

IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

***Estudio comparativo de ocho tecnologías de
generación eléctrica***

RESUMEN



ÍNDICE

1. Justificación del estudio	4
2. Objetivo del estudio	4
3. Autoría y patrocinadores	5
4. Sistemas de producción de electricidad analizados	6
5. Impactos medioambientales analizados	7
➤ Calentamiento global	7
➤ Disminución de la capa de ozono	7
➤ Acidificación	8
➤ Eutrofización	9
➤ Contaminación por metales pesados	9
➤ Sustancias carcinógenas	9
➤ Niebla de invierno	9
➤ Niebla fotoquímica o de verano	9
➤ Generación de residuos industriales	9
➤ Radiactividad	10
➤ Residuos radiactivos	10
➤ Agotamiento de los recursos energéticos	10
6. Metodología del estudio: el ACV	10
7. Unidad de medida de los impactos medioambientales	12
8. Ámbito geográfico del estudio	12
9. Resultados del estudio	13
10. Análisis de los resultados por tecnologías	14
11. Análisis de los resultados por categorías de impacto	16
➤ Calentamiento global	18
➤ Disminución de la capa de ozono	19
➤ Acidificación	20
➤ Eutrofización	21
➤ Contaminación por metales pesados	22
➤ Sustancias carcinógenas	23
➤ Niebla de invierno	24
➤ Niebla de verano	25

➤	Radiactividad	26
➤	Residuos industriales	27
➤	Agotamiento de recursos energéticos	28
12.	<i>Conclusiones</i>	29
13.	<i>ANEXO 1: Mix de electricidad utilizado en el estudio</i>	31
14.	<i>ANEXO 2: Información adicional sobre las categorías de impacto</i>	32
15.	<i>ANEXO 3: Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)</i>	35
16.	<i>ANEXO 4: ACV de la Energía solar fotovoltaica</i>	42

1. Justificación del estudio

El mercado eléctrico sólo pueden funcionar de manera eficiente y transparente si los precios finales de la electricidad reflejan la totalidad de los costes asociados a su producción y, entre ellos, el coste de los daños medioambientales y sociales que provoca.

El mercado eléctrico, sin embargo, no funciona actualmente así ya que **las fuentes energéticas convencionales**, es decir, las basadas en combustibles fósiles y en el uranio, **sólo incorporan en sus precios finales los costes privados originados en la fase de generación**, como son el combustible, los costes de capital y de operación, la mano de obra, los impuestos y los seguros.

El coste económico que suponen los impactos medioambientales y sociales que provocan las energías convencionales son, en cambio, sistemáticamente externalizados, es decir, repercutidos sobre la sociedad en su conjunto y no sobre los propios consumidores de electricidad.

La externalización de estos costes ambientales y sociales no sólo distorsiona el mercado eléctrico, al penalizar aquellas fuentes energéticas de menor impacto –las energías renovables– y bonificar a las más impactantes –las de origen convencional– sino que además desincentiva a las empresas que provocan el daño a adoptar medidas tendentes a su evitación o reparación. Esta situación debe, pues, ser corregida.

2. Objetivo del estudio

El objetivo de este estudio es el de **cuantificar de forma científica los daños o impactos medioambientales y sociales provocados por las diversas tecnologías de generación de electricidad**.

La posibilidad de cuantificar y, por tanto, de comparar cuantitativamente los impactos medioambientales de las diferentes tecnologías de generación de electricidad, constituye la **principal novedad de este trabajo científico** respecto a otros estudios anteriores que se limitaban, en general, a realizar una evaluación cualitativa de impactos.

La cuantificación de dichos impactos permitirá en una segunda fase –que escapa al ámbito de este estudio pero en la que ya se está trabajando– su valoración en pesetas. Una vez conocido **el coste económico de dichos impactos**, se elaborará una propuesta para la completa internalización de tales costes en los precios finales de la electricidad. Sólo así podrán ser eliminadas las ineficiencias que actualmente distorsionan el mercado eléctrico.

3. Autoría y patrocinadores

Este estudio es resultado de dos años de intenso trabajo llevado a cabo por un equipo de expertos de AUMA, una prestigiosa empresa consultora independiente, con la participación en tareas de revisión de profesores y catedráticos de la Universidad de Barcelona (UB), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Universidad Rovira i Virgili (URV) de Tarragona.

El trabajo ha sido impulsado por la Asociación Española de Productores de Energías Renovables-APPA con la inestimable participación de siete organismos públicos integrados en el Consejo director del estudio:

- El Departamento de Industria, Comercio y Desarrollo del Gobierno de Aragón.
- El Instituto Catalán de la Energía (Icaen) del Gobierno de la Generalitat de Cataluña.
- La Sociedad Gestión Energética de Galicia (Gestenga) del Gobierno de la Xunta de Galicia.
- El Departamento de Industria, Comercio, Turismo y Trabajo del Gobierno de Navarra.
- El Ente Vasco de la Energía (EVE) del Gobierno del País Vasco.
- El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), dependiente del Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), dependiente del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

4. Sistemas de producción de electricidad analizados

Este estudio evalúa y compara los **ocho principales sistemas de producción de electricidad** utilizados actualmente en España, cinco convencionales y tres renovables, tomando como referencia plantas de potencia homogénea:

➤ **Sistemas convencionales**

- **Térmico de lignito**
El lignito es un combustible fósil de poder calorífico relativamente bajo y gran proporción de azufre y componentes inertes.
- **Térmico de carbón**
El carbón es un combustible fósil de mediano poder calorífico, bajo cuya denominación se incluyen mezclas de hullas y antracitas.
- **Térmico de fuel-oil**
El fuel-oil es el principal derivado del petróleo –un combustible fósil de alto poder calorífico– utilizado para generar electricidad
- **Térmico de gas natural**
El gas natural es también un combustible fósil de alto poder calorífico.
- **Térmico nuclear**
Estas centrales utilizan como combustible diversos derivados del uranio natural.

➤ **Sistemas renovables¹**

- **Eólico**
La tecnología eólica transforma la energía del viento en trabajo mecánico que, al aplicarse a un alternador, genera electricidad.
- **Minihidráulico**
La tecnología minihidráulica transforma la energía del agua en trabajo mecánico que, al mover una turbina conectada a un alternador, genera electricidad. Se consideran centrales minihidráulicas sólo aquellas con una potencia inferior a 10 Megavatios (MW).

¹ El estudio no incluye la biomasa debido a la complejidad que suponen la multitud de combustibles, con variados efectos asociados, que se engloban bajo este término.

▪ **Solar fotovoltaico²**

La tecnología solar fotovoltaica transforma la energía fotónica de la radiación solar en energía eléctrica.

5. Impactos medioambientales analizados

Los impactos medioambientales analizados en el estudio se agrupan en doce grandes categorías³:

➤ **Calentamiento global**

El calentamiento global es el proceso de aumento gradual de la temperatura de la Tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, incremento provocado por los procesos de combustión con fines energéticos de carburantes fósiles y por la deforestación⁴.

En la siguiente figura se recoge, esquemáticamente, este tipo de impacto y la evolución en el último siglo del contenido en la atmósfera de dióxido de carbono, principal gas de efecto invernadero.

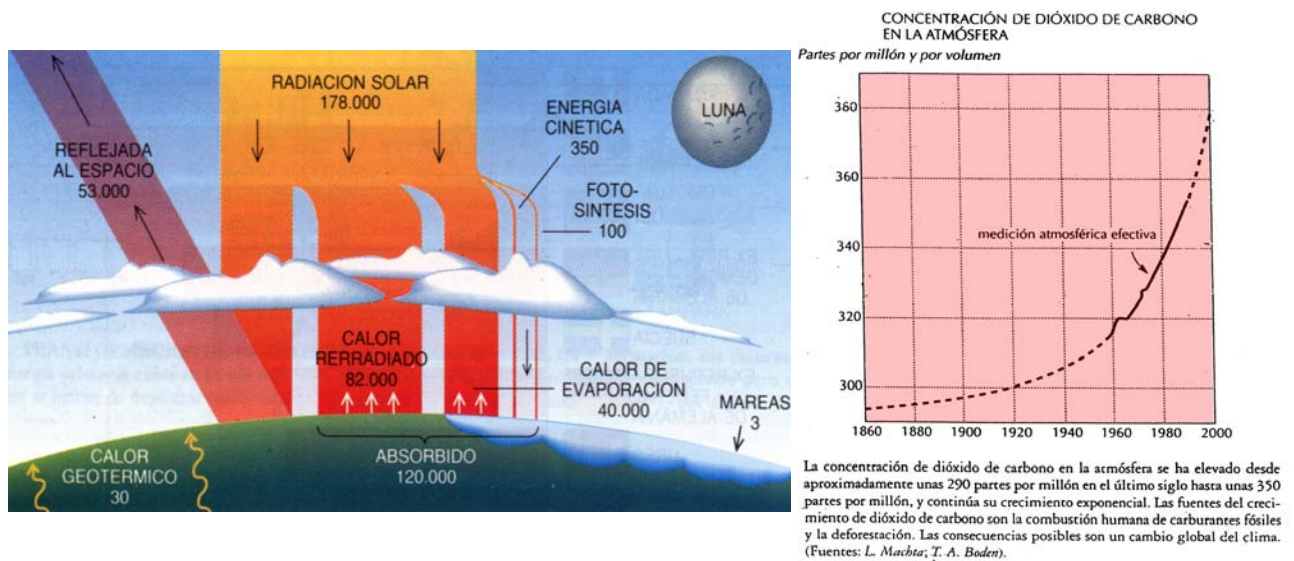


Figura 1: Representación simplificada del balance energético terrestre y de la evolución de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

² La tecnología fotovoltaica se encuentra todavía en una fase de desarrollo y con un escaso nivel de implantación industrial, todo lo contrario que el resto de tecnologías consideradas en el estudio. Pese a su inclusión en el mismo, el sistema solar fotovoltaico no puede ser estrictamente comparado con los restantes sistemas energéticos. Su análisis es por ello objeto de explicación aparte (Ver Anexo 4).

³ Este estudio no ha considerado aquellas categorías de impacto sobre las que o no existen datos o no hay consenso científico sobre la forma de considerarlos. Es el caso de las siguientes categorías: impacto visual, ruido, biodiversidad, riesgos, agotamiento de recursos no energéticos, seguridad y salud laboral, desmantelamiento de instalaciones y ocupación del territorio.

⁴ Para más información sobre ésta y las otras categorías de impacto, consultar el Anexo 2 de este Dossier.

