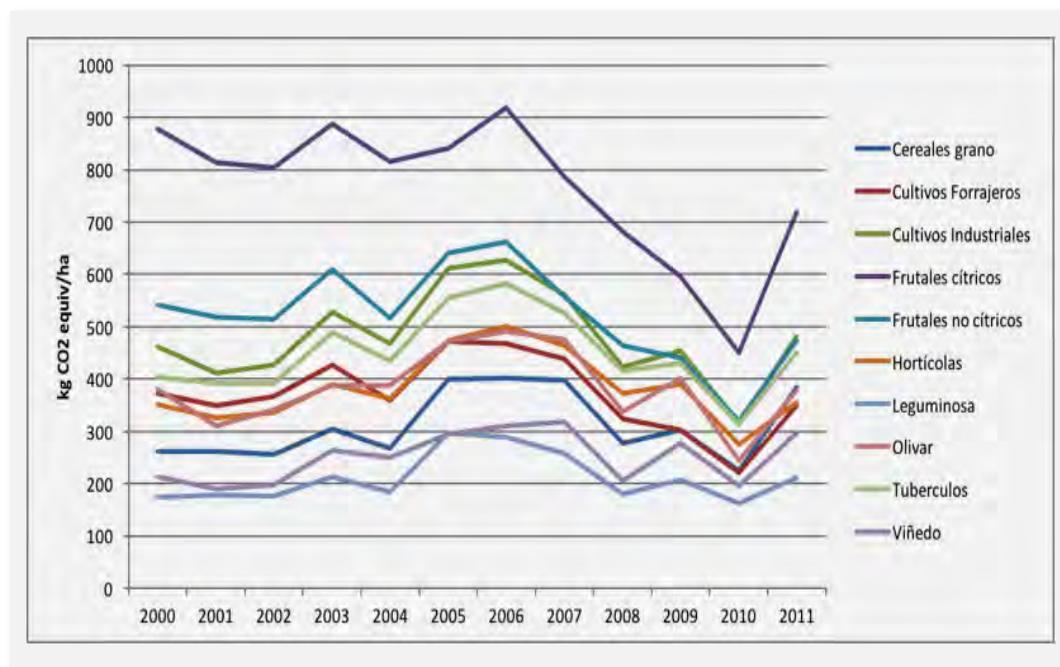


Si se analiza la evolución de los GEI en el tiempo por grupos de cultivos, el olivar, los cultivos hortícolas y los frutales no cítricos en secano, han reducido sus emisiones alrededor de un 30%, mientras que el viñedo las ha incrementado en un 23%. En regadío, también las emisiones por kg producido se han reducido en la mayoría de los casos, con la excepción del viñedo que las ha incrementado en un 74% pasando de 206 a 359 kg CO<sub>2</sub>eq/kg y los cereales grano en los que estas emisiones se han incrementado en un 13%.

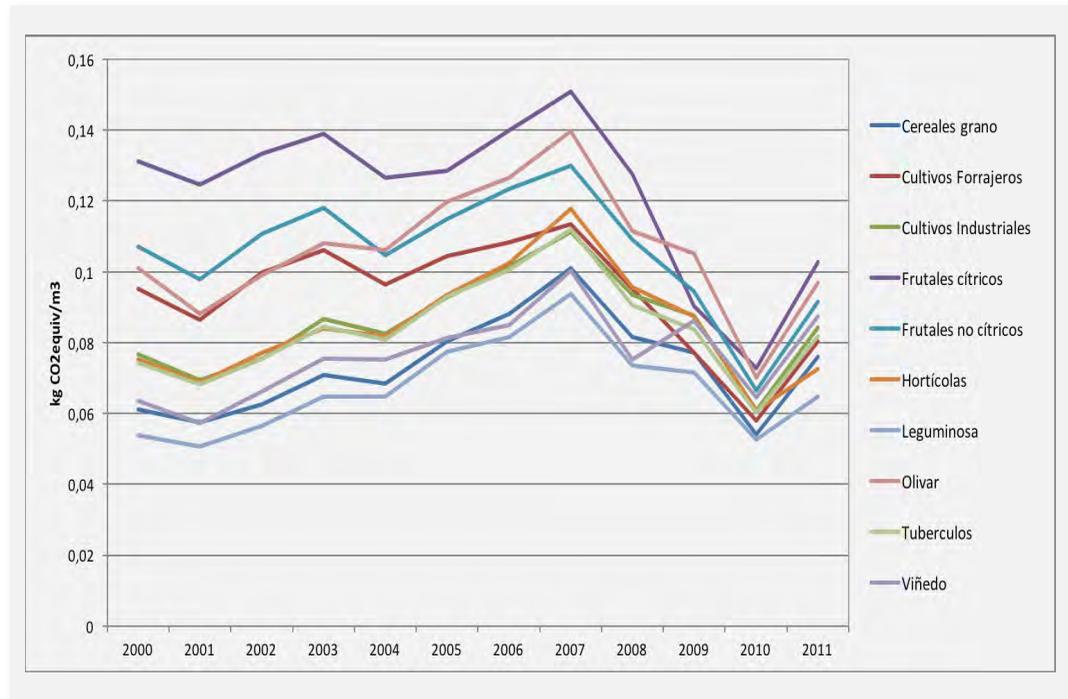
### 3.2.3.2 Impactos asociados al riego

Se ha considerado interesante analizar en más detalle la evolución de las emisiones producidas por el consumo energético en el riego calculado en la huella energética del regadío calculada en el apartado 3.1. Para ello se ha considerado que este consumo energético es en forma de electricidad que se toma del sistema eléctrico español. Los impactos se han calculado multiplicando los consumos energéticos necesarios para bombear y distribuir el agua de riego hasta las parcelas agrícolas, por los factores de impacto calculados para el mix de generación español en cada uno de los años y mostrados en la Tabla 20. Los resultados obtenidos expresados por ha de cultivo y por m<sup>3</sup> de agua aplicado para los distintos cultivos se muestran en la Figura 58 y la Figura 59.

Figura 58. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al uso de electricidad para riego en los diferentes cultivos expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectárea



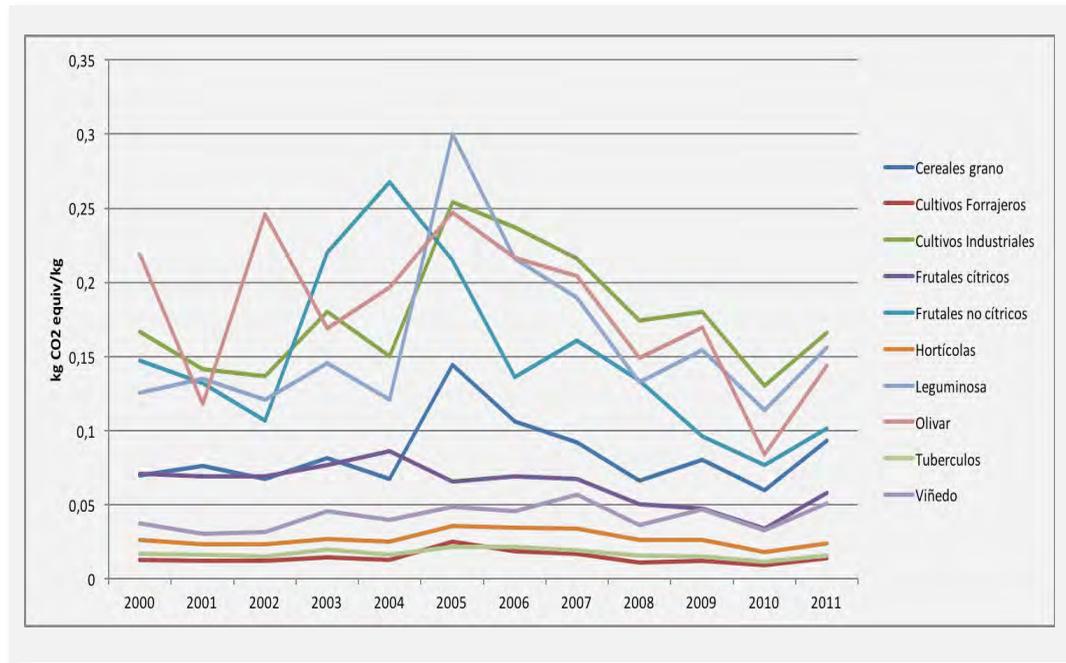
**Figura 59. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas uso de electricidad para riego en los diferentes cultivos expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por m<sup>3</sup>**



Las mayores emisiones por ha se producen en los frutales no cítricos y las menores tienen lugar en el caso de las leguminosas, el viñedo y los cereales. En todos los casos la tendencia es decreciente debido fundamentalmente al descenso de las emisiones por kWh generado en el país por la penetración de las energías renovables en el mix de generación. Hay un repunte en el año 2011, debido al reciente incremento de las emisiones por kWh debido al apoyo a la generación con carbón. Si solo tenemos en cuenta la evolución hasta 2010, todos los cultivos reducen las emisiones asociadas al riego, a pesar de que el gasto energético ha aumentado en todos los casos.

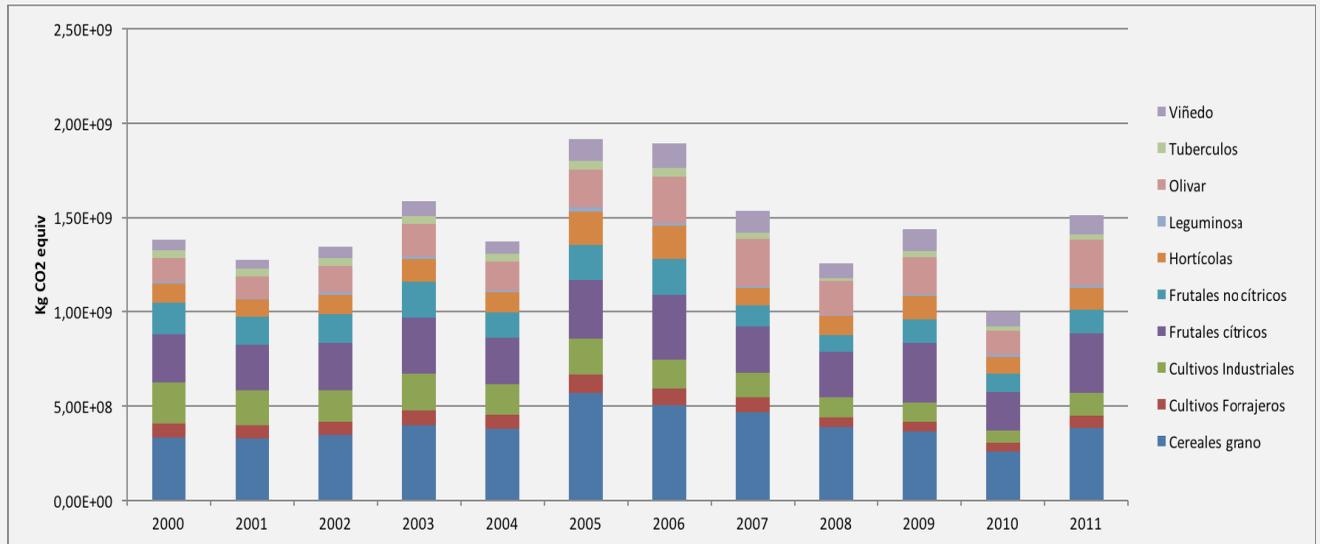
Las emisiones por m<sup>3</sup> de agua aplicado mostradas en la Figura 60 tienen una tendencia inicial creciente para luego reducirse hasta el año 2011 en el que vuelven a repuntar. La reducción de las emisiones por kWh de electricidad se compensa con las resultantes del aumento del consumo energético asociado al riego de forma que, en total, crecen poco e incluso llegan a reducirse. Las emisiones asociadas al riego por kg producido son más variables interanualmente debido a la variabilidad de la producción.

Figura 60. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al regadío en los diferentes cultivos expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por kg



La evolución de las emisiones totales debidas al uso de electricidad para riego en la agricultura española se muestra en las Figura 61 y Figura 62. La contribución más importante la tienen los cereales de grano seguidos de los frutales cítricos y el olivar.

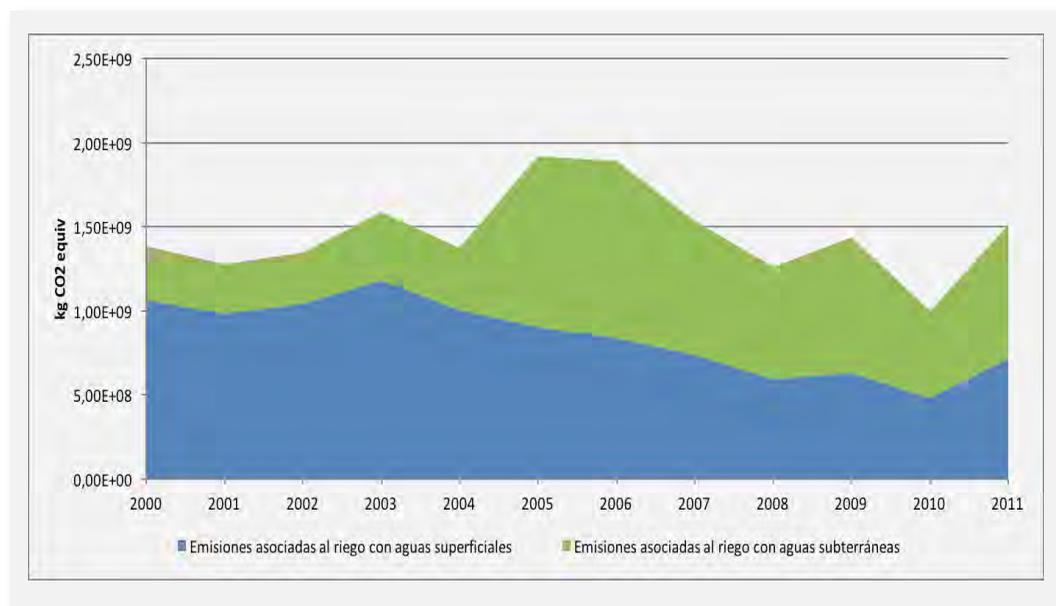
**Figura 61. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al regadío en los diferentes cultivos expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente**



Gracias a la reducción del factor de emisión de la producción de electricidad en España, debido a las penetración de las energías renovables, las emisiones totales asociadas al riego se han incrementado tan solo en un 9%, frente al 56% de incremento de huella energética estimado en el apartado 3.1.

Hay una tendencia al aumento de las emisiones debidas al uso de aguas subterráneas que se ha multiplicado por 1,5 en los años analizados y una reducción de las emisiones debidas al uso de las aguas superficiales que se ha reducido en un 33%.