➤ **Disminución de la capa de ozono**

La disminución de la capa de ozono es el proceso de reducción, tanto en concentración como en grosor, de la capa de partículas de ozono presente en la estratosfera. Este fenómeno es consecuencia de la alteración del balance atmosférico de oxígeno y ozono. Las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC), un hidrocarburo sintético utilizado como refrigerante, son las principales responsables de este impacto.

➤ **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 de nitrógeno provenientes principalmente de la quema de combustible fósiles. Tras reaccionar con el vapor de agua presente en el aire, estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que la lluvia precipita sobre la superficie terrestre. En la siguiente figura se esquematiza el proceso global de acidificación del medio.

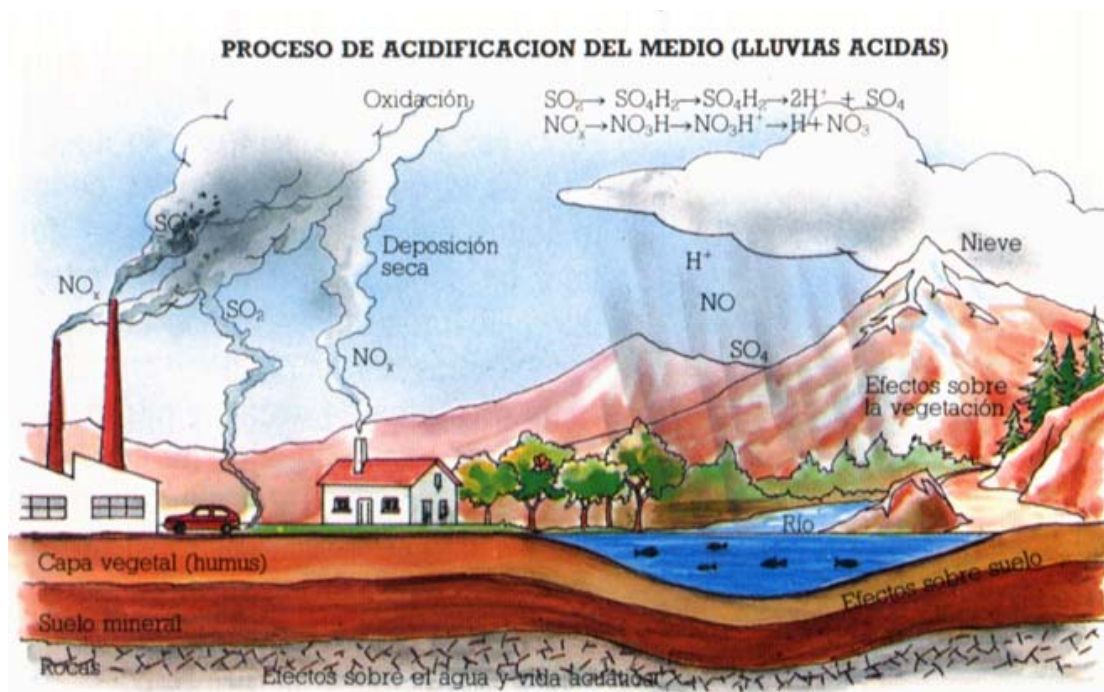


Figura 2: Representación simplificada de los procesos de acidificación.

➤ **Eutrofización**

La eutrofización es el proceso de acumulación de nutrientes en las aguas con el consiguiente crecimiento masivo de organismos, fundamentalmente algas, y la disminución de la concentración de oxígeno.

➤ **Contaminación por metales pesados**

Los metales pesados son aquéllos que tienen un peso atómico relativamente alto y una densidad aproximada de 5 g/cm^3 . Acostumbran a ser muy tóxicos, persistentes y bioacumulativos, tanto en el agua como en el aire y el suelo, por lo que su peligrosidad es muy elevada. Los más nocivos para la salud humana son el plomo, el cádmio y el mercurio.

➤ **Sustancias carcinógenas**

Sustancias carcinógenas son todas aquellas que provocan o favorecen la aparición del cáncer.

➤ **Niebla de invierno**

La niebla de invierno es aquella provocada por la elevada concentración en el aire de óxido de azufre y partículas en suspensión provenientes de la industria y el transporte. Estas sustancias actúan como núcleos de condensación del vapor de agua en condiciones de humedad elevada y bajas temperaturas, que suelen producirse en invierno, de ahí su nombre.

➤ **Niebla fotoquímica o de verano**

La niebla de verano es aquella provocada por altas concentraciones de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) acompañadas de una fuerte radiación solar. En estas circunstancias se generan altas concentraciones de ozono superficial, un fenómeno ligado a las altas temperaturas estivales.

➤ **Generación de residuos industriales**

Los residuos industriales son todos aquéllos producidos por la industria.

➤ **Radiactividad**

La radiactividad es el proceso por el cual determinados isótopos de algunos elementos químicos, como, por ejemplo, el uranio, emiten espontáneamente partículas y/o rayos nocivos para los seres vivos.

➤ **Residuos radiactivos**

Los residuos radiactivos son aquéllos que presentan trazas de radiactividad en concentraciones superiores a los valores límite establecidos. Son producidos fundamentalmente por las centrales nucleares.

➤ **Agotamiento de los recursos energéticos**

Los recursos energéticos no renovables –combustible fósiles y minerales– se van agotando a medida que son utilizados, disminuyendo las reservas de los mismos.

6. Metodología del estudio: el ACV

La metodología utilizada para la estimación de los impactos medioambientales de los sistema energéticos considerados ha sido la del **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**. Se trata de una herramienta de gestión ambiental reconocida internacionalmente –Norma ISO 14.040– y utilizada para identificar de forma objetiva y rigurosa los impactos medioambientales de un producto, proceso o actividad “**desde la cuna hasta la tumba**”, es decir, **a lo largo de todas las fases de su ciclo de vida –desde la extracción de las materias primas necesarias para su elaboración hasta su gestión final como residuo–**.

El estudio ha analizado las siguientes fases del ciclo de vida de los sistemas de generación de electricidad:

- Obtención del combustible (minería y extracción).
- Tratamiento del combustible (preparación).
- Transporte del combustible.
- Construcción de la central (Obras y equipamientos)⁵.

⁵ El análisis de esta fase incluye la generación de emisiones residuales y el depósito de residuos.

➤ Explotación de las central (Producción de electricidad)

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, el esquema del ciclo de vida analizado para el sistema térmico de carbón.

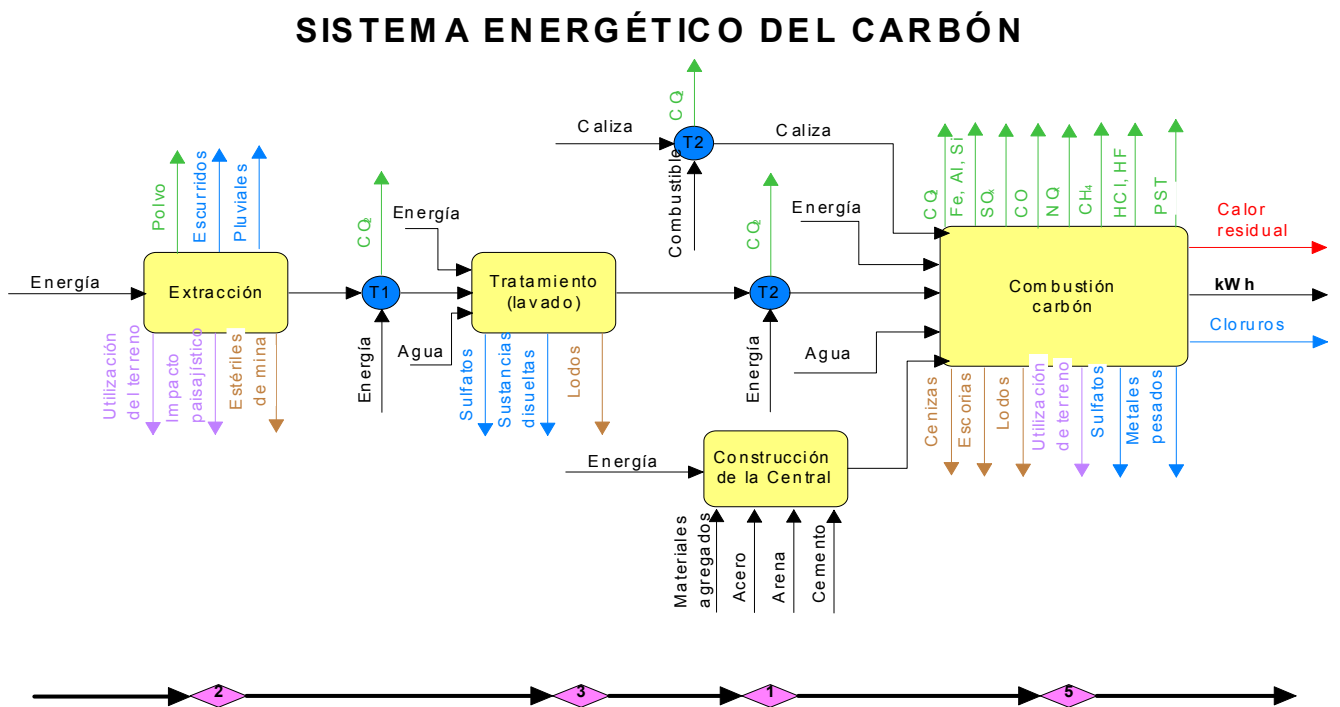


Figura 3: Análisis del sistema energético del carbón.

El Análisis del Ciclo de Vida de los ocho sistemas de generación de electricidad considerados ha obligado a inventariar para cada sistema energético 569 entradas – de energía y materias primas– y salidas –de emisiones residuales–, lo que supone haber manejado un total de **4.552 entradas y salidas**. Ello ha supuesto un considerable esfuerzo de búsqueda de datos muy dispersos, cuyo tratamiento ha hecho además necesaria la utilización de un programa especial de cálculo informático diseñado para este tipo de estudios, denominado Simapro⁶.

La utilización de la metodología del ACV ha permitido superar las fragmentaciones reductivistas de estudios anteriores que limitaban su análisis a la fase de explotación de la central.⁷

⁶ Ver Anexo 3 para información sobre las etapas del Análisis del Ciclo de Vida.

⁷ Este estudio no ha analizado la fase de desmantelamiento de centrales debido a la falta internacional de datos al respecto. Tampoco se han analizado las fases de transporte y distribución de electricidad, y la de uso final de la electricidad por entenderse que los impactos medioambientales de estas dos fases son iguales para todas las tecnologías consideradas.