Figura 62. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de electricidad para riego con aguas subterráneas y superficiales expresadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente

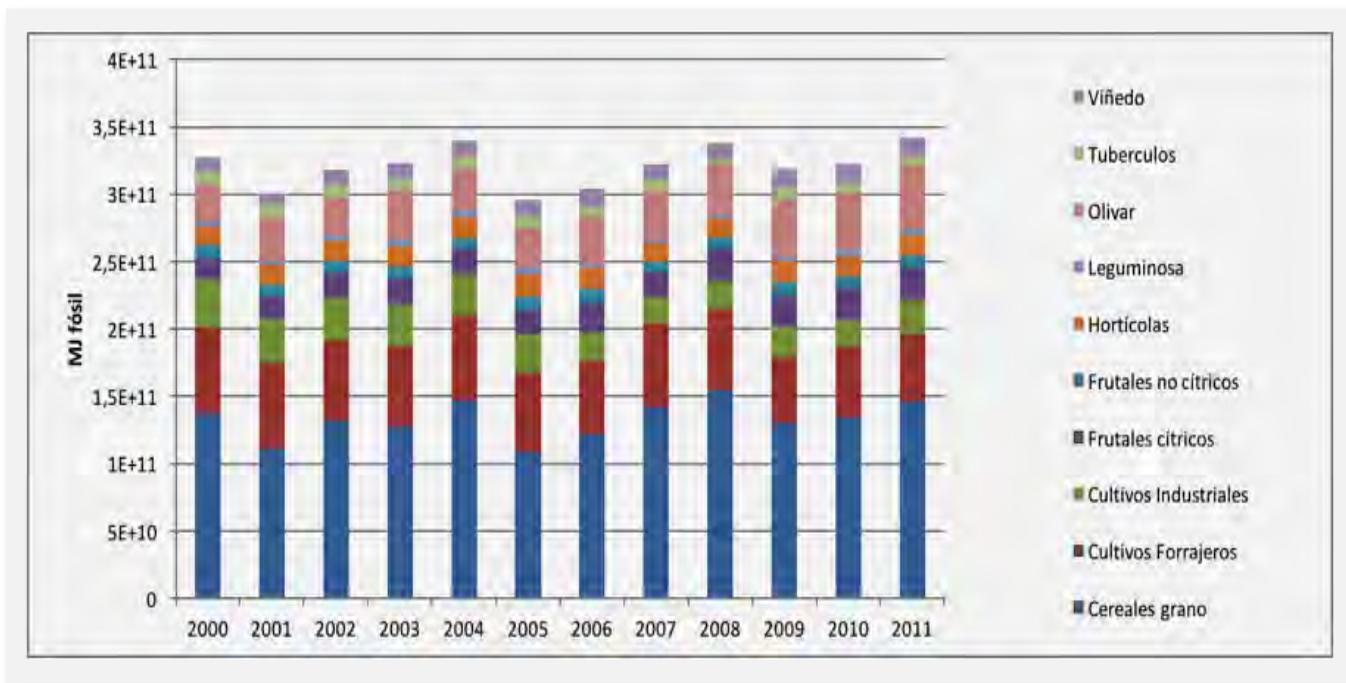


### 3.2.3.3 Impactos sobre el consumo de energía fósil

Otro de los aspectos de interés en el análisis de la actividad agraria es el consumo de combustibles fósiles desde una perspectiva de ciclo de vida, que incluiría, no solo los consumos de energía directos en forma de combustibles fósiles en la maquinaria agrícola, sino también todo el consumo energético de origen fósil asociado a la fabricación de los insumos agrarios, fundamentalmente fertilizantes y combustibles, pero también la fracción fósil de la energía necesaria para generar la electricidad utilizada en el riego. Estos resultados se muestran en este apartado.

La evolución del consumo de energía fósil sigue un patrón similar al de las emisiones de GEI analizadas anteriormente, siendo los cereales los cultivos que totalizan los mayores consumos, seguidos de los cultivos forrajeros y el olivar (Figura 63). La tendencia es ligeramente creciente, habiéndose incrementado el consumo de energía fósil en un 4% en el periodo analizado.

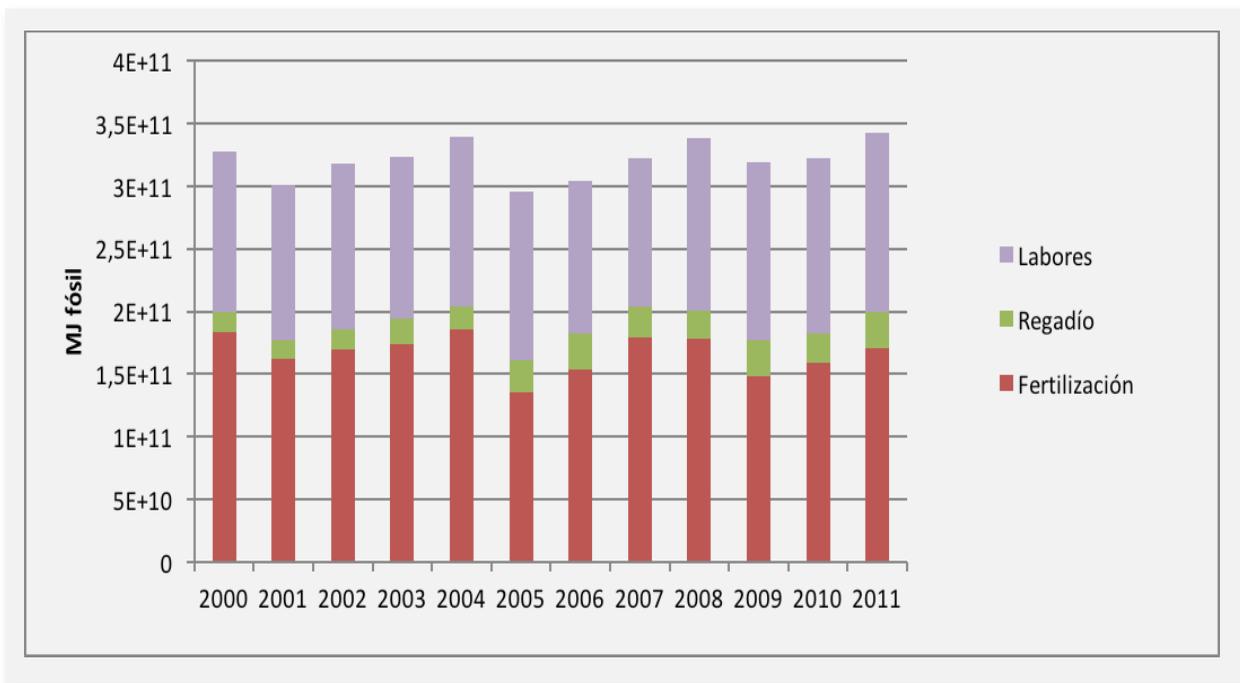
**Figura 63. Evolución del consumo de energía fósil total de los cultivos analizados expresado en millones de Julios (MJ)**



El cultivo de cereal supone alrededor de un 37-43% del consumo total, seguido de los cultivos forrajeros (15-21%) con una tendencia decreciente y el olivar (8% - 14%) con una participación creciente.

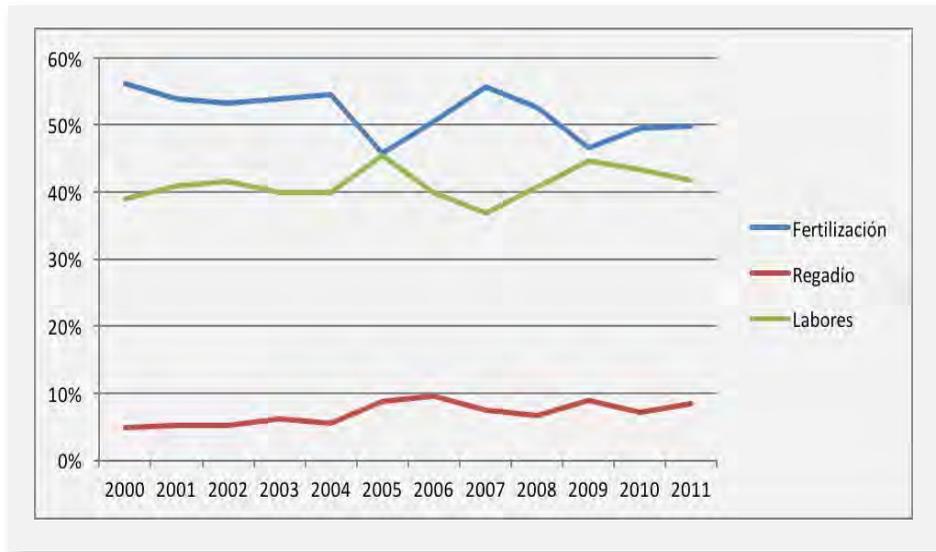
En cuanto a la causa de estos consumos energéticos, en un 47-56% se deben al consumo de fertilizantes siendo esta energía la necesaria para producir estos insumos. Entre un 37% y un 45%, dependiendo de los años, del consumo de energía fósil total se debe al uso de combustibles en las labores y un porcentaje variable entre el 5% y el 10% se debe al riego.

Figura 64. Evolución del consumo de energía fósil total expresado en millones de Julios (MJ) y separando los distintos orígenes



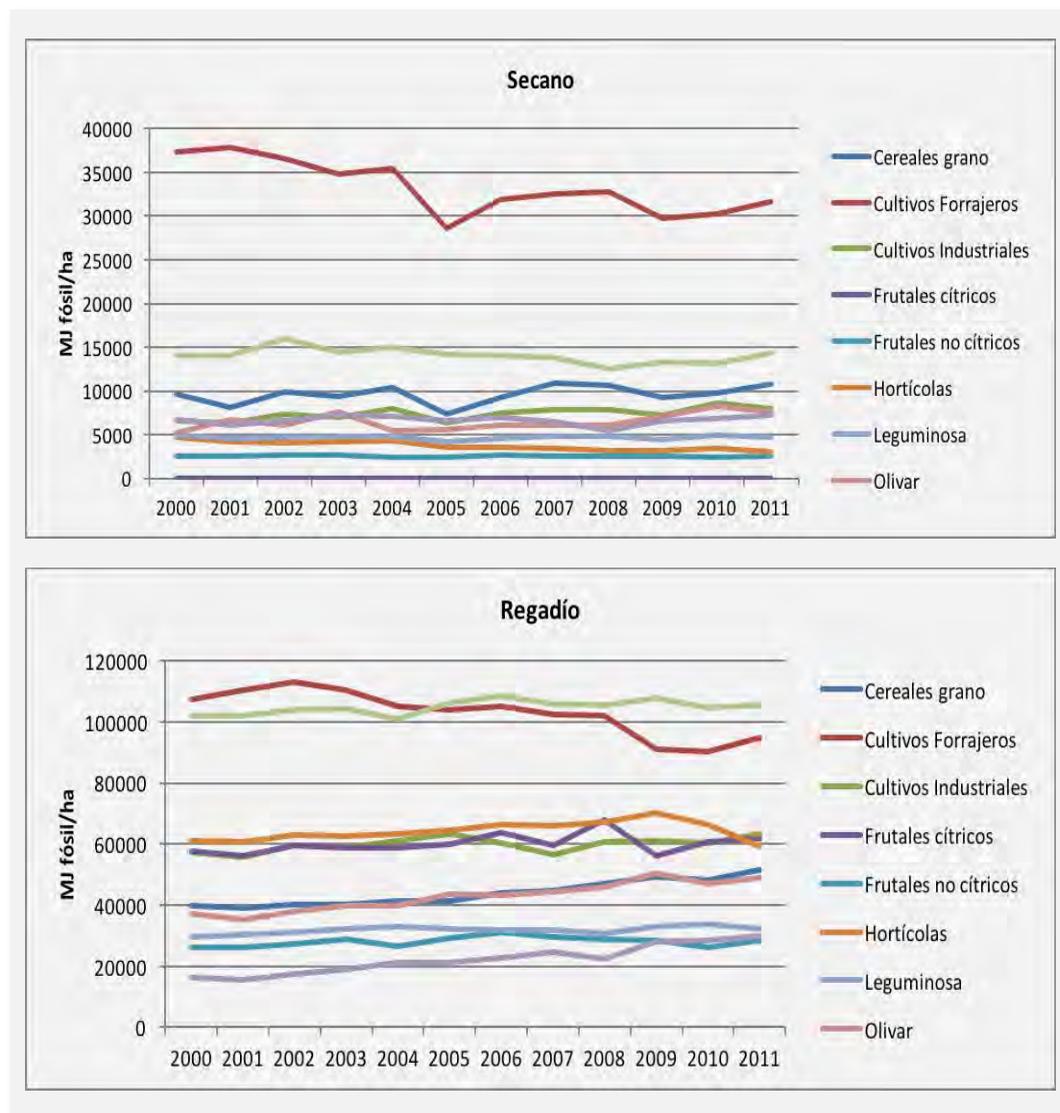
El consumo de energía fósil asociado al riego y a las labores ha tendido a incrementarse mientras que el asociado a los fertilizantes se ha reducido en el periodo analizado como se puede observar en la Figura 65.

**Figura 65. Evolución del consumo de energía fósil total expresado en millones de Julios (MJ) y separando los distintos orígenes**



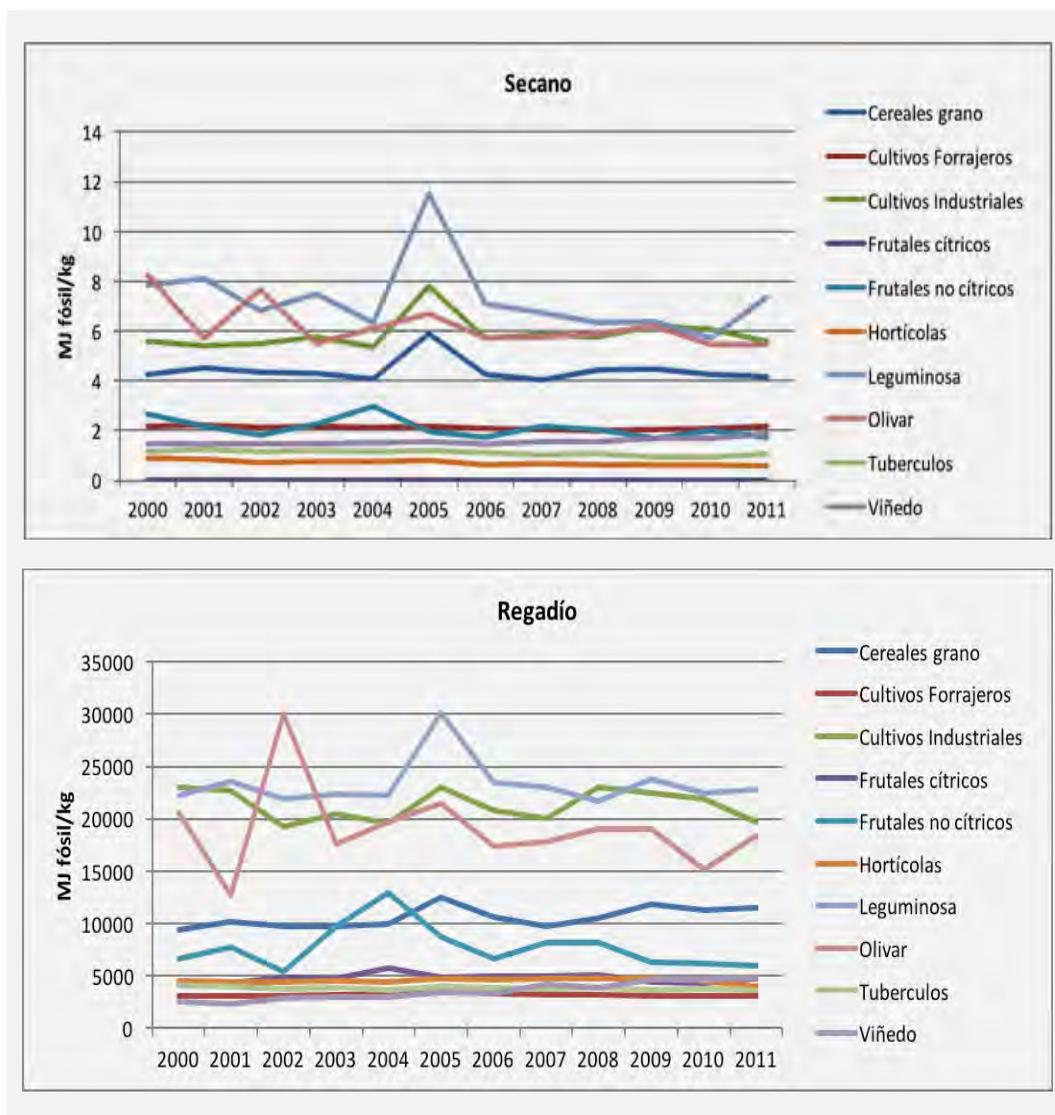
El consumo energético por ha en secano se ha incrementado de forma importante en algunos cultivos como el olivar, los cultivos industriales y los cereales, mientras que las hortícolas y los cultivos forrajeros lo han reducido. En el regadío, principalmente el olivar, el viñedo y los cereales han visto incrementado su consumo energético de forma muy importante, y sólo los cultivos forrajeros han reducido su consumo de energía fósil (Figura 66).