7. Unidad de medida de los impactos medioambientales

La unidad utilizada para medir el impacto medioambiental de los ocho sistemas de generación de electricidad analizados es el llamado ***Ecopunto de impacto***. El estudio concluye otorgando a cada una de las tecnologías estudiadas un valor total de ecopuntos de impacto medioambiental por Terajulio de electricidad producido. (Un Terajulio equivale a 278 Megavatios hora (MWh), es decir, la cantidad de electricidad que consumen 278.000 estufas de 1.000 W durante una hora).

Es importante remarcar que **los ecopuntos son unidades de penalización ambiental**, de forma que cuantos más ecopuntos obtenga un sistema de generación de electricidad mayor será su impacto medioambiental, y a la inversa, los sistemas con menor puntuación de ecopuntos resultarán ser los más *amigables* con el medio ambiente.

8. Ámbito geográfico del estudio

El ámbito geográfico de este estudio es España⁸. De hecho **este trabajo es el primer estudio de su clase y profundidad –por número de tecnologías, categorías de impacto y fases de vida analizadas– aplicado a la realidad española.**

⁸ Para la realización de los inventarios de impacto relativos a los sistemas térmicos nuclear y de gas natural, así como eólico y fotovoltaico se han utilizado datos de origen europeo. Al analizar los combustibles fósiles, se han evaluado también las emisiones contaminantes que tienen lugar en los países productores, mayoritariamente fuera del territorio español.

9. Resultados del estudio

La amplia **experiencia de los autores** en estudios relacionados con el medio ambiente y la energía, el empleo de un método de contabilidad de impactos riguroso y aceptado internacionalmente como el **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)** y el empleo de **programas de cálculo** de probada capacidad (Simapro) garantizan la **fiabilidad** de los resultados.

Los resultados del estudio en términos de ecopuntos de impactos son los siguientes:

- Los sistemas de generación de electricidad basados en los **combustibles fósiles tradicionales (lignito, carbón, petróleo)** son los únicos que superan los 1.000 ecopuntos, por lo que resultan como los de mayor impacto medioambiental.

Categoría 1- Total ecopuntos superior a 1.000	
SISTEMA LIGNITO	1735
SISTEMA PETRÓLEO	1398
SISTEMA CARBÓN	1356

- Los sistemas de generación de electricidad basados en la **energía nuclear y en el gas natural** se sitúan en la horquilla entre los 100 y los 1.000 ecopuntos y, por tanto, en una posición intermedia de impacto.

Categoría 2- Total ecopuntos comprendido entre 100 y 1000	
SISTEMA NUCLEAR	672
SISTEMA GAS NATURAL	267

- Los dos sistemas basados en recursos renovables que tienen un mayor grado de desarrollo e implantación en España, el **minihidráulico y el eólico**, son los que presentan un menor impacto medioambiental, obteniendo una puntuación inferior a los 100 ecopuntos de impacto⁹.

⁹ La tecnología solar fotovoltaica se encuentra todavía en una fase de desarrollo y con un escaso nivel de implantación industrial, todo lo contrario que el resto de tecnologías consideradas en el estudio. El sistema solar fotovoltaico no puede ser por ello estrictamente comparado con los restantes sistemas energéticos. Es por ello que se ha considerado más conveniente presentar sus resultados en ecopuntos en un epígrafe aparte (Ver Anexo 4).

Categoría 3- Total ecopuntos inferior a 100	
SISTEMA EÓLICO	65
SISTEMA MINIHIDRÁULICO	5

10. Análisis de los resultados por tecnologías

Los resultados obtenidos presentan una gran concordancia con las opiniones mayoritariamente existentes hasta ahora dentro de la comunidad científica, basadas en evaluaciones anteriores: **las energías renovables tiene, en general, un impacto medioambiental menor que las energías convencionales.**

Gracias a este estudio es, sin embargo, posible por primera vez en España cuantificar las diferencias de impacto entre la diversas tecnologías de generación de electricidad. De su análisis comparativo se pueden extraer, entre otras, las siguientes conclusiones:

- **el impacto medioambiental de las energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables.¹⁰**
- **Producir un kilovatio hora (kWh) de electricidad con el mejor sistema renovable –el minihidráulico– tiene un impacto medioambiental:**
 - **300 veces inferior al que tiene producirlo con lignito.**
 - **250 veces menor respecto al que supone generarlo con carbón o petróleo.**
 - **125 veces inferior al que implica producirlo con uranio.**
 - **50 veces menor que generarlo con gas natural.**

El relativamente reducido impacto medioambiental de los sistemas renovables de generación de electricidad se explican por las siguientes razones:

- **Las energías renovables no requieren para su funcionamiento ningún proceso de combustión¹¹, que es normalmente el causante**

¹⁰ Las cinco tecnologías convencionales de generación de electricidad suman un total de 5.452 ecopuntos de impacto. Las dos tecnologías renovables comparadas –la eólica y la minihidráulica– suman 70 ecopuntos. Si ponderamos ambos resultados dividiendo el total de ecopuntos por el número de tecnologías incluidas en cada bloque ($5.452/5=1.090$ y $70/2=35$) obtendremos una relación de impacto de 31 a 1 a favor de las energías renovables.

¹¹ La única energía renovable que requiere combustión es la biomasa. Su balance de emisiones contaminantes es, sin embargo, cero ya que las emisiones, por ejemplo, de dióxido de carbono derivadas

de los mayores impactos medioambientales de las energías no renovables.

- **Los recursos energéticos renovables son inagotables y además dispersos¹²**, lo que hace que las necesidades de transformación y transporte sean menores.
- Los impactos medioambientales de las energías renovables no sólo son más reducidos que los de las energías convencionales sino que además tienen, por lo general, **carácter local**, lo que facilita la adopción de medidas tanto de vigilancia como de minimización de los mismos.

La gran diferencia de impacto ambiental entre los sistemas de generación de electricidad convencionales y los renovables habría sido todavía mayor si el estudio no hubiera mantenido una **actitud de no penalizar a los sistemas convencionales**. Prueba de ello es, por ejemplo, el hecho de que los datos utilizados para analizar la energía minihidráulica corresponden en realidad a grandes centrales hidráulicas, lo que implica que en realidad se sobredimensionan sus impactos y, por tanto, se penalizan sus resultados en ecopuntos.

Las fuentes convencionales de generación de electricidad habrían sido penalizadas todavía más de haberse podido considerar las categorías de impacto no analizadas como, por ejemplo, **el desmantelamiento de las instalaciones¹³, la ocupación de terrenos, los riesgos de accidentes o la generación de calor residual**.

Es importante señalar, por último, que **el estudio y sus resultados son dinámicos**, es decir, son susceptibles de revisión a medida que las mejoras tecnológicas de los sistemas de generación de electricidad vayan permitiendo la reducción de sus impactos medioambientales, por ejemplo, reduciendo las emisiones de dióxido de azufre de las centrales térmicas mediante tecnologías de final de proceso

de su combustión quedan contrapesadas por la absorción del mismo compuesto realizada previamente por la planta durante su vida vegetal.

¹² Su carácter disperso implica además la descentralización de su producción, con los efectos económicos beneficiosos para zonas del territorio, con frecuencia escasamente desarrolladas, que ello lleva asociado.

¹³ De haberse analizado esta categoría, las centrales térmicas basadas en combustible fósiles y, sobre todo, las nucleares habrían obtenido muchos más ecopuntos de impacto al tener que afrontar las previsibles dificultades asociadas al desmantelamiento de grandes infraestructuras, los residuos y la regeneración de suelos contaminados, un aspecto éste especialmente grave en el caso de las centrales nucleares por el carácter radiactivo de parte de los residuos. En cambio, las plantas basadas en fuentes renovables hubieran salido beneficiadas dado que sus instalaciones son más fácilmente reversibles, de mayor simplicidad y con una menor afectación de terrenos. Sólo algunas centrales minihidráulicas se hubieran situado en una posición intermedia, aunque siempre más próximas a las renovables que a las convencionales.

11. Análisis de los resultados por categorías de impacto

La intensidad del impacto que provocan los diferentes sistemas de generación de electricidad para cada una de las doce categorías de impacto consideradas queda expresada en la siguiente tabla. El análisis de la distribución de sus colores ya muestra a primera vista que los cuadros rojos y marrones –impactos de intensidad importante y significativa, respectivamente– se concentran en la parte izquierda de la tabla, la correspondiente a las energías convencionales, mientras que los de color amarillo y verde –impactos de intensidad pequeña y negligible, respectivamente– hacen en la parte derecha de la tabla, la correspondiente a las energías renovables.

	Lig.	Car.	Petr.	GN	Nucl.	Eóli.	Sol ¹⁴	Minh.
Calentamiento Global	c	c	c	c				
Disminución Capa Ozono								
Acidificación	c	c	c	c				
Radiaciones Ionizantes							m	
Degradación Calidad Aguas*							m	
Contaminación por Metales Pesados								
Sustancias Carcinógenas								
Niebla de Verano								
Niebla de Invierno								
Generación Residuos**								
Agotamiento Recursos Energéticos								

m: minería
t: transporte
c: explotación central

Grande
Significativo
Pequeño
Negligible

*: marinas, continentales, eutrofización
**: incluye residuos y residuos radiactivos

Figura 4: Matriz de impactos ambientales por categorías

¹⁴ La energía solar fotovoltaica se encuentra todavía en una fase de desarrollo y con un escaso nivel de implantación industrial, todo lo contrario que el resto de tecnologías consideradas en el estudio. Es por ello que sus resultados no pueden ser estrictamente comparados con los de los restantes sistemas energéticos. Su análisis es por ello objeto de explicación aparte (Ver Anexo 4).

Impactos ambientales de la producción de electricidad

La siguiente tabla cuantifica ya en ecopuntos finales los impactos medioambientales por categorías y sistemas energéticos.

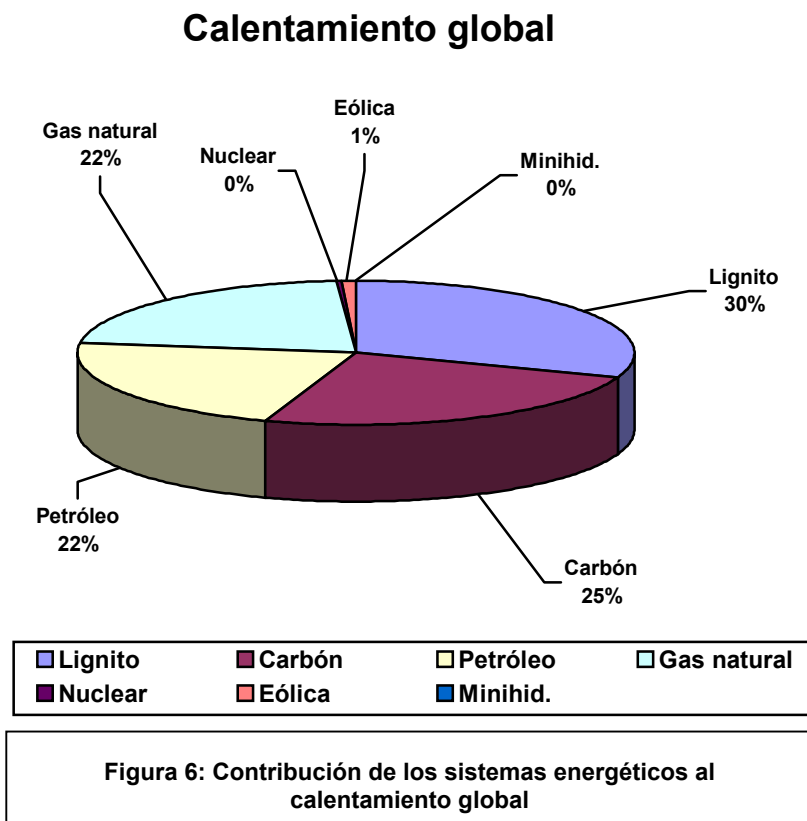
Impactos/Sistemas Energéticos	Lignito	Carbón	Petróleo	Gas Natural	Nuclear	Eólico	Minihidráulica
Calentamiento Global	135.00	109.00	97.00	95.80	2.05	2.85	0.41
Disminución Capa de Ozono	0.32	1.95	53.10	0.86	4.12	1.61	0.05
Acidificación	920.00	265.00	261.00	30.50	3.33	3.49	0.46
Eutrofización	9.83	11.60	9.76	6.97	0.28	0.27	0.06
Metales pesados	62.90	728.00	244.00	46.60	25.00	40.70	2.58
Sustancias Carcinógenas	25.70	84.30	540.00	22.10	2.05	9.99	0.76
Niebla de invierno	519.00	124.00	135.00	3.08	1.50	1.48	0.15
Niebla Fotoquímica	0.49	3.05	36.90	3.47	0.32	1.25	0.06
Radiaciones Ionizantes	0.02	0.05	0.02	0.00	2.19	0.01	0.00
Residuos	50.90	12.90	0.62	0.58	0.28	0.29	0.52
Residuos Radiactivos	5.28	10.60	7.11	1.34	565.00	1,83	0.32
Agotamiento Recursos Energéticos	5.71	5.47	13.60	55.80	65.70	0.91	0.07
TOTAL	1735.15	1355.92	1398.11	267.11	671.82	64.67	5.43

Figura 5: Tabla de ecopuntos finales por sistemas energéticos y categorías de impacto.

El análisis pormenorizado de estos resultados por categorías de impacto es el siguiente:

➤ **Calentamiento global**

Los sistemas térmicos clásicos basados en los combustibles fósiles – lignito, carbón, petróleo y gas natural– contribuyen al 99% del calentamiento global provocado por las tecnologías de generación de electricidad. La causa de ello estriba en sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano provocadas durante las fases de transporte y combustión.

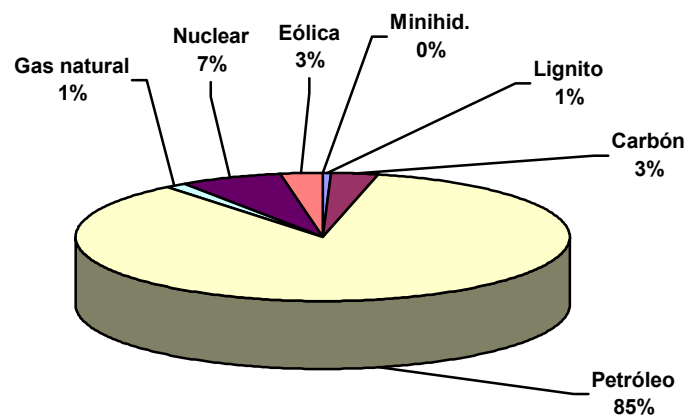


La calentamiento global es, en términos de ecopuntos, el principal impacto medioambiental producido por las centrales térmicas de gas natural. El 35% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causa el calentamiento global.

➤ **Disminución de la capa de ozono**

El sistema térmico basado en el petróleo es el principal responsable, entre las tecnologías de generación de electricidad, de la **disminución de la capa de ozono** a causa de sus emisiones de halones y clorofluorocarbonos (CFC), dos sustancias usadas como retardadores de llama y aditivos del combustible. En segundo lugar, pero a mucha distancia, se sitúa la energía nuclear a causa de los CFC₁₁₄ utilizados tanto en el proceso de enriquecimiento del uranio por difusión gaseosa como en los sistemas de refrigeración de las plantas.

Disminución de la capa de ozono



■ Lignito	■ Carbón	■ Petróleo	■ Gas natural
■ Nuclear	■ Eólica	■ Minihid.	

Figura 7: Contribución de los sistemas energéticos a la disminución de la capa de ozono

➤ **Acidificación**

Los sistemas de producción de electricidad basados en el lignito y, en menor medida, en el carbón y el petróleo, son los que más inciden en la **acidificación** debido al azufre que contienen y que emiten a la atmósfera principalmente en las fases de minería y combustión.

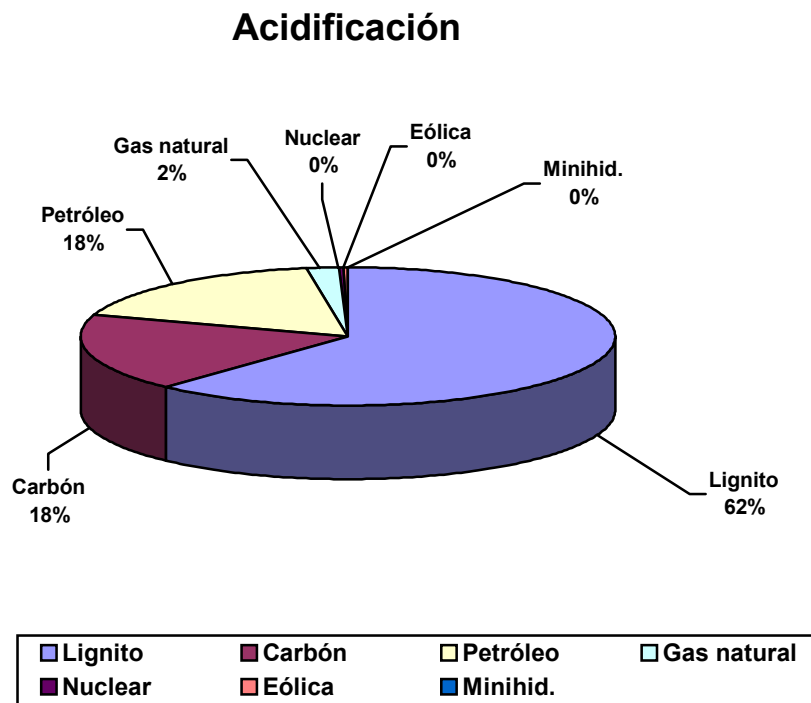


Figura 8: Contribución de los sistemas energéticos a la acidificación

La acidificación es el principal impacto medioambiental producido por las centrales térmicas de lignito en términos de ecopuntos. El 53% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causa la acidificación.

➤ **Eutrofización**

Las tecnologías de generación de electricidad que contribuyen principalmente a la **eutrofización** de las aguas son los sistemas térmicos clásicos basados en los combustible fósiles –lignito, carbón, petróleo y gas natural– a causa de la emisión de fosfatos y nitratos al medio hídrico y atmosférico durante la fase de combustión. De todas maneras, hay que recordar que la principal causa de la eutrofización son los fertilizantes usados en la agricultura, básicamente, nitratos y fosfatos. Las emisiones vía aire y vía agua procedentes de la producción energética raramente superan el 10% de los impactos producidos en la agricultura, por lo que cabe considerarlas globalmente como de poca importancia.

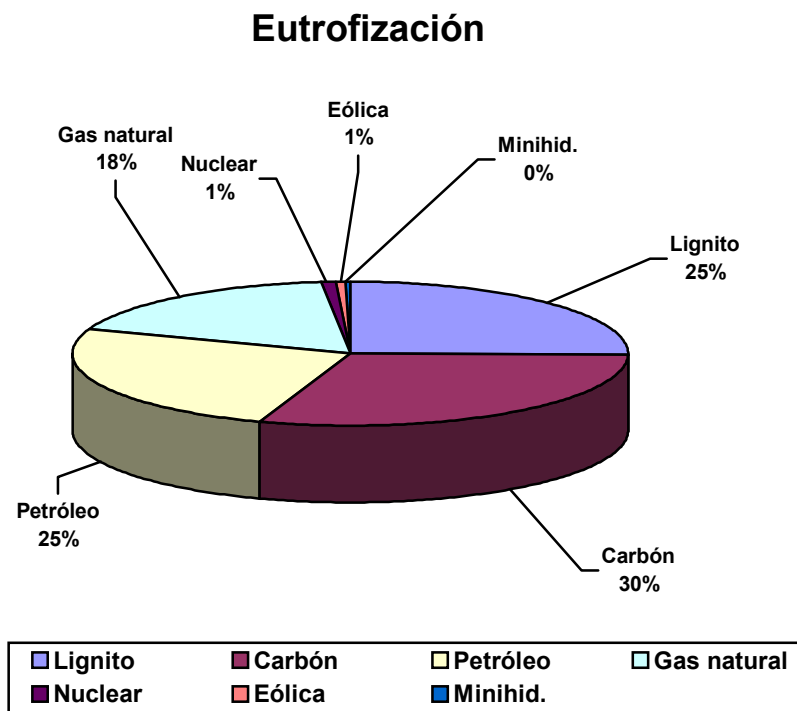


Figura 9: Contribución de los sistemas energéticos a la eutrofización

➤ **Contaminación por metales pesados**

Los sistemas térmicos del carbón y, en menor medida, del petróleo son los principales responsables de la **contaminación por metales pesados** procedente de tecnologías de generación de electricidad. Ello es debido a sus emisiones a la atmósfera de cádmio y plomo, y de bario y plomo al agua, procedentes de los procesos de combustión.