Figura 66. Evolución del consumo de energía fósil por ha expresado en millones de Julios (MJ) por hectárea (ha) de los distintos grupos de cultivo



En cuanto a los resultados por kg de producto que se muestran en la Figura 67, salvo los picos observados en años puntuales, el consumo de energía fósil ha tendido a disminuir de forma general con la única excepción del viñedo. En el regadío, de forma especial el viñedo pero también los cereales y los cítricos muestran un incremento del consumo de energía fósil en el periodo analizado.

Figura 67. Evolución del consumo de energía fósil por kg expresado en millones de Julios (MJ) por kg de los distintos grupos de cultivo



### 3.2.4 Conclusiones

Según los cálculos realizados, durante los últimos diez años, tanto las emisiones GEI atribuibles a la actividad agrícola como los consumos de energía fósil, presentan una gran variabilidad interanual, con una ligera tendencia a incrementarse un 1% en el caso de las emisiones de GEI y un 4% en el caso del consumo de energía fósil.

El cultivo de cereal, seguido de los cultivos forrajeros, con una tendencia decreciente, y el olivar, con una participación creciente, son los cultivos que tienen una participación más importante tanto en las emisiones de GEI como en los consumos de energía fósil.

La mayor parte de las emisiones son debidas a la fertilización tanto de forma directa (emisiones directas de óxido nitroso producidas al aplicar el fertilizante en campo que contribuyen en un 30-34%) como indirecta (emisiones originadas por los procesos de producción de los fertilizantes utilizados que contribuyen con un 29-33%). En cuanto al consumo energético, los fertilizantes contribuyen con un 47-56%

Las emisiones de GEI atribuibles al riego suponen desde un 3% a un 7% dependiendo de los años coincidiendo las menores contribuciones con los años húmedos como 2010 y las mayores en los años secos como 2005. La contribución del riego al consumo de energía fósil es de un 5 a un 10% con una tendencia creciente. Sin embargo, gracias a la reducción del factor de emisión de la producción de electricidad en España debido a la penetración de las energías renovables, las emisiones totales asociadas al riego se han incrementado tan solo en un 9%, frente al 56% de incremento de la huella energética estimado en este estudio. Hay una tendencia al aumento de las emisiones debida al uso de aguas subterráneas que se ha multiplicado por 1,5 en los años analizados y una reducción de las emisiones debidas al uso de las aguas superficiales, que se ha reducido en un 33%.

La contribución a las emisiones totales debidas al riego es bastante variable según las regiones siendo sensiblemente mayor en las provincias más secas como Murcia, Almería, Alicante y Albacete.

Finalmente el consumo de combustible en labores supone alrededor de un 29-36% de las emisiones totales dependiendo de los años siendo sensiblemente más importantes en los cultivos de regadío. El consumo de combustible supone entre el 37 al 45% del consumo de energía fósil. No se observa una tendencia clara en la evolución en el caso de las emisiones de GEI pero si una tendencia al crecimiento en el caso del consumo de energía fósil.



## ■ 4 ■

# Conclusiones generales

El estudio realizado ha tenido como objetivo ahondar en la importancia que tiene en España el nexo Agua-Energía-Tierra (AET), aportando de esta forma conocimiento de las relaciones entre los componentes del nexo. Se ha estructurado en dos fases: en primer lugar se llevó a cabo una revisión bibliográfica, que fue complementada con varias entrevistas con expertos en distintos ámbitos de la energía, el agua, la planificación territorial y el cambio climático destinada a caracterizar de forma general el estado del arte del nexo en el ámbito internacional y en España.

La información recopilada durante esta primera fase sirvió para elaborar un informe, en el que se analizaron las relaciones entre los distintos componentes del nexo de manera bidireccional, es decir, las existentes entre el agua y la energía, el agua y el territorio y el territorio y la energía. Este informe fue sometido a debate en un seminario interdisciplinar celebrado en diciembre de 2014 en la sede de la Fundación Canal, en el que participaron expertos en distintas temáticas relacionadas con los recursos del nexo. El resultado de este seminario permitió concluir que la intensidad de los nexos no es igual en todos los países ni siquiera en todas las regiones, y que, para el caso concreto de España, los nexos que más relevancia tienen se refieren a las relaciones entre agua y energía y entre agua y territorio. En consecuencia, y como quiera que el objetivo general de este estudio es la generación de conocimiento significativo del nexo en España, se decidió abordar en una segunda fase dos casos de estudios que ilustraran estas relaciones. Un primer caso de estudio de prospectiva trata de las implicaciones ambientales ligadas a distintos escenarios de producción eléctrica en España en el horizonte de 2030. Para ello ha sido necesario estudiar las implicaciones en el nexo AET de las distintas tecnologías eléctricas desde una perspectiva de Análisis de Ciclo de Vida. El segundo caso consiste en un análisis retrospectivo de las posibles mejoras en eficiencia experimentadas en el sector agrícola en España en el transcurso de las últimas décadas en relación a la utilización de AET y los impactos ambientales ligados a esta actividad. En este estudio se analizan la huella hídrica, energética y territorial de las actividades agrícolas así como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de energía fósil de estas actividades desde una perspectiva de Análisis de Ciclo de Vida.

El análisis detallado de las implicaciones del sector energético y agrícola en el nexo AET ha permitido clarificar la intensidad de las interrelaciones que existen entre los recursos agua, energía y territorio en el ámbito nacional, así como evaluar ex-ante o ex-post las sinergias y compromisos existentes entre objetivos de distintas políticas sectoriales en materia de AET.

Del análisis prospectivo de las implicaciones sobre el nexo AET de la evolución posible del sector eléctrico en España se han obtenido conclusiones sobre la evolución esperable de distintos impactos sobre el nexo AET en dos escenarios alternativos: un primer escenario tendencial (escenario BAU), que refleja la evolución del sistema energético siguiendo las políticas actuales y los compromisos ya adquiridos para el año 2020 en relación a la reducción de gases de efecto invernadero y penetración de energías renovables; y un segundo escenario (TARGET2030) más ambicioso, que tiene en cuenta los objetivos planteados para 2030 en el marco europeo. Los resultados muestran cómo ambos escenarios tienden a reducir todos los impactos sobre el nexo con la excepción de la ecotoxicidad acuática y el uso de recursos, y que esta reducción es más marcada en general en el escenario de cumplimiento de los objetivos europeos para 2030. El motivo principal de esta reducción tiene que ver con el peso creciente de las energías renovables en el *mix* energético.

El aumento de los impactos sobre ecotoxicidad acuática que se produce en ambos escenarios es debido al aumento de la energía producida por la tecnología eólica y solar fotovoltaica estando estos impactos vinculados a los procesos de gestión de los residuos de estas tecnologías. En cuanto al uso de recursos naturales ambos escenarios siguen una pauta ascendente fundamentalmente motivada por el aumento de generación fotovoltaica. Este impacto está vinculado al uso de plata y zinc en la fabricación de los módulos.

El análisis retrospectivo de las transformaciones de la agricultura ha revelado que se ha reducido la huella territorial de la producción de cultivos de manera significativa. La huella hídrica ha descendido también en su vertiente más importante de agua azul, siendo la componente verde de menor importancia con origen en las precipitaciones, y por tanto sujetas a una gran variabilidad que se muestra a lo largo del período estudiado. Considerados conjuntamente, ambos resultados, los de la huella de agua y territorial, unidos a los ligeros aumentos de productividad, suponen que, por unidad de producto, la agricultura ha seguido una clara evolución positiva. Entre 2000 y 2011, que es el periodo analizado en este análisis, la eficiencia en el uso del agua y la tierra han aumentado un 9,2% y un 6,3%, respectivamente.

Sin embargo, es también evidente el intercambio, por un lado, de aguas superficiales por subterráneas, y por otro, el consiguiente aumento de las necesidades energéticas de la agricultura de regadío. Este resultado no es independiente del anterior ya que la mejora en la productividad de agua y tierra viene determinada por la transformación del regadío en las superficies de los cultivos, en las técnicas de riego, en los sistemas de distribución del agua en las zonas regables (transformación del regadío), y en un aumento del uso de las aguas subterráneas

que, obviamente, requieren de energía para el bombeo. Desde el punto de vista de la energía, el consumo energético ha aumentado un 56%, y la eficiencia en el uso de la energía ha disminuido un 28%.

Este aumento del gasto energético, también ha venido acompañado por un ligero incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del 1% y un aumento del consumo en energías fósiles del 4%. Las mejoras en la productividad agrícola, y por tanto la reducción de las huellas hídricas y territoriales, en gran medida se han logrado gracias tanto a un aumento de la fertilización que es la causa más importante de emisiones de GEI tanto de forma directa (emisiones directas de óxido nitroso producidas al aplicar el fertilizante en campo) como indirecta (emisiones originadas por los procesos de producción de los fertilizantes utilizados), al igual que ocurre con los consumos energéticos.

El aumento de la huella energética del regadío también ha contribuido a aumentar los GEI y el consumo de energía fósil. Durante el periodo analizado, las emisiones de GEI atribuibles al riego representan entre un 3% a un 7% de las emisiones totales dependiendo de los años y la contribución del riego al consumo de energía fósil está entre el 5 y el 10%, con una tendencia creciente. En este punto es importante destacar que, gracias a la reducción de las emisiones asociadas a la producción de electricidad en España debido a las penetración de las energías renovables, las emisiones totales asociadas al riego se han incrementado tan solo en un 9% desde el año 2000, frente al 56% de incremento de huella energética que se ha estimado en este estudio. Los resultados del análisis prospectivo de las emisiones del sector eléctrico hasta 2030 realizado en el primer caso de estudio, permiten ser optimistas acerca de la evolución futura de las emisiones asociadas al consumo energético en el riego en la agricultura española.



## ▪ 5 ▪

# Recomendaciones para estudios futuros

El estudio realizado ha permitido avanzar en el conocimiento de las relaciones entre los componentes del nexo AET e identificar algunos aspectos importantes sobre la evolución de los impactos sobre el nexo de algunas políticas sectoriales. En concreto, se ha constatado que la evolución de la composición de tecnologías que conformaran el eléctrico en un futuro cercano si se quiere dar cumplimiento a los compromisos nacionales y europeos en materia de reducción de emisiones de GEI y eficiencia energética, permitirá reducir muchos de los impactos que el sector energético ejerce sobre el nexo AET. Sin embargo, algunos de ellos, como la ecotoxicidad acuática y el uso de recursos, puede que se vean incrementados. El análisis realizado sugiere que los impactos sobre ecotoxicidad acuática se deben al aumento de la energía producida por la tecnología eólica y solar fotovoltaica estando estos impactos vinculados a los procesos de gestión de los residuos de estas tecnologías. Será necesario por tanto, avanzar en el análisis de estas cuestiones y desarrollar políticas destinadas a minimizar estos impactos.

En cuanto al incremento de los impactos sobre el uso de recursos naturales, este comportamiento se ha identificado que está fundamentalmente motivado por el aumento de generación fotovoltaica y vinculado al uso de plata y zinc en la fabricación de los módulos. Será necesario orientar las políticas de I+D en esta tecnología destinadas a minimizar el uso de estos elementos, así como diseñar estrategias de gestión de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil de forma que se minimicen estos impactos.

El análisis realizado ha permitido constatar que tanto las emisiones como el consumo de energía fósil asociado al sector agrícola en España apenas se han incrementado entre 2000 y 2011. Dado que los mayores impactos están relacionados directa o indirectamente con la fertilización, es

sobre este aspecto sobre el que se han de orientar las políticas de mitigación en este sector. Por una parte, resulta evidente que es importante reducir al máximo las emisiones producidas en la fabricación de los fertilizantes utilizados en la agricultura española y sería necesario incentivar a la industria para que sus procesos de producción evolucionen en este sentido.

Respecto a las emisiones directas tras la aplicación de los fertilizantes, y dada la gran incertidumbre asociada a su estimación, sería necesario disponer de una metodología de estimación más adaptada a las condiciones de la agricultura española, que permitieran disponer de una metodología Tier 2 para España. Los esfuerzos también deben ir dirigidos a desarrollar metodologías que permitan evaluar el impacto de la contaminación difusa, que constituye actualmente uno de los principales factores responsables del mal estado de las masas de agua en España. En este sentido, sería además conveniente recopilar y evaluar la información disponible sobre esta cuestión, dado que el conocimiento actual sobre este problema en España es muy limitado a pesar de su importancia.

El análisis realizado se ha centrado en las emisiones de GEI y en los consumos de energía fósil de la agricultura española. Otros posibles impactos sobre el nexo, como la acidificación y la eutrofización o la ecotoxicidad, no han sido analizados. Sería interesante ampliar este estudio para analizar estos impactos sobre el nexo AET.

El consumo energético en el regadío como se ha mostrado, se ha incrementado sustancialmente en el transcurso de los últimos años. Este incremento se relaciona con el incremento de presión que hace falta en las parcelas a raíz de la modernización de muchos sistemas de riego y con la reforma del sistema de tarifas. Existen distintas opciones para reducir el consumo de energía en los regadíos, incluyendo auditorías energéticas, optimización de redes y sistemas de impulsión y una mejor gestión; este es un tema en el que, por su importancia, debe analizarse con mayor detenimiento

Desde el punto de vista territorial, la intensificación del sector agrícola ha contribuido a reducir la demanda de tierra en términos absolutos, aunque ha aumentado la demanda de inputs (agua, energía, fertilizantes, etc.) por unidad de superficie. Al reducirse la huella territorial, esto ha permitido la re-naturalización de muchos territorios y el aumento por tanto de superficies de bosque y matorral. Este modelo de organización territorial intensivo en el que se apuesta por la intensificación de determinadas zonas y la conservación de amplias zonas del territorio (*land sparing* en inglés), contrasta con el modelo tradicional extensivo mediterráneo, en el que el nivel de intervención sobre el territorio es mayor pero con una intensidad relativa menor (*land sharing* en inglés). En la actualidad existe un debate relevante sobre el modelo de organización territorial que es más eficiente en la provisión de servicios y en el uso de recursos (agua, suelo, biodiversidad, etc). Sería interesante contrastar, empleando el enfoque de nexo, cuál de los dos modelos de organización territorial aludidos –*land sharing* o *land sparing*–, es más eficiente y sostenible en el tiempo.

En el marco de las relaciones agua-territorio, y concretamente en el nexo de territorio para el agua, sería conveniente estudiar cómo los cambios de uso de suelo y la gestión forestal y territorial pueden contribuir a optimizar el ciclo del agua. Los escasos estudios realizados confirman que los cambios de uso del territorio tienen importantes implicaciones hidrológicas, pero estas conclusiones deben confirmarse con estudios de mayor detalle.



## ▪ 6 ▪

# Referencias

AEA (2012). Support to the identification of potential risks for the environment and human health arising from hydrocarbons operations involving hydraulic fracturing in Europe. Report for European Commission DG Environment. AEA/R/ED57281 N° 11. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/integration/energy/pdf/fracking%20study.pdf>.

AENOR (2006a). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia (ISO 14040:2006).

AENOR (2006b). Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006).

Aguilera, E., Lassaletta, L., Sanz-Cobena, A., Garnier, J., Vallejo, A. (2013). The potential of organic fertilizers and water management to reduce N<sub>2</sub>O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164 (2013) 32– 52.

Alarcón Luque, J. (2014) Asignación y tarificación del agua de riego, según su disponibilidad, el coste y la eficiencia del regadío. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Sobresaliente cum laude.

Aldaya, MM., Llamas, MR (eds) (2012). El agua en España: bases para un pacto de futuro. Fundación Botín, 89 págs.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Alston, J.M., Martin, W.J., Pardey, P.G (2014). Influence of Agricultural Technology on the size and importance of food price variability. In: Chavas, J. P., Hummels, D., Wright, B. D. (Eds.). (2014). The Economics of Food Price Volatility. University of Chicago Press. pp 13-58.

Audsley, E. (1997). Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment. Final Report Concerted Action AIR3-CT94-2028. European Commission DG VI Agri-culture, Brussels.

Beguiría, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(4), 283-286.

BP (2014a). BP Statistical Review of World Energy June 2014. Available at: <http://www.bp.com/statisticalreview>.

BP(20014b). BP Energy Outlook 2035. Available at: <http://www.bp.com/energyoutlook>

Brandão, M., Llorenç Milà i Canals (2013). Global characterization factors to assess land use impacts on biotic production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (6): 1243-1252.

Brouwer, C., Heibloem, Y. (1986) Irrigation water needs. Irrigation water management. FAO Training Manual Nr. 3, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Cabal, H., Labriet, M., Lechón, Y. (2010) . Potencial físico, técnico y económico (mundial, EU, España). *Tratado de Energías Renovables. Volúmen I. Aspectos Socioeconómicos y tecnológicos.* Fernando Becker, Luis Maria Cazorla, Julián Martínez-Simancas Directores. Editorial Aranzadi.

Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera, E. Jr., Corbacho, R. (2008). Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. Mimeo.

Camacho E. (2012). La modernización de regadíos: Ahorro de agua versus incremento en el consumo de energía. Jornada técnica sobre coste energético y producción de energía en comunidades de regantes. FENACORE, Madrid, 28 de marzo de 2012.

CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2010). Evaluación del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Encomienda de Gestión de la Dirección

General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 42-407-1-001.

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. (2004). Water footprints of nations. Volumen 1: Main Report. Value of Water Research Report Series n.º 16. UNESCO-IHE. 76 pp. Disponible en: <http://www.waterfootprint.org>.

Corominas, J. (2010). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. Ingeniería del agua, 17(3): 219-233.

de Juan Valero, J.A., Ortega Álvarez, J.F., Tartajuelo Martín-Benito J.M. (2003). Sistemas de cultivo: Evaluación de itinerarios técnicos. Mundi-Prensa, 835 pp.

De la Rúa, C. (2009). Desarrollo de la herramienta integrada "Análisis de Ciclo de Vida - Input Output" para España y aplicación a tecnologías energéticas avanzadas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

De Stefano, L., Martínez-Santos, P., Villarroja, F., Chico, D., Martínez-Cortina, L. (2013) Easier said than done? The establishment of Baseline groundwater conditions for the implementation of the Water Framework Directive in Spain. *Water resources management*, 27(7), 2691-2707.

Denholm, P., Hand, M., Jackson, M., Ong, S. (2009). Land-Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States. Technical Report NREL/TP-6A2-45834.

EC, European Commission (2013). EU Energy, Transport and GHG emissions trends to 2050. Reference scenario 2013 Disponible en: <http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/trends-to-2050-update-2013.pdf>.

EC, European Commission (2011) - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union.

Ecoinvent v3.1. <http://www.ecoinvent.org>.

Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(5): 1082-1088.

Falkenmark M., Rockström J. (2004). Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Eco-hydrology. EarthScan (Ed), London, 247 pp.

Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 358 (1440): 2037-2049.

FAO (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Disponible en: [www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/Issues\\_papers\\_SP/La\\_agricultura\\_mundial.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf).

Faramarzi M., Abbaspour K.C., Schulin R. y Yang H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23: 486–501.

Fernández-Alcázar, J.I. (2012). Coste de cultivo de la patata. Cuadernos de campo. Nº 50 [https://www.larioja.org/npRioja/cache/documents/721861\\_14\\_costes\\_50.pdf;jsessionid=C1E5F319022FBA8B0C2CBE06C04FCEC9.jvm1](https://www.larioja.org/npRioja/cache/documents/721861_14_costes_50.pdf;jsessionid=C1E5F319022FBA8B0C2CBE06C04FCEC9.jvm1).

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin III, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309:570–574.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H. J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hirschler, R., Hellweg, S., Humbert, S., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., Nemecek, T. (2007). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report Ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI. Duebendorf, CH, Disponible en:[www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).

Frischknecht, R., Steiner, R., Jungbluth, N. (2008). Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006, ö.b.u. und Bundesamt für Umwelt, Bern.

Fthenakis V., Kim, H.C. (2009). Land use and electricity generation: A life Cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1465-1474.

Gagnon, L., Bélanger, C., Uchiyama, Y. (2002). Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy Policy* 30(14): 1267 -1278.

Gallart F, Llorens P. (2004) Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Phys Chem Earth* 29:769–73.

García, A. G. (1999). Cultivos herbáceos extensivos. Mundi-Prensa Libros.

García-Serrano, P., Ruano, S., Marotta, J., Nogales, M. (2010). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Parte I. Gobierno de España. Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. España.

Garrido, A., M. Bardají, I., Ruiz, F., de Blas, C., Ruiz, J., García, R., Hernández Díaz-Ambrona, C., Linares, P. (2012). Indicadores de sostenibilidad de la agricultura y ganadería españolas. Fundación Cajamar.

Garrido, A., M.R. Llamas, C. Varela-Ortega, P. Novo, R. Rodríguez-Casado, M.M. Aldaya. (2010). Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain. Springer, Nueva York.

Garrido, A., Willaarts, B., Rey, L., López-Gunn, E. (2012). Considerations on Climate Variability and Change in Spain In. Stefano and Llamas (eds). Water, Agriculture and the Environment: can we square the circle? Taylor and Francis, London, pp 191-202.

Gordon LJ., Steffen W., Jönsson BR., Folke C., Falkenmark M., Johannessen A. (2005). Human modification of global water vapor flows from the land surface. Proceedings of the National Academy of Sciences 102(21): 7612-7617.

Guinée, J.B. (Ed.), Gorrae, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A, De Bruijn, J.A., Van Duin R., Huijbregts, M.A.J. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Hardbound, ISBN 1-4020-0228-9; Paperback, ISBN 1-4020-0557-1).

Hardy L., Garrido, A. (2010) Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España. Papeles de Agua Virtual vol. 6. Fundación Marcelino Botín, Santander, 214 pp.

Hardy, L., Garrido, A. (2012). Challenges and opportunities related to the Spanish water energy nexus. En: De Stefano S y Llamas MR. (Eds.) Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle? Water Observatory of the Botín Foundation, Taylor and Francis. pp. 177-189.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard, Earthscan, London, UK.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011a). Plan Nacional de Energías Renovables 2011-2020. Disponible en: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_PER\\_2011-2020\\_def\\_93c624ab.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_PER_2011-2020_def_93c624ab.pdf) [Ultimo acceso: Diciembre de 2014].

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011b). Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. 2º Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética en España 2011-2020. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/idpag.89/relcategoria.1154/relmenu.11modpags/mem.detalle>.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011c). Evaluación del balance de gases de efecto invernadero y balance energético de los biocarburantes producidos en España. Estudio técnico PER 2011-2020. Disponible en: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e7\\_GEI\\_biocarburantes\\_A\\_febef7a7.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e7_GEI_biocarburantes_A_febef7a7.pdf).

IEA, International Energy Agency (2015). Country Annual Energy Statistics. Disponible en: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/> [Última visita: Enero 2016].

IEA, 2014. Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. 2014 edition. Energy technology Perspectives.

INE, Instituto Nacional de Estadística (2012). Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario: Datos sobre disponibilidad y origen del agua por comunidad autónoma para el periodo 2000-2012. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=/t26/p067/p03a2000-2012&file=pcaxis> [Último acceso: Diciembre 2015].

INE, Instituto Nacional de Estadística (2015). Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario. Serie 2000-2012. Uso del agua en el sector agrario. Disponibilidad y origen del agua por comunidad autónoma y periodo. <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=/t26/p067/p03/a2000-2012&file=pcaxis>.

IPCC. Chapter 11. N<sub>2</sub>O emissions from managed soils, and CO<sub>2</sub> emissions from lime and urea application. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006.

IPCC, International Panel on Climate Change (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Junta de Andalucía (2009). Análisis de la eficiencia energética del cultivo del algodón en Andalucía. Secretaría General Del Medio Rural Y Producción Ecológica. Consejería De Agricultura Y Pesca. Disponible en: [http://ws128.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/opencms-cap/opencms/handle404?exporturi=/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/Estudios-e-informes/desarrollo-rural-sost/eficiencia\\_energxtica\\_algodxn\\_andalucxa.pdf&exporturi=/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/Estudios-e-informes/desarrollo-rural-sost/eficiencia\\_energxtica\\_algodxn\\_andalucxa.pdf](http://ws128.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/opencms-cap/opencms/handle404?exporturi=/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/Estudios-e-informes/desarrollo-rural-sost/eficiencia_energxtica_algodxn_andalucxa.pdf&exporturi=/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/Estudios-e-informes/desarrollo-rural-sost/eficiencia_energxtica_algodxn_andalucxa.pdf).

Karimi, P., Qureshi, A. S., Bahramloo, R., Molden, D. (2012). Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. *Agricultural Water Management*, 108, 52-60.

KIC (2014). Future renewable energy costs: onshore wind. How technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European onshore wind farms. BVG associates. ©KIC Innoenergy.

KIC (2015). Future renewable energy costs: solar-thermal electricity. How technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European solar-thermal electricity plants © KIC InnoEnergy.

Klamerth, N. (2011) Application of a solar photo-fenton for the treatment of contaminants in municipal wastewater effluents. Doctoral Thesis, Universidad de Almería.

Laborde, D. Padella, M., Edwards, R., Marelli, L (2014). Progress in estimates of iLUC with MIRAGE model. JRC Scientific and policy reports. Report EUR 26106 EN. Disponible en : [http://iet.jrc.ec.europa.eu/bf-ca/sites/bf-ca/files/documents/ifpri-jrc\\_report.pdf](http://iet.jrc.ec.europa.eu/bf-ca/sites/bf-ca/files/documents/ifpri-jrc_report.pdf).

Labriet, M., Cabal, H., Lechón, Y., Giannakidis, G., Kanudia, A (2010). The implementation of the EU renewable directive in Spain. Strategies and challenges. ENERGY POLICY 38(5):2272-2281. MAY 2010.

Lechón, Y., De La Rúa, C., Saez, R. (2008) Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solar Thermal Power Plants in Spain. J. Sol. Energy Eng. 130 (2): 0210121–0210127.

Linares, P., Khan, Z (2014). Agua, Energía y Cambio Climático. Tecnologías de generación eléctrica a partir de la disponibilidad de recursos hídricos en escenarios de cambio climático. Fundación Canal, Canal del Isabel II, 100 pp.

Macknick J., Beatty, B., Hill, G. (2013a). Overview of opportunities for co-location of solar energy technologies and vegetation. NREL/TP-6A20-60240.

Macknick J., Lee, C., Mosey, G., Melius, J (2013b). Solar development on contaminated and disturbed land. NREL/TP-6A20-58485.

Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., Hallett, K.C. (2012) Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. Environmental Research Letters. doi:10.1088/1748-9326/7/4/045802.

MAGRAMA (2013). Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas por comunidades autónomas, serie 2000-2013. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

MAGRAMA (2015a). Anuario de Estadísticas Agrarias serie 2000-2011. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/> [Último acceso: Diciembre 2015].

MAGRAMA (2015b). Cuentas Económicas de la Agricultura (Renta Agraria: Macro-magnitudes Agrarias). Serie histórica 1990-2014. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/economia/cuentas-economicas-agricultura/> [Ultimo acceso: Diciembre 2015].

MAGRAMA (2015c). Encuestas sobre superficies y rendimientos cultivos, serie 2002-2013. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrariasagricultura/esyrce/> [Ultimo acceso: Diciembre 2015].

MAGRAMA (2015d). Red Oficial de Seguimiento del Estado Cuantitativo: Red piezométricos. Disponible en: <http://sig.magrama.es/recursossub/visor.html?herramienta=Piezometros> [Ultimo acceso: Diciembre 2015].

MAGRAMA (2015e). <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/>.

MAPA, (2001). Calendario de siembra, recolección y comercialización, años 1996-1998. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 656pp.

Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., Herrero-Jiménez, C.M. (2013) Recent trends in rivers with near natural flow regime: the case of the river headwaters in Spain. *Prog Phys Geogr* 37:685–700.

McKinsey (2009). Charting our Water Future. Economics Frameworks to Inform Decision Makers. Disponible en: [www.mckinsey.com/App\\_Media/Reports/Water/Charting\\_Our\\_Water\\_Future\\_Exec%20Summary\\_001.pdf](http://www.mckinsey.com/App_Media/Reports/Water/Charting_Our_Water_Future_Exec%20Summary_001.pdf).

Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G., Macknick, J. (2013). Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environ Res Lett* 8:015031.

Milà i Canals L, Romanyà J, Cowell SJ (2007). Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of 'fertile land' in Life Cycle Assessment (LCA). *J Clean Prod* 15 1426-1440.

Milà i Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Knuchel, R. F., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller-Wenk, R., Rydgren, B. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(1), 5-15.

Milbrandt, A., Heimiller, D., Perry, A., Field, C. (2014). Renewable energy potential on marginal lands in the United States. *Renewable and Sustainable Energy reviews* 29:1.

MINETUR, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2015). La Energía en España 2014. Disponible en: [www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La\\_Energ%C3%ADa\\_2014.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La_Energ%C3%ADa_2014.pdf) [Última consulta: Enero 2016].

Murgui-Mezquita M., Cabrera-Marcet E., Pardo-Picazo M. A., Cabrera-Rochera E. (2009) Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia, Instituto Tecnológico del Agua (Universidad Politécnica de Valencia, España), Ponencia de la Jornada Agua y Energía, Madrid.

Nemecek, T., Kägi, T. (2007). Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems. Final Report Ecoinvent V2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH.

Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., Heath, G. (2013) Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. NREL Technical Report NREL/TP-6A20-56290.

Pascual-Aguilar, J.A. (2002) Cambios de usos del suelo y régimen hídrico en la rambla del Poyo y barranc del Carraixet. Tesis Doctoral, Facultad de Geografía i Història de la Universitat de València. 307 pp.

Pinto-Correia, T., Vos, W. (2004) Multifunctionality in Mediterranean landscapes — past and future. In: Jongman RH, editor. The new dimensions of the European landscape. Springer p. 135–64.