Contaminación por metales pesados

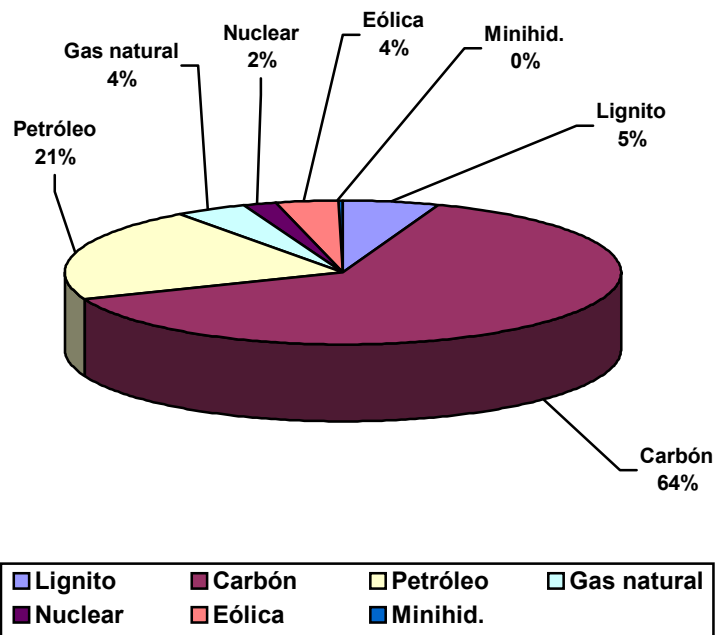


Figura 10: Contribución de los sistemas energéticos a la contaminación por metales pesados.

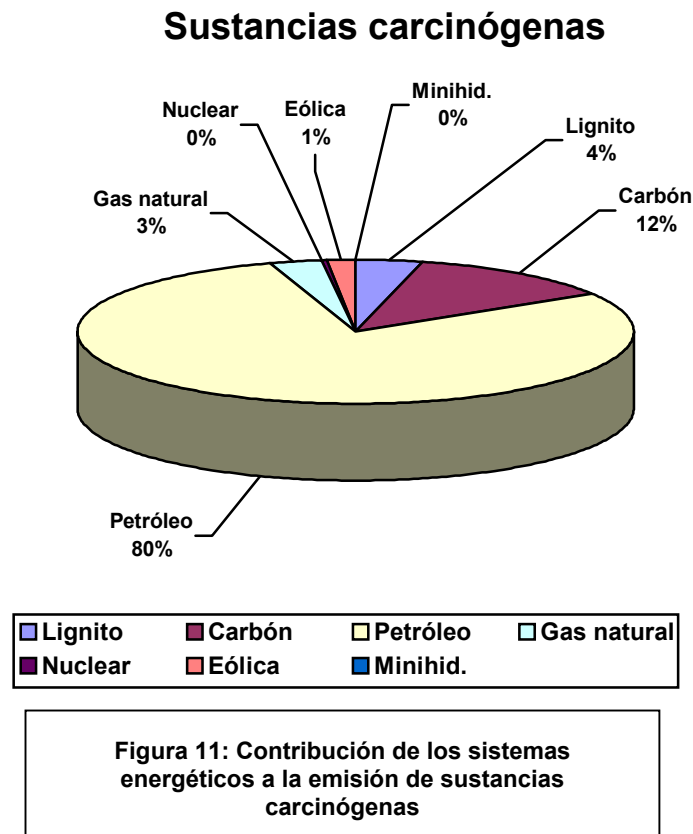
La contaminación por metales pesados es, en términos de ecopuntos, el principal impacto medioambiental producido por las centrales térmicas de carbón. El 53% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causa la contaminación por metales pesados.

Los metales pesados son también, en términos de ecopuntos, el principal impacto medioambiental producido por la energía eólica. El 62% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causan los metales pesados. Las emisiones de metales pesados del

ciclo de vida eólico son, sin embargo, 18 veces inferiores a las generadas a lo largo del ciclo de vida del carbón.

➤ **Sustancias carcinógenas**

La tecnología de producción de electricidad responsable de la mayor parte de las **sustancias carcinógenas** vertidas al medio ambiente es la basada en el petróleo debido principalmente a las emisiones de níquel, metal utilizado como catalizador en los procesos de hidrogenación y desulfuración del crudo.



La liberación de sustancias carcinógenas al medio ambiente es, en términos de ecopuntos, el principal impacto medioambiental producido por las centrales térmicas de fuel-oil. El 38% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causan las sustancias carcinógenas.

➤ **Niebla de invierno**

Los sistemas térmicos basados en combustibles fósiles, excepto el gas natural, y especialmente el lignito, son los principales responsables de la **niebla de invierno** debido a la emisión conjunta a la atmósfera de óxido de azufre y partículas.

Niebla de invierno

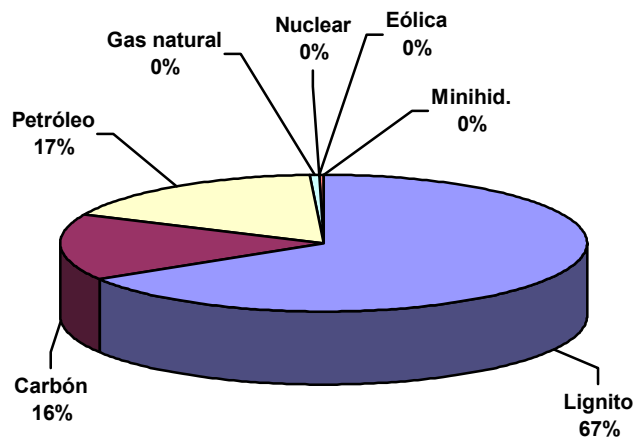


Figura 12: Contribución de los sistemas energéticos a la Niebla de invierno

La niebla de invierno es, tras la acidificación, el segundo impacto medioambiental más importante ocasionado por las centrales térmicas de lignito en términos de ecopuntos. El 30% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causa la niebla de invierno.

➤ **Niebla de verano**

Las combustiones incompletas de productos derivados del petróleo, así como sus emisiones difusas son las principales responsables, de entre las tecnologías de generación de electricidad, de la **niebla fotoquímica o niebla de verano**.

Niebla de verano

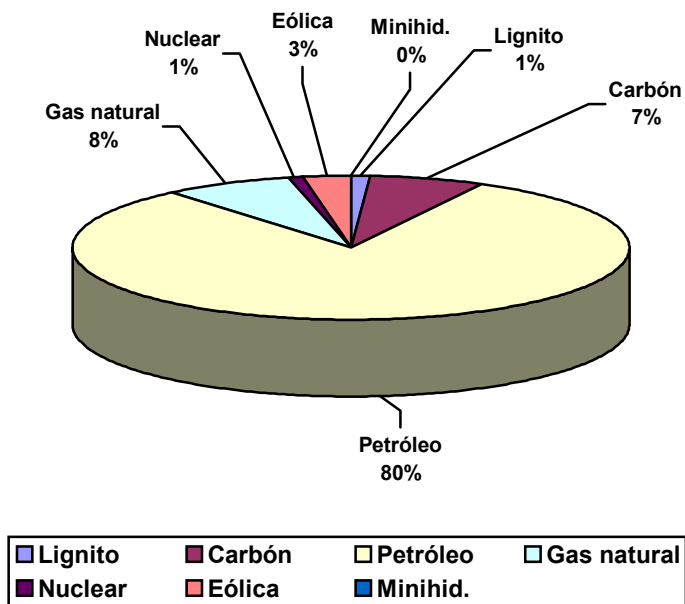
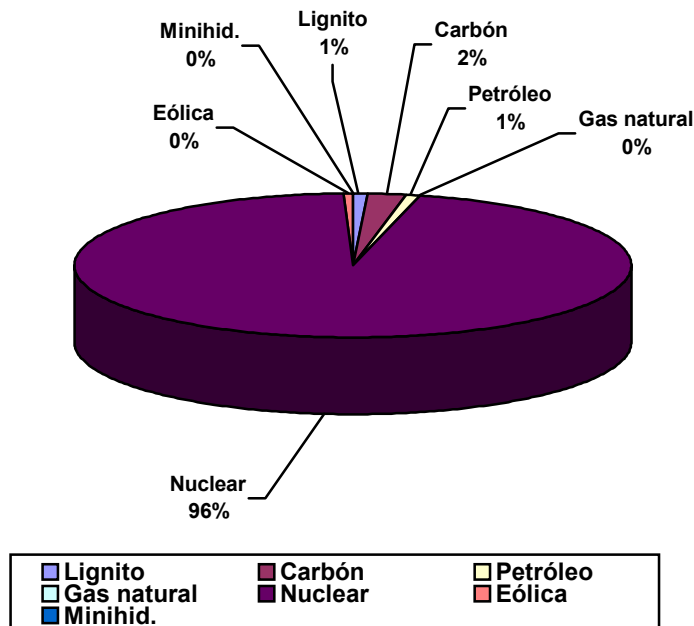


Figura 13: Contribución de los sistemas energéticos a la Niebla de verano.

➤ **Radiactividad**

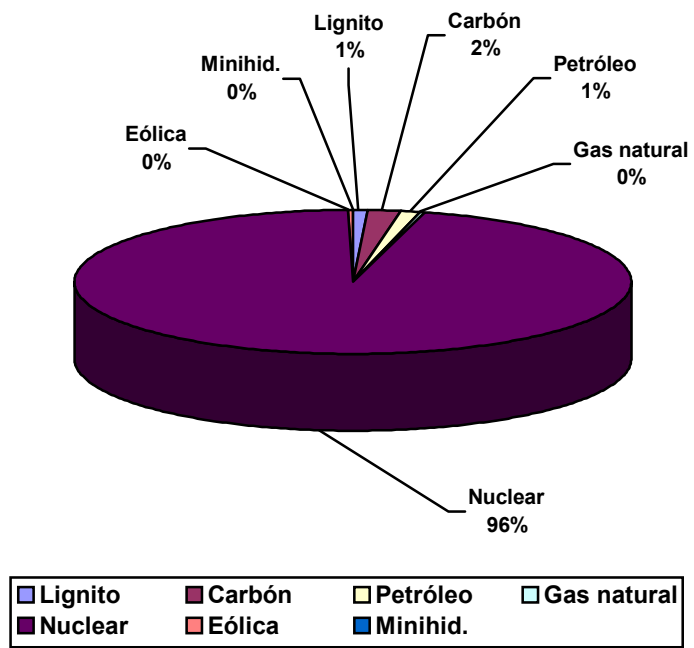
El sistema termonuclear, en todas sus fases, es el principal responsable tanto de la emisión de **radiaciones ionizantes** como de los **residuos radiactivos** de alta, media y baja actividad.