Plieninger, T., Schaar, M. (2008) Modification of land cover in a traditional agroforestry system in Spain: processes of tree expansion and regression. *Ecol Soc* 13.

Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.P., Johansson, M., Margni M., Jolliet, O. (2008). The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment* (13) pp.477–486.

Poyatos, R., Latron, J., Llorens, P. (2003) Land use and land cover change after agricultural abandonment. *Mt Res Dev* 23:362–8.

Ramankutty, N., Evan, A.T., Monfreda, C., Foley, J.A. (2008). Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles* 22:GB1003. doi:10.1029/2007GB002952.

REE, Red Eléctrica Española (2001) Informe del sistema eléctrico español 2000. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2002) Informe del sistema eléctrico español 2001. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2003) Informe del sistema eléctrico español 2002. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2004) Informe del sistema eléctrico español 2003. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2005) Informe del sistema eléctrico español 2004. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2006) Informe del sistema eléctrico español 2005. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2007) Informe del sistema eléctrico español 2006. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2008) Informe del sistema eléctrico español 2007. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2009) Informe del sistema eléctrico español 2008. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2010) Informe del sistema eléctrico español 2009. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2011) Informe del sistema eléctrico español 2010. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

REE, Red Electrica Española (2012) Informe del sistema eléctrico español 2011. Disponible en <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.

Rescia, A.J., Willaarts, B.A., Schmitz, M.F., Aguilera, P.A. (2010) Changes in land uses and management in two nature reserves in Spain: evaluating the social-ecological resilience of cultural landscapes. *Landscape and Urban Planning* 98:26–35.

Rodríguez-Chaparro, J. (2014). El papel del Estado y la Política de Regadíos. Jornada PepsiCo “Agua y agricultura”, 13 nov. 2014, Burgos.

Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Köhler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z. (2008): USEtox - The UNEPSETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7): 532-546, 2008.

Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., Schaphoff, S. (2008). Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research* 44. W09405.

Salmoral, G., Willaarts, B., Troch, P., Garrido, A. (2014) Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia Basin, Spain. *Science of the Total Environment* 503, 258-268.

Sathaye, J., Lucon, O., Rahman, A., Christensen, J., Denton, F., Fujino, J., Heath, G., Kadner, S., Mirza, M., Rudnick, H., Schlaepfer, A., Shmakin, A. (2011) Renewable Energy in the Context of Sustainable Development. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Schorngel, J.S., Niele, F., Worrell, E., Boggemann, M. (2012) Water accounting for (agro) industrial operations and its application to energy pathways, *Resources, Conservation and Recycling* 61:1-15.

Schuol, J., Abbaspour, K.C., Yang, H., Srinivasan, R., Zehnder, A.J.B. (2008) Modelling blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research* 44: W07406.

Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., Hettelingh, J.P. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment* 11(6): 403-416.

SETAC (1990) Life Cycle Analysis for Packaging Environmental Assessment. Proceedings of the Specialised Workshop, Leuven, Belgium.

Soto-García, M., Martín-Gorriz, B., García-Bastida, P. A., Alcon, F., Martínez-Alvarez, V. (2013). Energy consumption for crop irrigation in a semiarid climate (south-eastern Spain). *Energy* 55: 1084-1093.

Skiba, U., Fowler, D. and Smith K.A. Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 48, 139-153. 1997.

Struijs, J., Beusen, A., van Jaarsveld, H. and Huijbregts, M.A.J. (2009). Aquatic Eutrophication. Chapter 6 in: Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, 1ª Edition.

TCE, Tribunal de Cuentas Europeo (2014). La integración de los objetivos de la política del agua de la UE en la PAC: un éxito parcial. Informe Especial nº 4. Luxemburgo, 68 pp. Disponible en: [http://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR14\\_04/SR14\\_04\\_ES.pdf](http://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR14_04/SR14_04_ES.pdf) [Último Acceso: Enero 2016].

Teira-Esmatges, M.R., Van Cleemput, O. and Porta-Casanellas, J. Fluxews of nitrous oxide and molecular nitrogen from irrigated soils of Catalonia (Spain). *J. Environmentl Quality*. 27. 687-697. 1998.

UNEP, United Nations Environment Program, (2008). Vital Water Graphics. Disponible en: [www.unep.org/dewa/vitalwater/index.html](http://www.unep.org/dewa/vitalwater/index.html).

Van Cleemput, O.A., Vermoesen, A. and de Groot, C.J. Emissions of N<sub>2</sub> O out of different soils and cropping systems. 11-20. Proceedings of 2nd China-EC Joint Workshop on Greenhouse gases. Shenyang. China. 11-20 Sept 1995.

Viebahn, P., Kronshage, S., Trieb, F., Lechón, Y. (2008) Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants“ Deliverable nº 12.2 - RS Ia. NEEDS. New Energy Externalities Developments for Sustainability Integrated Project.

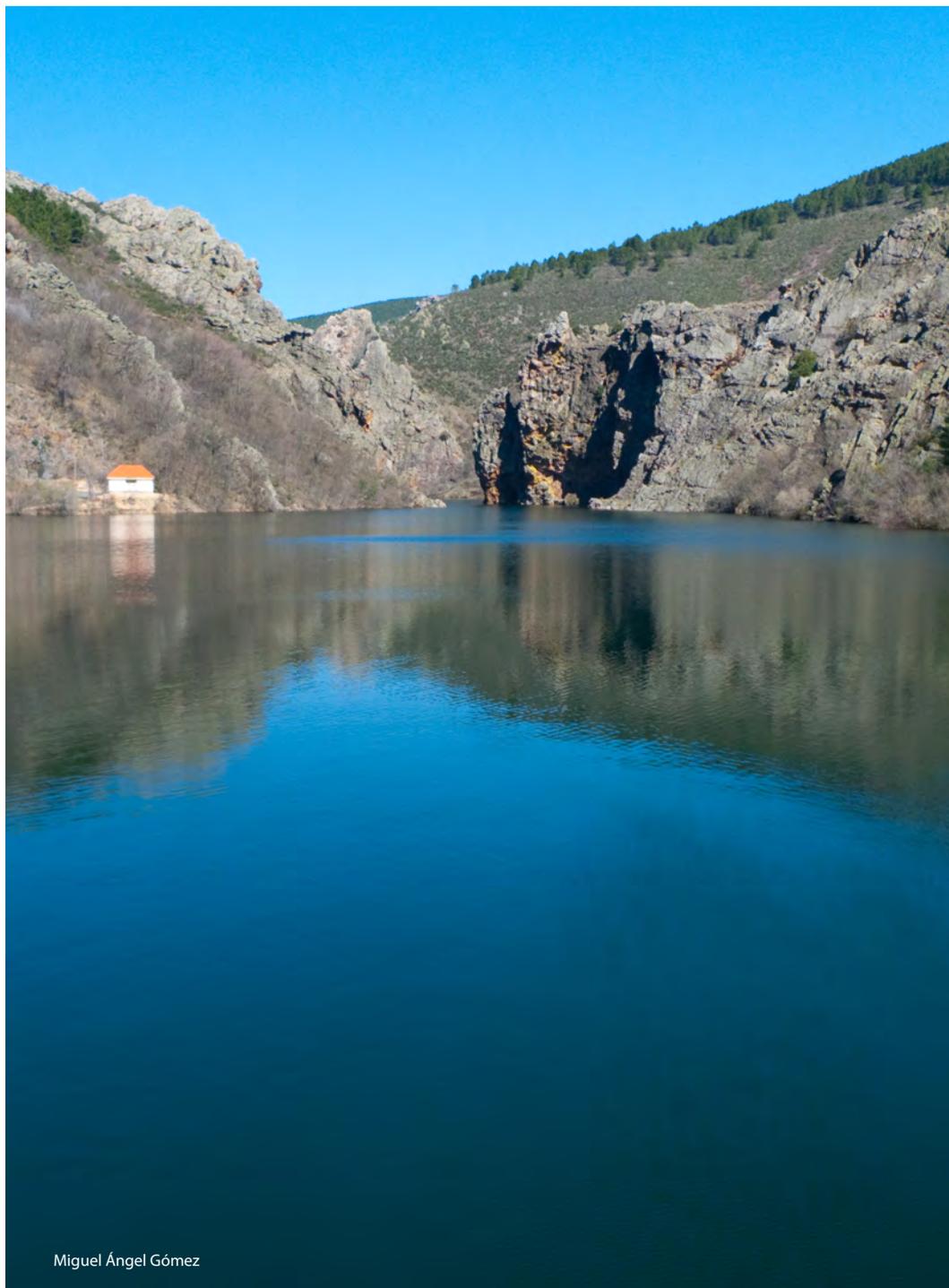
Willaarts, B.A (2015). The Water-Food-Energy-Environment Nexus in Spain A useful approach to assess trade-offs and opportunities to increase water productivity and sustainability. Ponencia presentada en el I EU Workshop “Can implementation of the Water Nexus support economic growth in the Mediterranean region? Ankara, Turquía 12-13 Febrero 2015. Disponible en: [https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/150212\\_AnkaraWaterNexusWorkshop\\_BarbaraWillaarts-2.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/150212_AnkaraWaterNexusWorkshop_BarbaraWillaarts-2.pdf) [Ultimo Acceso: Enero 2016].

Willaarts, B.A., Ballesteros, M., Hernández-Mora, N. (2014) Ten years of the Water Framework Directive in Spain: An overview of the ecological and chemical status of surface water bodies. *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the Paradigm*, 99.

Willaarts, B.A., Volk, M., Aguilera, PA. (2012) Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agro-ecosystems. *Agricultural Water Management* 105:21–31.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2014. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. Paris, UNESCO.

Zhang L., Dawes WR., Walter GR. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701–708.



# ■ 7 ■

## Anexos

### ANEXO I.

#### RELACIÓN DE EXPERTOS EN EL NEXO AET ENTREVISTADOS

Nombre	Afiliación	Tema de la consulta
Teodoro Estrela	Confederación Hidrográfica del Júcar	Agua -Territorio
Laurent Hardy	Centro de Tecnología de Repsol	Agua -Energía
Francisco José Domínguez	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)	Energía -Territorio
Enrique Cabrera	Universidad Politécnica de Valencia	Agua-Energía
Fidel González	Universidad Complutense de Madrid	Agua-Territorio-Energía
Jesús Fernández	Universidad Politécnica de Valencia	Territorio-Energía
José María Marcos	Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA)	Territorio-Energía

## ANEXO II.

### CONCLUSIONES DEL SEMINARIO SOBRE EL NEXO AET EN ESPAÑA

Relación de expertos invitados en el seminario celebrado el 15 Diciembre de 2014 en la Fundación Canal:

1. Pedro Linares, Instituto de Investigación Tecnológica
2. Joan Corominas, Junta de Andalucía
3. Elías Fereres, Universidad de Córdoba
4. Xavier García Casals, Consultor independiente
5. Antonio Soria, JRC Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS)
6. Carlos Alberto Fernández López, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
7. Clemente Prieto, Iberdrola
8. Enrique Cabrera, Universidad Politécnica de Valencia
9. Carles Gasol. Universidad Autónoma de Barcelona

Además de los invitados, también asistieron al seminario todos los miembros del equipo de trabajo y el coordinador del proyecto por parte de la Fundación Canal, Gonzalo Marín.

#### 1. Comentarios generales

El documento de trabajo presentado aborda una temática de creciente interés en España y a nivel internacional. En líneas generales, la revisión bibliográfica realizada para el caso de España es completa aunque se enfatizaron algunas debilidades. En primer lugar, es necesario definir la audiencia de este informe, a quién va dirigido. Algunos de los participantes en la reunión recalcaron la importancia de que este documento pueda ser tenido en cuenta por los gestores y tomadores de decisiones para avanzar en la senda de la coherencia política, económica y ambiental. La falta de definición de una audiencia concreta, dificulta tener claro cuál es el objetivo principal del informe, más allá de realizar una revisión sobre el estado del arte en esta materia.

El marco de interrelaciones propuesto es muy general y no refleja donde están las interacciones más relevantes entre sectores en el caso de España. El agua y su interacción con el sistema

energético y la agricultura son los dos nexos más importantes, por encima de interrelaciones entre energía y territorio. Es importante reflejar esta asimetría en el marco conceptual que elaboremos.

Asimismo es importante definir bien las condiciones de contorno. La política de incentivos, el potencial de desarrollo tecnológico o las reformas que puedan sufrir algunos de los sectores, son cuestiones sumamente importantes para entender las sinergias y compromisos actuales, y sobre todo para interpretar su evolución a futuro. En el caso de las tecnologías energéticas, hay que tener presente que muchas tecnologías, especialmente las renovables, están en el comienzo de su curva de aprendizaje, y a medio plazo sus impactos sobre el agua y el territorio es muy probable que se minimicen frente a la situación actual.

Las condiciones de contorno referidas a crecimiento económico, demanda, o incluso cambio climático, no pueden ser consideradas como variables exógenas únicamente. Cambios en la política del agua, la energía o el territorio, tendrán incidencia sobre la demanda y el crecimiento, por tanto deben ser consideradas como endógenas. Inciden pero también se ven afectadas por cambios en el sistema.

Para ejemplificar la importancia de los nexos más importantes en el caso español, se propone adoptar un doble enfoque. Un primer análisis que tendría un enfoque nacional, y que podría basarse en un análisis de escenarios energéticos y las implicaciones que estos escenarios pueden tener desde el punto de vista territorial e hídrico. En este sentido hay que tener especial cuidado con los escenarios que se quieren emplear (ej. PER/PANER ya no son una referencia) y tratar de unificar las metodologías empleadas para hacerlas comparables. Y un segundo análisis más micro, donde se ejemplifiquen las sinergias y compromisos que con mayor frecuencia surgen entorno a la agricultura desde el punto de vista energético e hídrico. Los casos de estudio propuestos incluyen: análisis de los regadíos de remolacha en el Duero, el caos del Vinalopó, el desarrollo turístico de la Costa del Sol, o la producción de cítricos en el Levante.

Con este doble enfoque, se podría ver la relevancia de adoptar este enfoque de nexo a una escala de política nacional, pero también ejemplificar con un caso de estudio bien documentado estas sinergias y compromisos entre los elementos del nexo a pie de campo.

Finalmente, se recalcaron otras cuestiones a tener en cuenta respecto al formato del documento presentado. Por un lado, la necesidad de incorporar bibliografía relevante en relación a España que parece haber sido omitida. También se enfatizó la necesidad de homogeneizar las unidades empleadas en el informe y discutir más a fondo las figuras del texto.

## 2. Comentarios específicos en relación al nexo "Agua-Energía"

Muchas tecnologías energéticas están en el comienzo de la curva de aprendizaje, por tanto el potencial de mejora es grande, y hay que tenerlo en cuenta de cara a la cuantificación de impactos hídricos y territoriales. En el informe presentado algunas de las figuras una foto estática de las tecnologías. Es necesario incluir aspectos de adaptación del sistema y evolución tecnológica.

Los avances observados hasta el momento responden en gran medida a los requisitos establecidos dentro del marco regulatorio, y no tanto posibilidades reales de desarrollo de muchas tecnologías. Ejemplo: la termosolar ha desarrollado opciones tecnológicas como la refrigeración seca, cuyos impactos en el uso del agua son mínimos, y sin embargo esta tecnología tiene muy poca expansión en la actualidad. También y en relación a esta tecnología, se discutió que la refrigeración seca consume un 2-3% de energía adicional. Por tanto, si no hay problema de disponibilidad de recurso (agua) no tiene sentido hacerla.

Otra cuestión importante si se aborda el estudio de escenario energéticos es tener en cuenta el origen de esas fuentes de energía, por las implicaciones que eso puede tener para la soberanía energética de los países.

Un sector energético no abordado en el informe, y que requeriría un análisis más completo por la importancia que tiene en España, es el sector hidroeléctrico. A día de hoy apenas existe información básica sobre qué volumen de agua desembalsa y en qué momento. Dado que es un sector que entra en fuerte competencia con otros sectores resulta importante abordarlo. Se ha detectado que en muchos casos la generación de energía hidroeléctrica, y por tanto desembalse coincide con los picos de precios de la energía

Otro tema señalado como importante en el contexto de España es el coste energético de los trasvases. Si soluciones tecnológicas como la desalación se cuestionan en muchos casos por el elevado precio que tiene para los usuarios la producción de agua desalada, lo cierto es que el coste energético ligado a los trasvases también lleva es elevado, pero con la particularidad que normalmente estos costes suelen ser asumidos por el Estado y por tanto son públicos.

El fracking o "shale gas" es un tema incipiente en España pero que a medio plazo puede tener una relevancia considerable. Esta cuestión apenas se aborda en el estudio, y puede considerarse un tema de interés. Sin embargo, como algunos miembros del equipo mencionaban, estudiar los impactos sobre el recurso hídrico puede ser complicado dado que apenas existe conocimiento y/o información sobre los aditivos que se emplean en la extracción del gas.

Un tema planteado en la reunión que generó mucho debate fue el consumo de agua de los biocombustibles. En comparación con otras tecnologías, esta fuente de energía consume mucha más agua, pero casi siempre será agua verde. Algunos ponentes objetaron que este agua deba

entrar en la contabilidad del agua asociada a la producción energética, dado que es un volumen de agua que consume igualmente independientemente de que se produzcan biocombustibles o no. Es sin duda un tema a tener muy presente, pero sin duda el impacto territorial no se puede descontar.

Un tema de suma importancia en el sector del regadío es el aumento sostenido de los costes energéticos asociados al suministro de agua. A día de hoy se están registrando consumos de 5000/6000 kWh/ha, que son inabordables para el agricultor y requieren la búsqueda de soluciones. Este problema es especialmente importante en el caso de regadíos asociados a aguas subterráneas. El regadío por gravedad requiere entre 100 y 200 kWh mientras que el bombeo puede necesitar alrededor de 6000 kWh/ha. El reparto de estos costes es aproximadamente el siguiente: 17% electricidad y 70% gasoil y otros combustibles fósiles. Los factores responsables de la subida de estos precios están asociados con la modernización de los regadíos, pero sobre todo con la sobreexplotación de los acuíferos, que obliga a bombear agua desde mayores profundidades, y con el nuevo sistema de tarifas. Con el sistema anterior de costes energéticos, los costes de la potencia instalada en el caso del regadío y el alumbrado público estaban muy por debajo a los precios del resto de servicios porque estaban subvencionados. Sin embargo, con el nuevo marco europeo, las tarifas por uso están prohibidas y ahora tienen que contratar términos de potencia anual. Un tema debatido en relación al plan de modernización de regadíos, ha sido que en última instancia a pesar de haber generado efectos positivos en las explotaciones y medios de vida de los agricultores, no ha cumplido un objetivo primordial: ahorrar agua para otros usuarios. Los márgenes de ahorro logrados en las explotaciones que se modernizaron se han asignado a nuevos regadíos, por tanto en términos absolutos los ahorros son casi nulos. Reducir el consumo a estas alturas es difícil, se tendría que entrar en el manejo, pero se riega a mitad de función de producción. En agricultura nos encontramos con una curva de producción con Costes Marginales crecientes y por lo tanto la producción Marginal es decreciente.

La política de subsidiar el precio del agua en la agricultura, no constituye un aliciente para fomentar la eficiencia en su uso. Si lo es sin embargo, el coste energético y el sistema de tarificación. Sin embargo, y como se comentaba antes el coste energético se ha disparado, lo cual pone en riesgo a parte del sector. Una política de tarificación para el agua equitativa constituye es probablemente la mejor forma fomentar la sostenibilidad ambiental y económica del recurso. También de fomentar el uso de recursos no convencionales como el agua desalada o regeneradas. Como algunos ponentes mencionaron, es el uso de aguas ilegales lo que promueve la sobreexplotación y por tanto dispara los costes energéticos, y no al revés. En el regadío, reducir el consumo es difícil, se tendría que entrar en el manejo, pero se riega a mitad de función de producción. En agricultura nos encontramos con una curva de producción con Costes Marginales crecientes y por lo tanto la producción Marginal es decreciente.

En relación a la eficiencia en el uso de la energía, se discutieron las opciones reales que hay de mejora por sectores. La disponibilidad de un sector para explorar fórmulas que le permitan

reducir el consumo de energía, en realidad va a depender mucho del peso que tenga la energía en su factura total de costes. Si es grande, la disponibilidad para aumentar su eficiencia energética será mucho mayor. Y en este sentido es importante definir benchmarks.

Desde el punto de vista metodológico, se valoró como muy importante y valiosa la incorporación de un análisis del ciclo de vida. Más allá de su utilidad para evaluar escenarios de producción energética, en el ámbito de la agricultura, también puede ser muy útil esta aproximación dado que por ejemplo la modernización de regadíos ha traído como consecuencia una mayor eficiencia en la fertilización (menos pérdidas por lixiviación), favoreciendo una mejora del rendimiento energético de los cultivos (reducción de la energía asociada a la producción de fertilizantes) así como menores emisiones en lixiviados (con menores costes de depuración posterior) y menor acumulación de fósforo y potasio en los suelos. En relación al empleo de las metodologías del ACV, es importante decidir si se va a emplear una aproximación consecucional o atribucional y esto está relacionado con el objetivo y alcance.

Cuestiones menores de contenido y formato:

- Figuras del WRI. Mejor no usarlas. Hay mejores datos de fuentes nacionales.
- Importante distinguir entre uso y consumo de agua especialmente en la hidráulica.
- La HH de la energía puede no ser tan relevante, ya se dispone de escalas de magnitud.
- Importante dejar claro que mucho del consumo de agua de refrigeración en España es agua salada (50% del CC, nucleares costeras, Carboneras, Los Barrios...).
- Figura 15. Datos raros de reducción del consumo de agua. Importante revisar estos datos.
- Se comparan cosas poco comparables como el consumo de agua del gas natural y de la soja (cuando la soja no se cultiva para producir biocarburantes, se trata de un subproducto).
- Diagrama del balance de energía y agua del DOE. Es muy interesante y sería una magnífica aportación si se pudiera reproducir para España.
- La huella hídrica también se puede medir como energía expresada como la energía necesaria para tratar el agua gris en la que se diluye la contaminación.
- Con respecto al consumo de energía en la gestión del agua, 1/3 de éste consumo se debe a la distribución y abastecimiento y los otros 2/3 se deben a la necesidad de calentar el agua en las casas y del aumento de la presión.

### 3. Comentarios específicos en relación al nexo "Energía-Territorio"

Se enfatizó mucho que la producción de biocombustibles en España se aborda con mucho detalle, cuando apenas representa un 1-2% del mercado de combustibles nacional, y cuando su producción a nivel nacional no es relevante. Si bien sus impactos agregado puede ser relativos en comparación con otros tipos de combustibles, si conviene no descartar esta bioenergía, dado que su huella externa ( el impacto que el consumo de España tiene en otras partes del mundo) si puede ser importante dado que mayormente se importa.

Durante la reunión se recalcó que el cálculo de la huella territorial puede no proporcionar la visión completa y necesaria para evaluar los impactos ambientales de distintas tecnologías energéticas (ej. fósiles frente a biocombustibles). Se propuso en su lugar emplear la huella ecológica, para integrar impactos como las emisiones. Es un tema que deberemos debatir a nivel interno, pero en cualquier caso el ACV si facilitará información sobre las distintas categorías de impactos.

Un tema mencionado en el apartado anterior y que volvió a ser discutido en relación a este nexo es evaluar la huella energética de la agricultura y las mejoras en eficiencia logradas en el transcurso del tiempo, tanto en en términos de eficiencia en la producción de alimentos (kcal/ha y kcal/m<sup>3</sup> agua) como de incremento de demanda (kcal/persona). Un dato muy interesante: la energía necesaria para producir 1 kcal se ha reducido por 7 en los últimos 50 años. A día de hoy con 3 kWh/día se cubren las necesidades del metabolismo de una persona y con 90 kWh el resto de actividades.

Al igual que se planteaba en el nexo agua-energía, el fracking también tiene unas implicaciones territoriales que podría ser interesante abordar.

Comentarios de formato o contenido menores a tener en cuenta:

- Cifras de ocupación del territorio por tecnología energética parece que en algunos casos son demasiado altas y en otros casos muy bajas.
- Puede que esto quede fuera del alcance de este estudio. Es otro tipo de indicador que no tiene por qué abordarse aquí.
- Falta incluir la ocupación del suelo de las infraestructuras energéticas.
- El potencial de energías renovables es abundante en toda Europa de muchas tecnologías. Para los países es importante la independencia energética. Es difícil que los países accedan a especializarse en una tecnología.
- Al cuantificar la ocupación del suelo por las energías no despachables, es importante tener en cuenta la necesidad de potencia de respaldo y sus impactos asociados sobre el territorio.

## 4. Comentarios específicos en relación al nexo "Agua-Territorio"

El regadío sin duda es el principal consumidor de agua en la agricultura y el potencial para reducir este consumo es pequeño. La alternativa es la reasignación entre sectores. En relación también a este sector, se conoce que la contaminación difusa es un problema creciente en España, pero no se conoce de detalle el mecanismo para plantear posibles soluciones. Sí se ha visto claramente que hay una alta correlación entre la ubicación de los regadíos y el mal estado de muchos ríos y acuíferos. En relación con esta cuestión sobre el estado de las masas de agua, también se desconoce o no se tiene información cuantitativa sobre los impactos que el sector hidroeléctrico puede estar causando en el estado de las masas de agua superficiales.

Otro tema descrito en el informe pero sobre el cuál existe poca información es sobre las implicaciones que tienen políticas territoriales como la política forestal (ej. aforestación o el propio abandono del monte) para el sector del agua y el sector energético, especialmente hidroeléctrico. Existen estudios que apuntan a que efectivamente existe un impacto pero no está cuantificado de manera sistemática para el territorio nacional. Este tema es de gran relevancia dado que en un escenario probable de mayores temperaturas y por tanto mayor ET, cualquier gota de agua que cae en una cuenca se consumirá muy rápidamente.

## 5. Ideas para la segunda parte del trabajo

El uso del territorio por el sector energético no parece un aspecto muy relevante, especialmente si la bioenergía no tiene un papel importante en el futuro.

Territorio para la energía. Podría ser interesante analizar el potencial de energías renovables conectado a la disponibilidad de agua.

Interesante analizar la huella hídrica desde una perspectiva de ciclo de vida para evaluar el peso de las etapas aguas arriba y aguas abajo.

Cuantificación de la gestión de los embalses para la generación energética y sus efectos sobre los ecosistemas y otros usos.

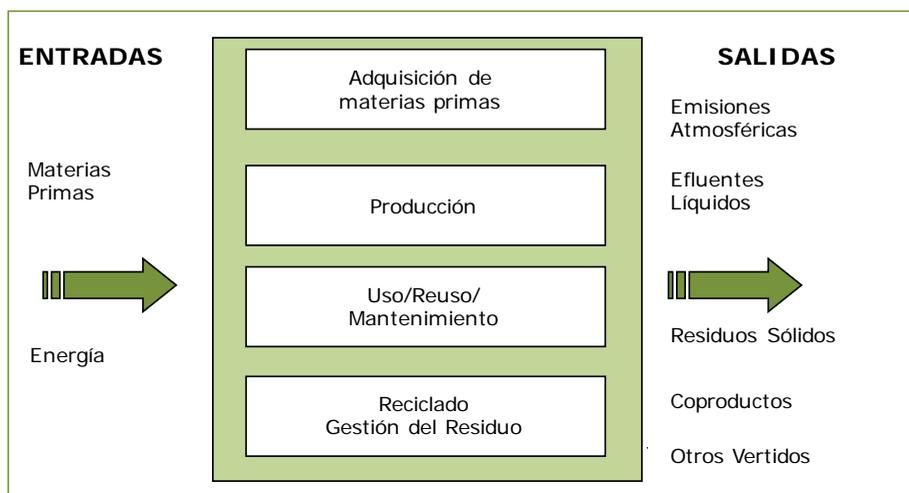
Cuantificación del balance energético asociado a la producción agrícola y alimentos

### ANEXO III.

## DESCRIPCIÓN SOBRE LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados con la producción de un bien o servicio a lo largo de todas las etapas de su vida, teniendo en cuenta desde la extracción de las materias primas, el transporte, la producción, su uso y la gestión final de los residuos (Figura 68).

Figura 68. Diagrama simplificado de las etapas del análisis del ciclo de vida (ACV)



Fuente: Elaboración propia

Los primeros estudios asociados a esta metodología comenzaron en los años 60, y el avance en el desarrollo de esta metodología fue rápido en los años 70 debido a las dos crisis del petróleo, que incentivaron la investigación hacia procesos con menos consumos de energía y materias.

En 1989 la Sociedad de Medio Ambiente, Toxicología y Química (SETAC) organizó un grupo de trabajo en Vermont, en el que se puso nombre por primera vez a la metodología ACV, que fue desarrollada en los años posteriores (SETAC, 1990).

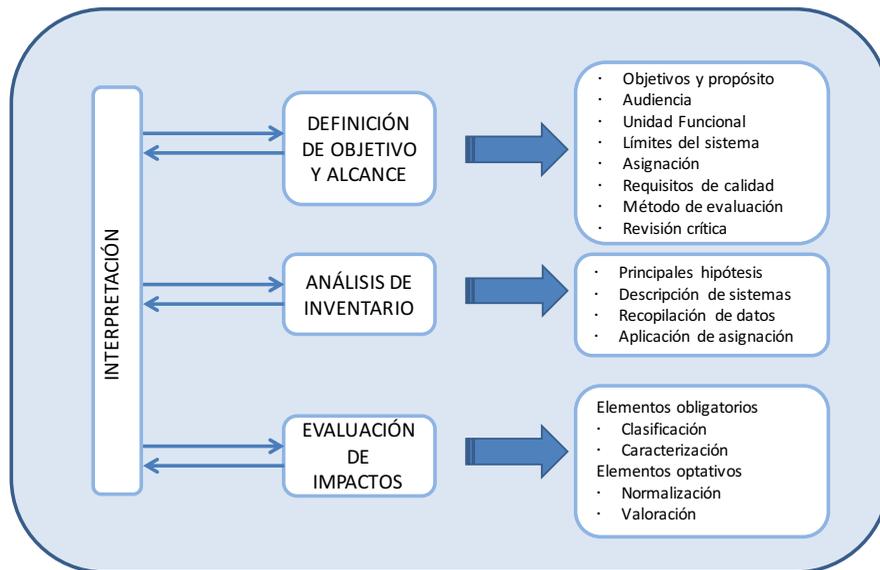
Ante el auge de los estudios de ACV y la falta de homogenización de la metodología, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) creó grupos de trabajo para finalmente publicar la primera norma de ACV en 1997, ISO 14040:1997. Esta norma ha sido posteriormente revisada y ampliada, siendo las normas actualmente en vigor la ISO 14040 y 14044:2006. (AENORa, AENORb, 2006).