Radiactividad



Figuras 14 y 15: Contribución de los sistemas energéticos a la radiactividad y a la generación de residuos radiactivos.

Residuos radiactivos



La residuos radiactivos constituyen, en términos de ecopuntos, el principal impacto medioambiental producido por las centrales nucleares. El 84% de los ecopuntos de impacto asignados a esta tecnología los causa los residuos radiactivos.

➤ **Residuos industriales**

Las tecnologías de generación de electricidad que incluyen una fase de minería en la que se generan una gran cantidad de estériles – lignito y carbón– son las principales responsables de la generación de **residuos industriales**. Dejar constancia que una parte de los estériles del lignito tienen la consideración de residuos tóxicos y peligrosos.

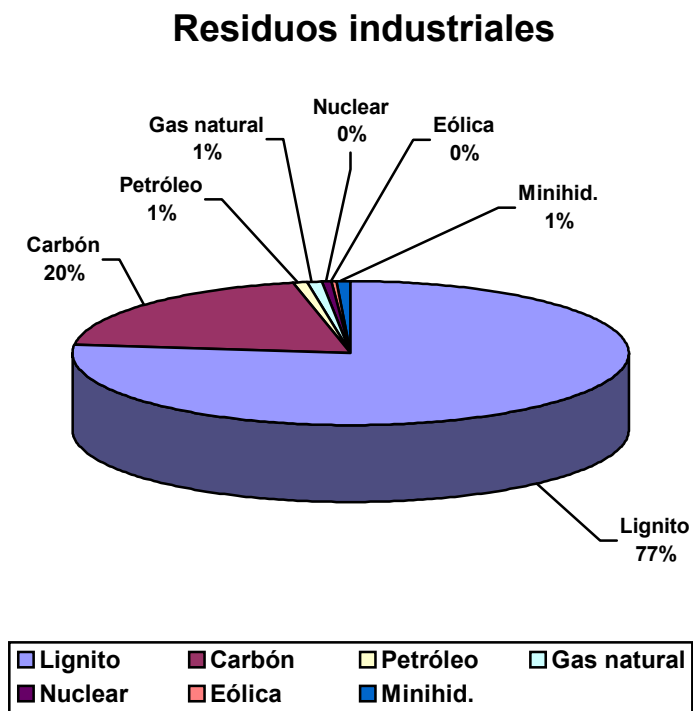
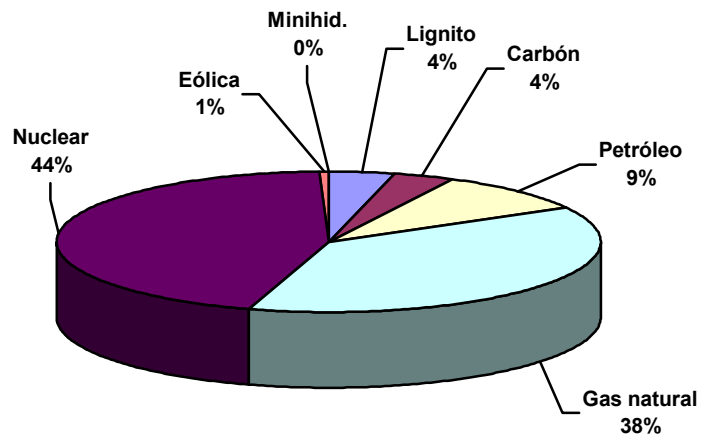


Figura 15: Contribución de los sistemas energéticos a la generación de residuos industriales.

➤ **Agotamiento de recursos energéticos**

Del conjunto de recursos no renovables, son las reservas de uranio, gas natural y petróleo las que presentan un menor nivel de recursos por lo que, ante su previsible escasez o **agotamiento**, son dichas tecnologías las que reciben una mayor penalización.

Agotamiento de recursos energéticos



Lignito	Carbón	Petróleo	Gas natural
Nuclear	Eólica	Minihid.	

Figura 16: Contribución de los sistemas energéticos al agotamiento de los recursos energéticos.

12. Conclusiones

➤ **Un referente ineludible**

Los resultados de este estudio aspiran a convertirse en un referente **ineludible** tanto para los sectores implicados en la generación de energía eléctrica como para las Administraciones Públicas reguladoras en la medida en que permiten profundizar en el conocimiento de los problemas ambientales derivados de la generación de electricidad.

➤ **La apuesta por las energías renovables: el Plan de Fomento 2000-2010**

Los resultados de este estudio reafirman **la necesidad de seguir apostando en España por las energías renovables como una opción estratégica para avanzar hacia un sistema energético sostenible**. En esta línea se sitúa el **Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010**, aprobado por el Gobierno en diciembre de 1999. El objetivo último de este Plan es el de conseguir que en el año 2010 el 12% el consumo primario de energía proceda en España de fuentes renovables de energía¹⁵. **El cumplimiento de este objetivo permitiría, según una primera estimación, reducir un 9% los ecopuntos de impacto medioambiental** y, por tanto, el daño ambiental provocado por el sistema de generación eléctrica español.

➤ **Cuantificar el coste económico de los impactos ambientales**

La valoración de los impactos medioambientales de las diferentes tecnologías de generación de electricidad en términos de ecopuntos es sólo el paso previo para la **cuantificación de los costes económicos o monetarios de dichos impactos**. En esta segunda fase ya estamos trabajando.

➤ **Internalizar los costes externos de la electricidad**

La finalización de la segunda fase del estudio servirá de base para elaborar una propuesta que permita, por primera vez en la historia, **la completa internalización de dichos costes externos en los precios finales de la electricidad**. Dicha internalización podrá realizarse a través de dos mecanismos alternativos:

¹⁵ Por lo que a la electricidad se refiere, el Plan de Fomento prevé que los sistemas renovables de generación eléctrica, sin contar la gran hidráulica, cubran en el año 2010 el 17'5 % de la demanda de electricidad, frente al 4'5 % actual. Contando la hidráulica > 10 MW la generación eléctrica con renovables alcanzaría en el 2010 el 29'5 % de la demanda, frente al 20'2 % actual.

- la utilización de instrumentos penalizadores sobre las fuentes energéticas generadoras de costes externos.
- la aplicación de instrumentos bonificadores para las fuentes energéticas generadoras de beneficios externos y, por ello, de menor impacto medioambiental.

➤ **Objetivo final: un mercado eléctrico transparente y no discriminatorio**

Solo la internalización de tales costes externos hará posible que el **mercado eléctrico funcione de una manera realmente transparente y eficiente**, acabando con las actuales distorsiones a la competencia. Ello es especialmente importante a la vista de que el actual proceso de liberalización del mercado eléctrico español culminará en el año 2003 con el reconocimiento a todos los consumidores de electricidad del derecho a elegir compañía suministradora. En la medida en que en ese escenario liberalizado la calidad del suministro deberá garantizarse en todos los casos, los precios serán la variable de decisión fundamental. Y si se quiere que ese mercado funcione de manera transparente y eficiente será necesario que los precios de cada tecnología de generación de electricidad reflejen fielmente sus respectivos costes. De lo contrario, el mercado quedará distorsionado ya que los sistemas de generación más costosos medioambiental y económicamente –los sistemas convencionales– se verán primados frente a los sistemas más eficientes –los sistemas renovables–.

➤ **Objetivo inmediato: mantener los actuales mecanismos de apoyo a las energías renovables**

Mientras no se cuantifiquen e internalicen dichos costes externos, resultará **imprescindible el mantenimiento del actual sistema de bonificaciones a la generación eléctrica de origen renovable vigente en España**, entendido éste como un sistema aproximado de compensación a las energías renovables por los beneficios medioambientales que se derivan de su utilización en comparación con las tecnologías energéticas convencionales. La necesidad de mantener estos mecanismos de compensación queda reconocida en el Libro Blanco Europeo de las Energías Renovables, la Ley Española del Sector Eléctrico, el Plan de Fomento de las Energías Renovables y la propuesta de Directiva Europea de promoción de la electricidad procedente de fuentes renovables recientemente aprobada por la Comisión.

13. ANEXO 1: Mix de electricidad utilizado en el estudio

La definición del *mix* de generación eléctrica es importante para la determinación del impacto medioambiental de la producción de electricidad con las diferentes tecnologías. El *mix* eléctrico utilizado en el estudio es el correspondiente a un año medio en España, por lo que no coincide exactamente con el de ningún año concreto.

**Mix eléctrico español utilizado
en el estudio**

ENERGÍA PRIMARIA	%
LIGNITO	7,3
ANTRACITA/HULLA	31,3
PETRÓLEO	5,5
GAS NATURAL	1,5
NUCLEAR	36,3
HIDRÁULICA	18,0
EÓLICA	0,1
SOLAR	0

14. ANEXO 2: Información adicional sobre las categorías de impacto

A continuación se ofrece información adicional sobre las categorías de impacto analizadas en el estudio.

➤ **Calentamiento global**

Se estima que el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera es actualmente un 25% superior al existente en los últimos 160.000 años. Se estima que la temperatura ha aumentado 0,2 °C por década y que de continuar las pautas de generación y consumo actuales, el aumento podría alcanzar los 0,3 °C por década. Este incremento situaría el cambio en unos 5 °C para el año 2050, con la consiguiente modificación climática, que afectaría al 20% de Europa. Para prevenir estos efectos debería pues procederse a una reducción del orden del 60% de las emisiones globales actuales.

➤ **Disminución de la capa de ozono**

Según los acuerdos adoptados por los países firmantes del Protocolo de Montreal y su revisión de Copenhague, todas las emisiones de CFC deberían haberse reducido a cero en el año 2000. También debe reducirse progresivamente la presencia de los HCFC en la atmósfera —antes del 2015—, a pesar de que la contribución de tales gases a la disminución de la capa de ozono se ha estimado en sólo el 2,6%; se estima, para estos gases, que una reducción del 60% de los HCFC supondría una mejora en el nivel actual de la capa de ozono del 1% actual.

➤ **Acidificación**

La acidificación afecta gravemente en Europa a una gran variedad de ecosistemas. Las altas concentraciones ácidas se deben, no sólo a los altos niveles de industrialización existentes, sino también a las propias características geológicas de los distintos medios receptores.

➤ **La eutrofización**

El valor crítico de eutrofización en ríos y lagos es de 0,15 mg/l para fosfatos y de 2,2 mg/l para nitratos. Por debajo de estos valores, se considera que no existen problemas relacionados con la eutrofización. No obstante, en una gran parte de los ríos europeos, entre los cuales se encuentra el río Ebro, dichos valores están siendo sobrepasados hasta en cinco veces, lo que implica que este tipo de emisiones deba reducirse drásticamente.

➤ **Sustancias carcinógenas**

Se estima que concentraciones de 0,01 nanogramos/m³ de la sustancia carcinógena de referencia – el benzo(a) pireno PAH– conllevan un caso de cáncer por millón de habitantes y año. A este riesgo está expuesta un tercio de la población europea, llegándose a alcanzar en algunas zonas urbanas valores de 1 ng/m³, 10 veces por encima del nivel de referencia.

➤ **Niebla de invierno**

Se estima que es necesaria la reducción del 80% de las emisiones de óxido de azufre (SO₂) para eliminar la ocurrencia de períodos de nieblas invernales. En el caso de partículas, no resulta fácil la determinación de los niveles de reducción necesarios.

➤ **Niebla de verano**

Este fenómeno, ligado al aumento de la concentración de ozono troposférico, ha sufrido un fuerte cambio; así, tan solo hace cien años la concentración de ozono troposférico era de 10 partes por billón (ppb) mientras que, en el momento actual, el nivel límite aceptado, por otra parte usual, se sitúa en 25 ppb. El problema se agudiza, no obstante, con los picos que se dan en el verano y que pueden llegar a alcanzar los 300 ppb. Para reducir la aparición de estos episodios altamente peligrosos es preciso disminuir el 90% de las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y entre el 60-70% las óxidos de nitrógeno, principales coadyuvantes del fenómeno.

➤ **Residuos industriales**

La generación de residuos industriales conlleva, en primer lugar, problemas logísticos, de tratamiento, de disposición y de vigilancia, con un gran número de implicaciones económicas, sociales y políticas. A más largo plazo, en un segundo plano, existen también implicaciones relacionadas con el agotamiento de las materias primas y recursos. La solución global pasa por la reutilización, el reciclado y la valorización, que permitan convertir el actual funcionamiento de una economía lineal de cadenas abiertas en otra de características cíclicas en las que el rechazo y peligrosidad de los materiales sean mínimos.

En esta dirección, diversos organismos han efectuado estimaciones conducentes al desarrollo de una legislación cada vez más exigente por lo que respecta a las estrategias destructivas de incineración y vertido. Así,

diversas normativas recientes han considerado que debe efectuarse una reducción de hasta seis veces el volumen actual de generación de residuos.

➤ **Radiactividad**

La relevancia de las sustancias radiactivas, al igual que las sustancias carcinógenas, depende de la proximidad de la población a las distintas instalaciones que son fuente de emisiones radiactivas. El factor de reducción que debe aplicarse para que las muertes extra por millón de habitantes no sean superiores a la unidad es de 11.

➤ **Residuos radiactivos**

Se estima que la peligrosidad asociada a los residuos radiactivos de media y baja actividad es reducida mientras que el riesgo asociado a los residuos de alta actividad es más elevado debido tanto a su largo período de semidesintegración, como a su radiotoxicidad, lo que implica múltiples incertidumbres sobre el factor de reducción que debe aplicarse en este análisis.

➤ **Agotamiento de recursos energéticos**

El Libro Blanco europeo de las Energías Renovables estima que, tanto los problemas ambientales como el agotamiento de los recursos energéticos, pueden minimizarse modificando la actual estructura energética hasta conseguir que al menos el 12% de la energía primaria proceda de fuentes renovables. Este el objetivo marcado en España por el Plan de Fomento de las Energías Renovables aprobado por el Gobierno en diciembre de 1999.

15. ANEXO 3: Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida aplicado a las ocho tecnologías de generación de electricidad consideradas tiene las siguientes etapas:

➤ **Inventario de impactos medioambientales**

En esta etapa se cuantifican de forma exhaustiva todas las entradas –materias primas y recursos energéticos primarios– y salidas –emisiones residuales al aire, agua y suelo, además del propio producto final– que se producen en el proceso de generación de electricidad de cada sistema energético analizado. A todo este conjunto de datos se le denomina **ecovector o perfil ambiental**.

➤ **Clasificación de impactos**

En en esta etapa se identifican las sustancias contaminantes que contribuyen a cada una de las categorías de impacto consideradas. La siguiente tabla muestra en la segunda columna de la izquierda, como ejemplo, las sustancias contaminantes identificadas para la categoría de impacto *calentamiento global*:

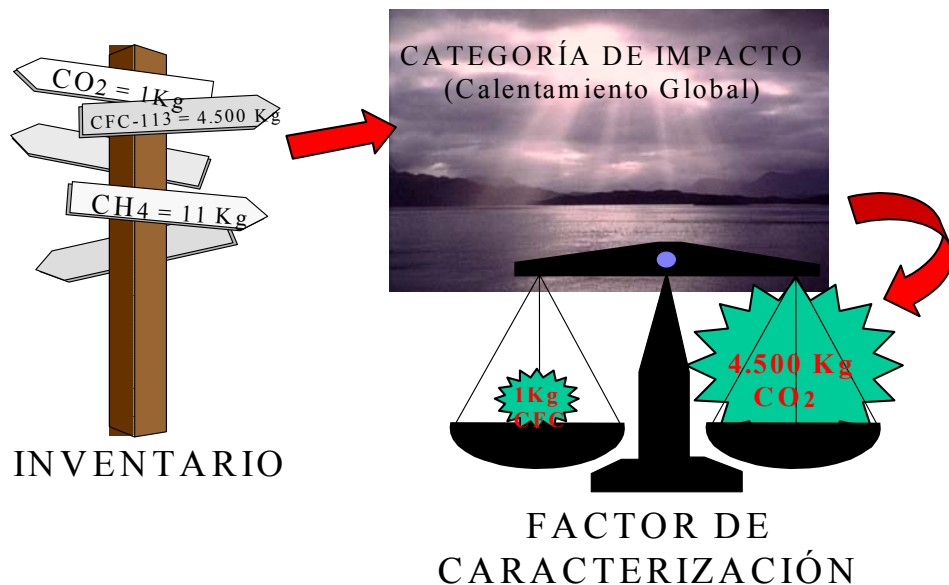
Categoría de impacto	Sustancia	Factor de caracterización (kg)	Factor de normalización	Factor de evaluación
Calentamiento Global	CO ₂	1	0,0000765	5
	N ₂ O	270		
	CFC (hard)	7100		
	CFC (soft)	1600		
	CFC-11	3400		
	CFC-113	4500		
	CFC-114	7000		
	CFC-115	7000		
	CFC-12	7100		
	HALON-1211	4900		
	HALON-1301	1900		
	Tetracloruro de metilo	1300		
	1,1,1-tricloroetano	100		
	HCFC-123	90		
	HCFC-124	440		
	HCFC-141b	580		
	HCFC-142b	1800		
	HCFC-22	1600		
	CFC-13	13000		
	Dicloruro de metilo	15		
	HFC-125	3400		
	HFC-134	1200		
	HFC-152	150		
	Metano	11		
Tricloruro de metilo	25			
CFC-14	4500			
CFC-116	6200			

Algunas sustancias contribuyen a más de una categoría de impacto. Es el caso, por ejemplo, de los CFC, que contribuyen tanto al calentamiento global como a la disminución de la capa de ozono.

➤ **Caracterización de impactos**

En esta etapa del ACV se procede a traducir las cantidades emitidas de cada una de las sustancias contaminantes a la unidad de referencia equivalente de su categoría de impacto con el fin de medir sus respectivas contribuciones al impacto considerado.

Veamos un ejemplo: como la sustancia más representativa dentro de la categoría de impacto *calentamiento global* es el dióxido de carbono (CO_2), este compuesto se convierte en la unidad de referencia de dicha categoría. Ello significa que las cantidades del resto de sustancias o compuestos contaminantes que contribuyen al *calentamiento global* se traducirán a unidades de CO_2 : así, un kilo de óxido nitroso equivaldrá a 270 kilos de CO_2 ya que una unidad de este óxido contribuye 270 veces más al calentamiento global que la misma cantidad de CO_2 ; un kilo de CFC-113 se traducirá como 4.500 kilos de CO_2 ya que una unidad de este compuesto contribuye 4.500 veces más al calentamiento global que el dióxido de carbono (Ver tabla de la página 31).



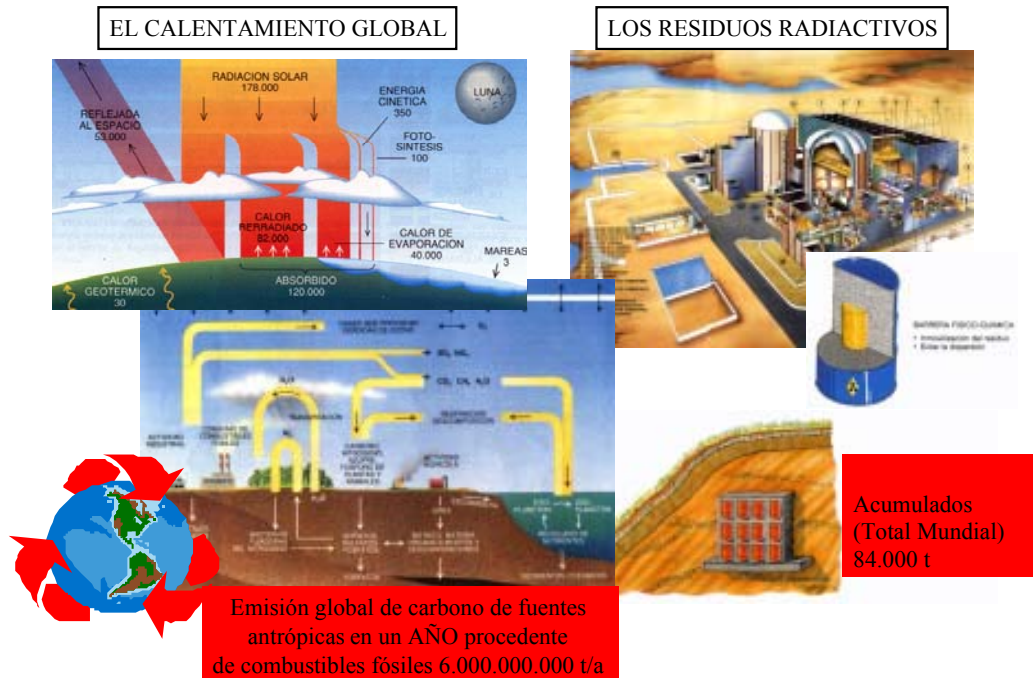
Las unidades de referencia para el resto de las categorías son las siguientes:

- Disminución de la capa de ozono: kilos de CFC equivalentes
- Acidificación: kilos de SO₂ equivalentes
- Eutrofización: kilos de fosfatos equivalentes
- Contaminación por metales pesados: kilos de plomo equivalente
- Sustancias carcinógenas: kilos de PAH equivalentes.
- Niebla o fotoquímica o de verano: kilos de eteno equivalente
- Niebla de invierno: kilos de SO₂ equivalente
- Radiaciones ionizantes: kilobecquerel (kBq)
- Residuos industriales: kilogramos de residuos
- Residuos radiactivos: metros cúbicos de residuos
- Agotamiento de los recursos energéticos: Ktpeps (miles de Toneladas equivalentes de petróleo)

➤ **Normalización de impactos**

¿Cómo comparar impactos tan distintos como la emisión de millones de toneladas de CO₂ equivalentes que contribuyen al calentamiento global, con la emisión de centenares de kilos de PAH –hidrocarburos aromáticos policíclicos– con efectos cancerígenos y con la acumulación de miles de toneladas de residuos radiactivos de baja y media actividad? A esta pregunta responde la etapa de normalización de impactos.

**¿CÓMO COMPARAR CANTIDADES MUY DISPARES ?
EL FACTOR DE NORMALIZACIÓN**



Para que sea posible comparar categorías de impacto tan diversas y dispares se aplica un **factor de normalización** a las cantidades resultantes de cada categoría de impacto, cantidades expresadas en su respectiva unidad de referencia. **Este factor de normalización se calcula a partir del volumen preexistente en el medio ambiente de cada uno de los compuestos contaminantes de referencia**, exceptuando la cantidad aportada por el proceso evaluado. Se logra así ponderar la importancia que tiene el proceso estudiado con referencia al estado inicial del medio.

El factor de normalización para cada tipo de impacto es el inverso del nivel preexistente en sustancia equivalente por habitante. Así por ejemplo, el factor de normalización aplicable a la categoría calentamiento global será 0'000076 Kg, el inverso de los 13.000 kg de dióxido de carbono de origen antrópico por habitante presentes en la atmósfera (Ver tabla de la página 31). El resto de factores se contemplan en la siguiente tabla:

FACTORES DE NORMALIZACIÓN

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDADES	TOTAL EUROPA	EQUI. POR HABITAN.	FACTORES DE NORMALIZAC.	GRADO DE INCERTIDUMBRE
Calentamiento global	CO ₂ kg. Equiv.	6,5.10 ¹²	1,3.10⁴	7,6.10 ⁵	Pequeño
Disminución Capa Ozono	CFC (duro) kg. Equiv.	4,6.10 ⁸	9,3.10⁻¹	1.10 ²	Grande
Acidificación	SO _x kg. Equiv.	5,6.10 ¹⁰	1,1.10²	8.10 ³	Pequeño
Eutrofización	Fosfatos kg. Equiv.	1,9.10 ¹⁰	3,8.10¹	2,6.10 ⁻²	Moderado
Metales Pesados	Pb kg. Equiv.	2,7.10 ⁷	5,4.10⁻²	9,8.10 ¹	Grande
Sustancias Carcinógenas	PAH kg. Equiv.	5,4. 10 ⁶	1,1.10⁻²	9,6.10 ¹	Grande
Niebla de invierno	SO ₂ kg. Equiv.	4,7.10 ¹⁰	9,5.10¹	1,1.10 ¹	Pequeño
Niebla fotoquímica	Eteno kg. Equiv.	8,9.10 ¹⁰	1,8.10¹	5,6.10 ¹	Grande

➤ **Evaluación de impactos**

La última fase del ACV sirve para determinar la importancia relativa de cada una de las categorías de impacto consideradas a partir de la capacidad de sus respectivos compuestos contaminantes de referencia para provocar algunos de los siguientes daños:

- una muerte extra al año por millón de habitantes.
- enfermedades importantes como consecuencia de períodos de niebla.
- un 5% de deterioro de los ecosistemas.

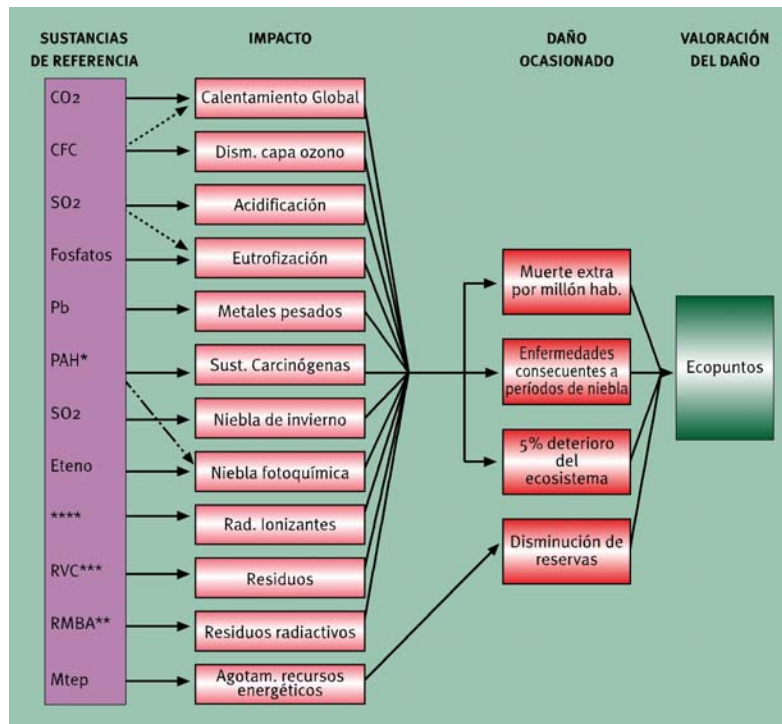
Cuanto mayor es la probabilidad de provocar estos daños y, por tanto, más urgente es la necesidad de reducir los impactos medioambientales, mayor es el factor de evaluación asignado a cada categoría de impacto.

Veamos un ejemplo: la relevancia de las sustancias radiactivas, al igual que las sustancias carcinógenas, depende de la proximidad de la población a las distintas instalaciones que son fuente de emisiones radiactivas. El factor de reducción que debe aplicarse para que las muertes extra por millón de habitantes no sean superiores a la unidad es de 11. Pues bien, el factor de evaluación que se aplicará a la categoría radiactividad será 11, como muestra la columna de la derecha de la siguiente tabla.

Categoría de impacto	Sustancia	Factor de caracterización (persona Sv/kBq*)	Factor de normalización	Factor de evaluación
Radiaciones Ionizantes	⁸⁵ Kr	1,2 10 ⁻¹³	1345	11
	¹³³ Xe	1,2 10 ⁻¹³		
	¹³⁵ Xe	1,2 10 ⁻¹³		
	³ H	1,1 10 ⁻¹¹		
	¹⁴ C	1,8 10 ⁻⁹		
	¹³¹ I	3,4 10 ⁻¹⁰		
	¹³³ I	3,4 10 ⁻¹⁰		
	Partículas	5,4 10 ⁻⁹		
	²¹⁰ Pb	10 ⁻⁹		
	²¹⁰ Po	10 ⁻⁹		
	²²⁶ Ra	6 10 ⁻¹⁰		
	²²² Rn	1,5 10 ⁻¹¹		
	²³⁰ Th	3 10 ⁻⁸		
	²³⁴ U	8 10 ⁻⁹		
	³ H	8,1 10 ⁻¹⁰		
	⁵⁴ Mn	2 10 ⁻¹¹		
	⁵⁵ Fe	2 10 ⁻¹¹		
	⁵⁸ Co	2 10 ⁻¹¹		
	⁶⁰ Co	2 10 ⁻¹¹		
	¹²⁴ Sb	2 10 ⁻¹¹		
	¹²⁵ Sb	2 10 ⁻¹¹		
¹³⁴ Cs	2 10 ⁻¹¹			
¹³⁷ Cs	2 10 ⁻¹¹			

* Dosis colectiva por unidad de actividad

El proceso anterior queda esquematizado globalmente en el siguiente gráfico:



- * Compuestos aromáticos policíclicos varios
- ** Residuos de media y baja actividad
- *** Residuos destinados a vertederos convencionales
- **** No existe ninguna sustancia de referencia

Aplicado el factor de evaluación se llega ya a los ecopuntos, que se calculan, por tanto, a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Ecopunto} = \text{Cantidad de sustancia emitida} \times \text{Factor de caracterización} \times \text{Factor de normalización} \times \text{Factor de evaluación}$$

El impacto total provocado por cada tecnología de generación de electricidad será pues la suma de los ecopuntos obtenidos en cada una de las doce categorías de impacto.

16. ANEXO 4: ACV de la Energía solar fotovoltaica

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del sistema solar fotovoltaico obtiene un total de 461 ecopuntos.

Categoría 4- El Sistema Solar Fotovoltaico	
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	461

Este resultado debe contemplarse, sin embargo, con grandes reservas. La penalización medioambiental relativamente elevada que recibe la energía solar fotovoltaica es resultado tanto de **la inexistencia de una producción industrial en grandes series** como de **la cantidad relativamente elevada de electricidad que exige la elaboración de las células fotovoltaicas**. Dado que dicha energía eléctrica procede de un *mix* de generación con una fuerte componente térmica y nuclear, el elevado impacto medioambiental de estas fuentes repercute negativamente en el ecobalance final de la solar fotovoltaica. Si la electricidad requerida para la fabricación de las células fotovoltaica fuera mayoritariamente renovable, el resultado final sería por tanto muy diferente.

La siguiente tabla muestra la suma de ecopuntos obtenida por la tecnología solar fotovoltaica por categorías de impacto:

Impactos/Sistemas Energéticos	Solar Fotovolt.
Calentamiento Global	15.40
Disminución Capa de Ozono	3.66
Acidificación	97.00
Eutrofización	1.97
Metales pesados	167.00
Sustancias Carcinógenas	75.70
Niebla de invierno	53.30
Niebla Fotoquímica	3.03
Radiaciones Ionizantes	0.12
Residuos	1.84
Residuos Radiactivos	34.90
Agotamiento Recursos Energéticos	7.06
TOTAL	460.98

Los expertos prevén que los avances tecnológicos permitirán reducir la cantidad de energía necesaria para la fabricación de células solares y, con ello, los impactos medioambientales de esta tecnología.