Algunos de los objetivos para los que esta metodología se aplica en la actualidad son:

- Identificar las áreas de mejorar ambiental de productos durante las distintas fases de su ciclo de vida
- Informar a quienes toman las decisiones en la industria, organismos públicos, empresas, para planificar diseños o estrategias
- Seleccionar indicadores ambientales
- Para mejorar la imagen de un producto o servicio y posicionarlo mejor que su competidor a través de etiquetados ambientales, declaraciones ambientales de producto, etc.

Se distinguen 4 fases a la hora de realizar un ACV como muestra la Figura 69.

**Figura 69. Etapas del ACV**



A continuación se describe con más detalle cada una de estas etapas.

### 1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Esta fase es de crucial importancia puesto que determinará todas las etapas posteriores. El objetivo y propósito del estudio deben definirse de una manera clara. Para ello, se identificará la función del sistema a analizar y los límites del mismo, describiendo los procesos que entrarán dentro del estudio y los que se quedarán fuera del análisis. En base a esto, se define también la unidad funcional, a la que estarán referidas las entradas y salidas al sistema así como los potenciales impactos finales. Las principales hipótesis que puedan afectar a los resultados finales, tales como las reglas de asignación, y los métodos de evaluación de impacto también se deben detallar en esta etapa. Por último se identificará la audiencia esperada.

### 2. Análisis de inventario del ciclo de vida

Una vez que se ha identificado el sistema de análisis, y la unidad funcional, en esta se recopilan todos los datos tanto cualitativos como cuantitativos necesarios para alcanzar los objetivos que se han definido anteriormente.

Para cada proceso identificado dentro de los límites del sistema, se identifican y cuantifican los flujos de energía, materias así como emisiones, residuos y co-productos y su vinculación con el resto de procesos, utilizando como referencia la unidad funcional descrita en la primera fase del estudio.

Por lo tanto, el análisis del inventario puede ser descrito como un diagrama de flujo, en el que todos los datos referidos a procesos específicos están agrupados y éstos están interconectados entre sí, creando un árbol de procesos.

La recogida de datos para la realización del inventario es probablemente la tarea más laboriosa de todo el estudio, y suele requerir una gran inversión de tiempo y de recursos. Se distinguen dos tipos de datos:

- Datos primarios: describen los flujos directamente relacionados con los procesos que se analizan. Se recomienda en estos casos el uso y recogida de datos específicos, por ejemplo, medidas directas de emisión.
- Datos secundarios: describen flujos relacionados indirectamente con los procesos que se analizan, como procesos de la cadena de suministro. En estos casos, se pueden usar datos proporcionados por bases de datos de análisis de ciclo de vida. Es importante seleccionar adecuadamente los datos, de modo que sean tecnológica-, temporal- y geográficamente representativos.

Existen bases de datos especializadas en función del sector, de la región o país, que cuentan con procesos unitarios en los que ya se cuantifican las entradas y salidas:

- Ecoinvent v3: desarrollada por Ecoinvent Centre, es probablemente junto con GaBi la base de datos más utilizada. Contienen miles de datos de inventario que cubren procesos desde la agricultura hasta la gestión de residuos. <http://www.ecoinvent.ch>.
- GaBi: esta base de datos ha sido generada por la consultora PE International y es una de las más utilizadas actualmente. Contiene más de 4.500 datos de inventario basados en datos primarios de industrias. Se puede encontrar más información en: <http://www.gabi-software.com>.

Asimismo, son muchos los softwares que se utilizan para realizar un ACV, que facilitan el manejo de los datos y los cálculos de los impactos, alguno de ellos gratuitos. Entre los más utilizados destacan SimaPro<sup>16</sup>, GaBi<sup>17</sup> y OpenLCA<sup>18</sup>.

La etapa de análisis de inventario es la etapa más objetiva puesto que muestra los resultados sin ningún juicio de valor. En función del objetivo y de la audiencia a la que va dirigida el estudio, el ACV puede finalizar en esta etapa. En estos casos, los resultados que se obtienen son un listado de entradas y salidas de energía, materias y emisiones al sistema analizado, para cuya comprensión es necesario tener un conocimiento previo de la materia.

### 3. Evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV)

Según la norma ISO 14040:2006, esta etapa tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales a partir de los resultados del análisis de inventario. La norma ISO 14040:2006 distingue cuatro elementos en esta etapa, dos de ellos obligatorios –clasificación y caracterización –y dos de ellos opcionales –normalización y ponderación.

En la clasificación, los datos obtenidos en el inventario, referidos a flujos de entradas y salidas, se clasifican por categorías de impacto, agrupando los flujos en función de los impactos que potencialmente pueden causar. Los impactos que se considerarán se habrán definido previamente en la primera etapa del análisis. Algunas de estas categorías son: cambio climático, acidificación, toxicidad humana, etc.

Una vez clasificados, los flujos se deben convertir a impactos potenciales. Esta etapa se conoce como caracterización, en la que los flujos asignados a una categoría particular se cuantifican utilizando una unidad común para esa categoría, a través de factores de caracterización. Los

<sup>16</sup> <https://www.pre-sustainability.com/simapro>

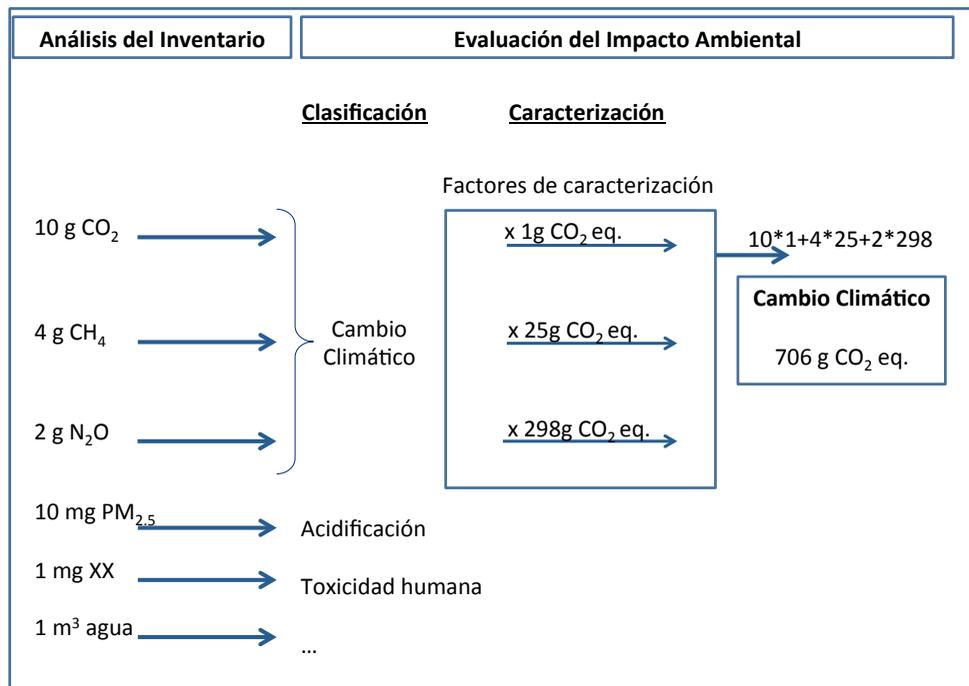
<sup>17</sup> <http://www.gabi-software.com/spain/index/>

<sup>18</sup> <http://www.openlca.org/>

factores de caracterización provienen de modelos científicos, que analizar el potencial efecto de un elemento contaminante con respecto a un elemento de referencia.

La Figura 70 muestra un esquema del proceso de clasificación y caracterización.

Figura 70. Esquema del proceso de clasificación y caracterización en un ACV



Fuente: Elaboración propia

En la normalización, los resultados obtenidos de la caracterización se comparan utilizando una referencia, como el impacto total por categoría en la región de interés o el impacto total generado por una persona en un año.

Finalmente, durante la ponderación, los impactos ambientales se ponderan, dando más peso a unos respecto a otros, de modo que puedan sumarse y así obtener un resultado final total. Para ello se utilizan factores de peso, que pueden referirse a regiones, haber sido calculados por paneles de expertos, comunidades educativas o ciudadanos comunes.

Las normas ISO no recomiendan la normalización ni ponderación en los casos de estudios en los que se realicen comparaciones asertivas, y que vayan dirigidas a cualquier público.

La Comisión Europea realizó una revisión de los métodos de impacto existente en el ámbito del ACV, evaluando la calidad de cada método en base a unos criterios descritos en el mismo documento (EC, 2011).

Para la realización de este estudio, y teniendo en cuenta el objetivo y alcance del análisis, se han utilizado los métodos de evaluación recomendados por la Comisión Europea.

#### 4. Interpretación del ciclo de vida

En esta fase se analizan los resultados de las etapas anteriores así como todos los supuestos e hipótesis que se han realizado a lo largo del estudio. Se deben identificar los supuestos principales y comprobar la robustez de los resultados. En este sentido, el análisis de sensibilidad analiza cómo pueden variar los resultados cuando los datos, las hipótesis y supuestos que se han escogido para el ACV varían. El último paso de la etapa de interpretación es la formulación de conclusiones y de recomendaciones. Éstas se harán teniendo en cuenta la audiencia a la que va dirigido el estudio y en basadas en los resultados obtenidos en las etapas previas.



## ANEXO IV. RELACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Provincia	Código Estación	Nombre	Altitud
Alava	9091O	Vitoria (Aeropuerto De Foronda)	508
Albacete	8175	Albacete (Los Llanos 'Base Aerea')	704
Alicante	8025	Alicante (Ciudad Jardin)	82
Almería	6325O	Almeria (Aeropuerto)	20
Avila	2444C	Avila-Ayuntamiento-	1143
Badajoz	4452	Badajoz (Talavera 'Base Aerea')	185
Baleares	B954	San Jose (Aeropuerto De Ibiza)	16
Barcelona	76	Aeroport De Barcelona (El Prat)	6
Burgos	2331	Burgos (Villafría)	890
Cáceres	3469	Caceres, Ciudad	459
Cádiz	5973	Cadiz	1
Castellón	8500A	Castellon (Almazora)	35
Ciudad Real	4121	Ciudad Real (Escuela De Magisterio)	627
Córdoba	5402	Cordoba (Aeropuerto)	91
A Coruña	1387	A Coruña (Estacion Completa)	58
Cuenca	8096	Cuenca	956
Girona	367	Aeroport De Girona (Costa Brava)	127
Granada	5530E	Granada (Aeropuerto)	570
Guadalajara	3168A	Guadalajara Instituto	685
Guipúzcoa	1024E	San Sebastian (Igueldo)	252
Huelva	4605	Huelva	17
Huesca	9898	Huesca Monflorite	541
Jaén	5270	Jaen-Instituto	510
León	2661	Leon (Virgen Del Camino)	916
Lleida	9771	Lleida (Observatori)	199
La Rioja	9170	Logroño (Agoncillo)	352
Lugo	1505	Rozas (Aerodromo De Lugo)	444

Provincia	Código Estación	Nombre	Altitud
Madrid	3195	Madrid Retiro	667
Málaga	6155A	Malaga (Aeropuerto)	7
R. de Murcia	7228	Murcia (Alcantarilla)	85
Navarra	9263D	Pamplona (Aeropuerto De Noain)	452
Ourense	1690A	Ourense (Granxa Deputacion)	143
P. de Asturias	1249I	Oviedo (El Cristo)	336
Palencia	2401	Palencia (Observatorio)	750
Las Palmas	C249I	Puerto Rosario (Aerop Fuerteventura 'El Matorral')	29
Pontevedra	1495	Vigo (Peinador)	255
Salamanca	2867	Salamanca (Matacan)	790
Tenerife	C449C	Santa Cruz De Tenerife	31
Cantabria	1109	Parayas (Aeropuerto)	6
Segovia	2465A	Segovia (Mariano Quintanilla)	990
Sevilla	5783	Sevilla (Aeropuerto)	26
Soria	2030	Soria (Observatorio)	1082

## ANEXO V.

### LISTADO DE CULTIVOS INCLUIDOS EN EL ESTUDIO

Cultivo	Secano 2014 (ha)	Regadío aire libre 2014 (ha)*	Total 2014 (ha)
Aceituna de almazara	1.772.397	671.011	2.443.408
Aguacate	2.947	11.820	14.767
Ajo	2.294	11.362	13.656
Albaricoque	3.266	16.817	20.083
Alcachofa	323	8.885	9.208
Alfalfa	94.477	172.937	267.414
Algodón	5.307	61.180	66.487
Almendra	534.423	38.741	573.164
Arroz	55	122.309	122.364
Avena	430.577	15.815	446.392
Cebada	2.337.866	194.245	2.532.111
Cebolla	633	19.552	20.185
Centeno	158.820	4.320	163.140
Cerezo	22.466	10.976	33.442
Ciruelo	3.678	12.562	16.240
Colza	24.224	4.855	29.079
Espárrago	1.173	4.515	5.688
Fresa y fresón	108	2.039	2.148
Garbanzos	32.722	514	33.236
Girasol	860.172	54.165	914.337
Guisantes secos	162.574	10.142	172.716
Guisantes verdes	1.814	5.735	7.549
Judías secas	1.160	2.761	3.921
Lechuga	116	4.791	4.907

Cultivo	Secano 2014 (ha)	Regadío aire libre 2014 (ha)*	Total 2014 (ha)
Lentejas	30.694	280	30.974
Limonero	3.965	34.254	38.220
Maíz	20.630	363.870	384.499
Maíz forrajero	78.485	9.298	87.784
Mandarino	8.968	103.625	112.593
Manzano	14.865	18.875	33.740
Melocotón	4.335	73.582	77.917
Melón	1.257	22.875	24.132
Naranja	9.741	149.489	159.231
Otras leguminosas para forraje	309.856	40.959	350.816
Patata	14.544	41.473	56.017
Pepino	27	119	146
Peral	2.305	22.432	24.737

\* Las superficies de regadío bajo plástico no han sido incluidas en este análisis.

## ANEXO VI.

### RATIO ANUAL DE USO DE AGUAS DE ORIGEN SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO

Comunidad Autónoma	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Andalucía</b>							
Total	4.977.079	5.112.119	5.292.089	5.160.033	4.806.850	4.449.846	4.158.931
Aguas superficiales	4.779.403	4.864.846	5.059.186	4.894.410	4.613.699	3.934.093	3.367.536
Aguas subterráneas	197.676	247.273	232.903	265.623	193.151	515.753	791.395
% subterráneas	4,0	4,8	4,4	5,1	4,0	11,6	19,0
<b>Aragón</b>							
Total	2.717.504	2.884.650	2.879.919	2.814.847	2.731.710	2.407.062	2.347.230
Aguas superficiales	2.711.886	2.869.507	2.874.896	2.811.313	2.653.324	2.335.365	2.306.367
Aguas subterráneas	5.618	15.143	5.023	3.534	78.386	71.697	40.863
% subterráneas	0,2	0,5	0,2	0,1	2,9	3,0	1,7
<b>Castilla y León</b>							
Total	2.874.625	2.845.539	2.749.852	2.620.457	2.626.393	2.550.739	2.403.904
Aguas superficiales	2.815.295	2.783.723	2.744.335	2.616.731	2.620.280	2.389.628	2.347.346
Aguas subterráneas	59.330	61.816	5.517	3.726	6.113	161.111	56.558
% subterráneas	2,1	2,2	0,2	0,1	0,2	6,3	2,4
<b>Castilla-La Mancha</b>							
Total	1.831.752	1.910.508	2.067.876	2.178.466	2.425.585	1.902.349	1.794.526
Aguas superficiales	1.541.213	1.749.057	1.815.536	1.907.471	1.887.100	530.462	349.685
Aguas subterráneas	290.539	161.451	252.340	270.995	538.485	1.371.887	1.444.841
% subterráneas	15,9	8,5	12,2	12,4	22,2	72,1	80,5
<b>Cataluña</b>							
Total	3.227.369	2.156.740	1.802.318	1.951.514	2.256.344	1.684.462	1.905.548
Aguas superficiales	3.161.340	1.961.930	1.792.639	1.933.673	2.248.595	1.667.066	1.893.186
Aguas subterráneas	66.029	194.810	9.679	17.841	7.749	17.396	12.362

Comunidad Autónoma	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Andalucía</b>						
Total	3.934.170	3.789.974	4.152.152	4.166.963	4.118.024	3.791.506
Aguas superficiales	3.089.097	2.925.341	3.354.051	3.538.686	2.975.172	2.733.248
Aguas subterráneas	845.073	864.633	798.101	628.277	1.142.852	1.058.258
% subterráneas	21,5	22,8	19,2	15,1	27,8	27,9
<b>Aragón</b>						
Total	2.408.430	2.356.110	2.365.553	2.509.116	2.948.391	3.152.356
Aguas superficiales	2.342.416	2.264.225	2.297.445	2.450.626	2.816.759	3.013.058
Aguas subterráneas	66.014	91.885	68.108	58.490	131.632	139.298
% subterráneas	2,7	3,9	2,9	2,3	4,5	4,4
<b>Castilla y León</b>						
Total	2.497.042	2.428.032	2.381.958	2.264.720	2.702.397	2.975.512
Aguas superficiales	2.365.015	2.326.195	2.301.729	2.222.613	2.280.685	2.448.258
Aguas subterráneas	132.027	101.837	80.229	42.107	421.712	527.254
% subterráneas	5,3	4,2	3,4	1,9	15,6	17,7
<b>Castilla-La Mancha</b>						
Total	1.931.566	1.732.614	2.002.694	1.679.643	1.627.772	1.876.322
Aguas superficiales	535.119	417.960	363.171	359.804	635.622	835.124
Aguas subterráneas	1.396.447	1.314.654	1.639.523	1.319.839	992.150	1.041.198
% subterráneas	72,3	75,9	81,9	78,6	61,0	55,5
<b>Cataluña</b>						
Total	1.800.057	1.756.047	1.676.260	1.635.164	1.667.150	1.715.671
Aguas superficiales	1.788.464	1.740.135	1.658.060	1.603.923	1.557.620	1.525.487
Aguas subterráneas	11.593	15.912	18.200	31.241	109.530	190.184

## ANEXO VII.

### EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS A NIVEL PROVINCIAL Y PERIODO 2000-2011

Provincia	2000	2001	2002	2003	2004	2005
A Coruña	--	--	--	--	--	--
Alava	1,9	1,8	1,3	1,5	1,5	1,4
Albacete	64,1	65,2	70	71	72,5	73,6
Alicante	97,8	130,6	163,4	173,8	184	181,2
Almería	101,8	97,4	90	91	90,2	93,3
Asturias	--	--	--	--	--	--
Ávila	43,1	48,8	50,3	49,9	54,7	57,2
Badajoz	4,5	3,9	4,5	4,2	4,3	4,8
Baleares	22,7	23,1	26,1	22	21,3	22,4
Barcelona	34,9	32,9	30	28,1	26,9	31,5
Burgos	30,3	36,5	34,7	32,8	30,5	28,5
Cáceres	17,8	18,9	20,4	21	21,9	22,7
Cádiz	7,4	6,8	11,2	10,7	10,3	9,5
Cantabria	--	--	--	--	--	--
Castellón	37,7	37,7	35,5	36	34,5	37,4
Ciudad Real	38,9	40,1	42,5	43,9	43,7	42,9
Córdoba	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
Cuenca	39,2	39,2	39,2	39,2	39,2	39,8
Girona	15,9	11,9	8,2	7,4	6,7	7,5
Granada	17,3	10	12,4	10,5	9,7	14,5
Guadalajara	32	32	32	32	32	32
Guipúzcoa	--	--	--	--	--	--
Huelva	38,6	44	34,8	34,6	27,3	30,3
Huesca	--	--	--	--	--	--

Provincia	2006	2007	2008	2009	2010	2011
A Coruña	--	--	--	--	--	--
Alava	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Albacete	71,5	73,6	73	71,7	68,1	64,6
Alicante	162	172,6	143,7	124,8	138	129
Almería	101,2	85,3	92,9	100,4	97,4	97,1
Asturias	--	--	--	--	--	--
Ávila	56,8	57,1	56,2	56,5	56,7	55,4
Badajoz	2,5	3	4,9	4,7	4	4,5
Baleares	21,6	20	20	21,2	18,5	18,5
Barcelona	36	32	32	32	32	32
Burgos	29,4	30,9	31,6	32	32	40,7
Cáceres	23,8	23,6	20,1	15,4	15,9	15,6
Cádiz	9	10,4	11,2	11,2	11,2	11,2
Cantabria	--	--	--	--	--	--
Castellón	37,3	39	53,5	56,9	61,8	64
Ciudad Real	47,6	50,5	48,9	47,8	36,1	26,1
Córdoba	18,6	18,6	18,2	12,3	10,7	9,8
Cuenca	42,2	43,1	44,1	51,9	44,2	38,5
Girona	6,9	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Granada	15,6	15,9	16	10,1	4,5	5,6
Guadalajara	32	37,9	42,4	45,4	34,6	33,7
Guipúzcoa	--	--	--	--	--	--
Huelva	27,7	21,8	47,9	55,2	53,9	52,8
Huesca	--	--	--	--	--	--

Provincia	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Jaén	77,5	79,8	107,7	116,4	97,3	107,2
La Rioja	6,4	7,1	6	5,7	5,8	6,1
Las Palmas	--	--	--	--	--	--
León	26,7	25,1	21,9	21,7	22,3	22,6
Lleida	--	--	--	--	--	--
Lugo	--	--	--	--	--	--
Madrid	3,7	3,6	3,4	3,2	3,1	3,1
Málaga	23,1	24	27,2	22,4	28,6	35,5
Navarra	53,7	53,6	54,3	48,8	54	54,3
Ourense	--	--	--	--	--	--
Palencia	25,6	26,2	27,9	28,1	25,6	24,6
Pontevedra	--	--	--	--	--	--
R. De Murcia	113,3	110,8	121,4	129,8	138,8	138
S.C. De Tenerife	--	--	--	--	--	--
Salamanca	11,4	22,5	22,2	21,1	28,2	35,2
Segovia	46,9	45,6	42	42,8	43,6	44,3
Sevilla	17,5	15,9	16,6	16,1	15,9	17,1
Soria	22,6	26	26,5	25,7	31,6	30,2
Tarragona	31	31,3	30,5	30,4	29,9	36,4
Teruel	25,3	25,6	25,9	25,5	20,5	20,1
Toledo	21,2	21,1	16,4	16,3	16,8	15,9
Valencia	38	46,5	38,4	39,8	37,6	39,3
Valladolid	44,9	46,1	49,3	46,5	45,9	45,3
Vizcaya	--	--	--	--	--	--
Zamora	13,1	14,5	26,1	25,6	25,5	25,9
Zaragoza	52,6	58,8	62,9	59,6	57,6	59,4

Provincia	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Jaén	116,4	120	105,6	97,5	89,7	87,8
La Rioja	5,6	5,9	5,8	6,1	5,8	6,2
Las Palmas	--	--	--	--	--	--
León	22,5	21,9	22	22,3	20,2	21,1
Lleida	--	--	--	--	--	--
Lugo	--	--	--	--	--	--
Madrid	3	3	3,4	3,3	3,2	4,3
Málaga	38,5	29,9	31,5	29,7	20	16
Navarra	57,2	55,8	50,4	52	51,4	53,2
Ourense	--	--	--	--	--	--
Palencia	24,3	20,4	21,3	21,3	21,9	21,4
Pontevedra	--	--	--	--	--	--
R. De Murcia	119,9	123,5	104	92,9	99,2	97,1
S.C. De Tenerife	--	--	--	--	--	--
Salamanca	35,3	34,4	33,7	37,4	39,8	37,9
Segovia	45	45,1	38,7	35,1	30,8	30,4
Sevilla	17	17,5	17,6	17,5	16,2	15,1
Soria	28,9	29,9	30,2	30,3	30	30,5
Tarragona	42,6	44,9	39,7	37,9	37,9	37,8
Teruel	26,8	29,9	30	28,5	27,5	27,3
Toledo	16,9	17,8	16,9	14,9	14	13,9
Valencia	42,9	45,6	52,4	50,1	50,4	54,2
Valladolid	43,8	42,7	41,7	43,6	42,4	41,2
Vizcaya	--	--	--	--	--	--
Zamora	26,1	20,2	20,4	21,5	20,9	19,6
Zaragoza	57,8	57,5	59,1	59	58,5	54,5

Fuente: MAGRAMA 2015c

## ANEXO VIII.

### NECESIDADES DE FERTILIZACIÓN DE LOS DISTINTOS CULTIVOS

Cultivo		N (kg/ton)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ton)	K <sub>2</sub> O (kg/ton)
Código	Tipo			
101	Trigo	30,0	12,0	30,0
102	Cebada	28,0	12,0	28,0
103	Avena	27,5	12,5	30,0
104	Centeno	19,0	13,0	18,0
105	Triticale	-23,0	17,0	23,0
107	Arroz	21,0	11,0	18,0
108	Maíz	29,0	12,0	21,0
201	Judía seca	12,5	20,0	32,0
203	Lenteja	12,5	8,0	12,0
204	Garbanzo	12,5	8,0	35,0
205	Guisante seco	12,5	20,0	30,0
206	Veza	12,5	15,0	26,0
211	Yero	12,5	10,0	13,0
303	Patata media estación	5,0	2,0	10,0
402	Remolacha	2,5	1,1	5,1
403	Algodón	50,0	20,0	36,0
409	Girasol	40,0	20,0	40,0
419	Tabaco	50,0	41,4	38,0
421	Colza	45,0	27,5	37,5
602	Maíz Forrajero	13,0	6,0	15,0
606	Alfalfa	1,4	12,0	15,0
610	Veza para forraje	12,5	25,0	32,5
611	Otras leguminosas para forraje	12,5	25,0	32,5
616	Praderas polifitas	1,4	17,0	26,0

Cultivo		N (kg/ton)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ton)	K <sub>2</sub> O (kg/ton)
Código	Tipo			
703	Espárrago	23,9	6,7	29,8
705	Lechuga	2,5	1,0	5,3
711	Sandía	2,4	1,2	3,3
712	Melón	3,6	2,0	8,3
714	Pepino	3,2	1,4	3,5
717	Tomate	3,0	1,3	5,3
718	Pimiento	3,8	1,5	5,8
720	Fresa y fresón	5,0	3,0	6,0
721	Alcachofa	13,0	4,4	23,0
723	Ajo	7,1	2,5	5,3
724	Cebolla	2,3	1,2	3,4
732	Guisante verde	26,3	12,5	28,8
1011	Trigo_duro	30,0	12,0	30,0
1012	Trigo_blando	30,0	12,0	30,0
1101	Naranja	13,5	3,4	6,7
1103	Mandarino	12,3	3,1	6,2
1104	Limonero	19,6	4,9	9,8
1201	Manzano	2,5	0,9	2,7
1202	Peral	2,5	0,8	2,8
1206	Albaricoquero	3,5	1,3	5,8
1207	Cerezo y guindo	5,5	1,3	3,0
1208	Melocotonero	3,4	1,8	3,8
1209	Ciruelo	3,3	0,7	3,3
1213	Aguacate	2,8	1,1	6,7
1218	Almendro	33,7	12,0	47,0
1302	Viñedo vino	6,0	3,1	10,0
1402	Aceituna de almazara	17,5	4,5	22,5

Fuentes: García (1999) y García-Serrano et al. (2010)

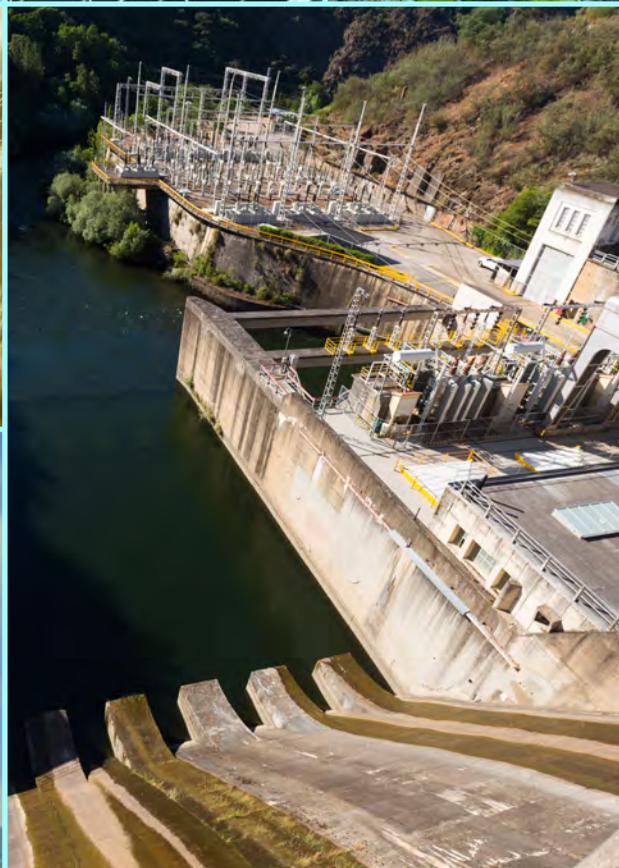
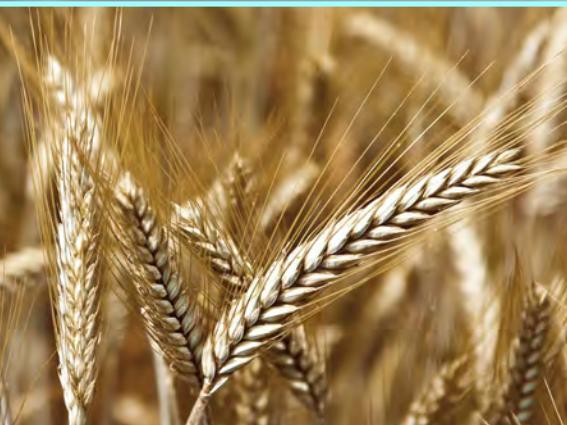
## ANEXO IX.

### CONSUMOS DE COMBUSTIBLE HORARIOS DE ALGUNAS LABORES AGRÍCOLAS EN LOS CULTIVOS DE LEGUMINOSAS DE GRANO Y PATATA

Cultivo	Consumo horario (l/h)				
	Labores preparatorias y barbecho	Siembra o Plantación	Fertilización	Tratamientos fitosanitarios	Recolección
Judía seca	14,10	4,24	1,13	1,44	12,00
Lenteja	14,10	4,11	1,13	1,44	12,00
Garbanzo	14,10	4,24	1,13	1,44	12,00
Guisante seco	14,10	4,11	1,13	1,44	12,00
Veza	14,10	4,11	1,13	1,44	12,00
Yero	14,10	4,11	1,13	1,44	13,00
Patata	14,10	13,24	1,13	1,44	18,26

Fuentes: MAGRAMA Plataforma de conocimiento para el medio rural y pesquero. (<http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/>).





[fundacioncanal.com](http://fundacioncanal.com)



Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid