

Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008

## Módulo: Contexto Energético y marco Regulator

# EFECTOS EXTERNOS Y COSTES SOCIALES DE PRODUCCIÓN Y USO DE LA ENERGÍA EXTERNALIDADES. MÉTODOS DE CÁLCULO Y EVALUACIÓN

AUTOR: YOLANDA LECHÓN PÉREZ



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>EL CONCEPTO DE EXTERNALIDAD</b> .....	<b>5</b>
2.1	EFICIENCIA Y EXTERNALIDADES .....	6
2.2	COSTE TOTAL DE LA ENERGÍA .....	7
2.3	INFLUENCIA DE LOS COSTES/BENEFICIOS EXTERNOS EN LA COMPETITIVIDAD Y MERCADO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....	9
<b>3</b>	<b>MECANISMOS DE INTERNALIZACIÓN DE LOS COSTES/BENEFICIOS EXTERNOS</b> <b>12</b>	
<b>4</b>	<b>DIRECTRICES COMUNITARIAS RELATIVAS A LAS AYUDAS ESTATALES A ENERGÍAS RENOVABLES. CÁLCULO DE LAS PRIMAS</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES</b> .....	<b>15</b>
5.1	METODOLOGÍAS TOP-DOWN: .....	15
5.2	METODOLOGÍAS BOTTOM-UP .....	16
5.3	COSTES DE CONTROL VS COSTES DE DAÑO .....	16
<b>6</b>	<b>LA METODOLOGÍA EXTERNE</b> .....	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>FASES DEL ANÁLISIS</b> .....	<b>18</b>
7.1	CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y LA TECNOLOGÍA.....	18
7.2	IDENTIFICACIÓN DE CARGAS E IMPACTOS .....	19
7.3	PRIORIZACIÓN DE LOS IMPACTOS .....	20
7.4	CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS .....	20
7.5	VALORACIÓN ECONÓMICA .....	22
<b>8</b>	<b>INCERTIDUMBRE</b> .....	<b>23</b>
<b>9</b>	<b>ECOSENSE</b> .....	<b>23</b>
<b>10</b>	<b>IMPACTOS PRIORITARIOS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA</b> .....	<b>24</b>
10.1	IMPACTOS PRIORITARIOS DE LAS TECNOLOGÍAS FÓSILES .....	24
10.2	IMPACTOS PRIORITARIOS DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR.....	24
10.3	IMPACTOS PRIORITARIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	24
10.3.1	<i>Energía eólica</i> .....	24
10.3.2	<i>Energía hidráulica</i> .....	25
10.3.3	<i>Energía fotovoltaica</i> .....	25
10.3.4	<i>Energía de la biomasa</i> .....	25
<b>11</b>	<b>IMPACTO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN LA SALUD</b> .....	<b>25</b>
11.1	FUNCIONES DOSIS-RESPUESTA. ....	27
11.2	VALORACIÓN MONETARIA .....	30
11.2.1	<i>Mortalidad:</i> .....	30
11.2.2	<i>Enfermedades</i> .....	32
<b>12</b>	<b>IMPACTOS DE LAS EMISIONES DE RADIONUCLEIDOS</b> .....	<b>32</b>
12.1	RUTA DE IMPACTO .....	32
12.2	FUNCIONES DOSIS RESPUESTA.....	34
12.3	VALORACIÓN MONETARIA .....	34



12.3.1	<i>Cáncer no mortal</i> .....	34
12.3.2	<i>Efectos hereditarios severos</i> .....	34
12.3.3	<i>Cáncer mortal</i> .....	34
<b>13</b>	<b>IMPACTO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS SOBRE LOS MATERIALES. ....</b>	<b>35</b>
13.1	DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	36
13.1.1	<i>Mecanismo de los daños</i> .....	36
13.2	RUTAS DE IMPACTO .....	37
13.3	FUNCIONES DOSIS-RESPUESTA .....	38
13.4	STOCK AT RISK .....	39
13.5	CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS EN MATERIALES.....	39
13.6	VALORACIÓN MONETARIA .....	39
<b>14</b>	<b>IMPACTO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS SOBRE LA AGRICULTURA .....</b>	<b>40</b>
14.1	EFFECTOS DEL DIÓXIDO DE AZUFRE SOBRE LOS CULTIVOS.....	42
14.2	EFFECTOS DEL OZONO .....	43
14.3	EFFECTOS DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO .....	44
14.4	ACIDO FLUORHÍDRICO .....	44
14.5	NITRATOS DE PEROXIACILO .....	45
14.6	INTERACCIONES ENTRE CONTAMINANTES .....	45
14.7	CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS .....	45
14.8	VALORACIÓN MONETARIA .....	46
<b>15</b>	<b>EFFECTOS DE LAS EMISIONES DE CO2 SOBRE EL FENÓMENO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL.....</b>	<b>47</b>
15.1	IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	47
15.2	VALORACIÓN ECONÓMICA .....	48
<b>16</b>	<b>RUIDO .....</b>	<b>48</b>
16.1	RUTA DE IMPACTO .....	48
16.1.1	<i>Emisiones de sonido</i> .....	49
16.1.2	<i>Propagación del sonido y nivel observado de ruido</i> .....	49
16.1.3	<i>Percepción del nivel de ruido observado</i> .....	49
16.2	VALORACIÓN MONETARIA .....	50
<b>17</b>	<b>IMPACTO VISUAL .....</b>	<b>50</b>
17.1	INTRUSIÓN VISUAL.....	50
17.1.1	<i>Valoración directa</i> .....	51
17.1.2	<i>Valoración indirecta</i> .....	51
17.1.3	<i>Población afectada</i> .....	51
17.1.4	<i>Carga visual</i> .....	52
17.1.5	<i>Zona de intrusión visual e impacto objetivo</i> .....	52
17.1.6	<i>Evaluación del paisaje</i> .....	52
17.1.7	<i>Impacto visual percibido</i> .....	52
17.2	VALORACIÓN MONETARIA .....	52
<b>18</b>	<b>EROSIÓN DEL SUELO.....</b>	<b>53</b>
18.1	CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS .....	53
18.2	VALORACIÓN ECONÓMICA .....	54
<b>19</b>	<b>CONTAMINACIÓN AGRARIA DIFUSA .....</b>	<b>54</b>
<b>20</b>	<b>EFFECTOS MACROECONÓMICOS.....</b>	<b>56</b>



20.1	MODELO INPUT-OUTPUT .....	57
20.2	PRODUCTO INTERIOR BRUTO.....	58
20.3	IMPUESTOS .....	58
<b>21</b>	<b>EMPLEO .....</b>	<b>58</b>
<b>22</b>	<b>ACCIDENTES Y DEGRADACIÓN DE LA RED VIARIA .....</b>	<b>60</b>
<b>23</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>24</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>62</b>

eoi



## 1 Introducción

La energía, y como caso particular, la electricidad, es parte central de la actividad económica y de la sociedad. Las condiciones de generación, transporte, distribución y consumo de electricidad afectan tanto a los operadores económicos como al conjunto de la sociedad. Una de estas condiciones, quizá la de mayor relevancia, es el precio de la electricidad, por su repercusión en la competitividad industrial, y por su papel de herramienta de asignación de recursos del mercado. Debe recordarse que un funcionamiento correcto del mercado sólo puede lograrse cuando el precio recoge adecuadamente todos los costes incurridos en el proceso de producción.

Sin embargo, recientemente se está tomando conciencia, tanto desde la opinión pública como desde las distintas administraciones, de que el precio de la electricidad no recoge todos los costes. Existen una serie de impactos medioambientales de la generación eléctrica, cuyos costes no aparecen incluidos en su precio, lo que se conoce como externalidades, o costes externos. El hecho de que estos costes no se consideren en el precio de la electricidad es un fallo del mercado, que a su vez hace que la asignación de recursos no sea la óptima, al impedir una competencia real y un buen funcionamiento del mercado.

De esta forma el precio de la energía se mantiene artificialmente bajo por lo que puede considerarse como un subsidio del que disfruta la energía y que paga la sociedad, en su conjunto, de manera no voluntaria e indiscriminada. Pero no todas las tecnologías energéticas tienen los mismos costes externos. Los costes externos de las energías convencionales, principalmente las fósiles, son muy superiores a los de las energías renovables y por tanto reciben un mayor subsidio lo que les hace aparentar como energías competitivas y por lo tanto más atractivas que las renovables para los productores. Sin embargo si al precio de las energías convencionales se les añade los costes externos ocasionados - daños de la lluvia ácida, calentamiento global, efectos de accidentes como Chernobil, etc- la argumentación del elevado coste de las energías renovables y su consiguiente falta de competitividad queda invalidado.

Para corregir este fallo del mercado, es necesario internalizar estos costes, incorporándolos en el precio. Y para ello se requiere su cuantificación en términos monetarios. Esta idea ya está presente en distintas políticas españolas y europeas, como el Plan Energético Nacional, o el Libro Blanco de la Energía de la Comisión Europea.

La internalización de los costes permite asimismo analizar sobre una misma base las ventajas e inconvenientes que presentan las distintas opciones energéticas, desde un punto de vista de satisfacción de objetivos contradictorios, económico y medioambiental. También permite la incorporación de los impactos medioambientales a los procesos de planificación, sin necesidad de alterar sustancialmente estos.

## 2 El concepto de externalidad

Una externalidad se puede definir como toda aquella consecuencia en la sociedad y en el medio ambiente causadas por un proceso de producción que no es tenida en cuenta en el precio del producto. Pongamos por ejemplo la producción de electricidad en una



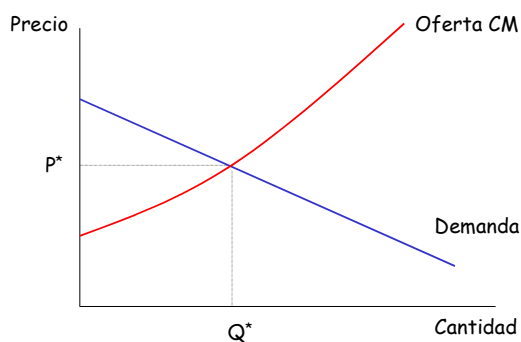
central térmica de carbón. Las emisiones atmosféricas de esta central producen unos daños en la salud de las personas, los cultivos, los materiales de construcción, los ecosistemas forestales, el calentamiento global, etc. Estos daños no son tenidos en cuenta como costes reales de la producción de electricidad y por tanto no son tenidos en cuenta en el precio del producto en este caso la electricidad generada.

## 2.1 Eficiencia y externalidades

El criterio económico para elegir entre diferentes asignaciones de recursos a las distintas actividades es el de eficiencia. Cualquier asignación de recursos satisface el criterio de eficiencia si el beneficio neto obtenido es máximo, entendiendo por beneficio neto el exceso de beneficios sobre los costes.

Los beneficios se obtienen de la curva de demanda para el recurso en cuestión. Las curvas de demanda miden la cantidad de un bien que la gente está dispuesta a comprar a los diferentes precios. En una situación típica una persona está dispuesta a comprar menos cantidad de un bien o servicio si su coste es mayor. La disponibilidad a pagar total de la gente por una cantidad de un bien es todo el área debajo de la curva de demanda y eso es lo que denominamos beneficio total.

En lo mismos ejes podemos representar la curva de costes marginales, es decir los costes de producir cada unidad adicional de producto o servicio. El coste total se representa por el área bajo la curva de costes marginales. El beneficio neto es por tanto la porción debajo de la curva de demanda que está por encima de la curva de oferta. Los beneficios netos se maximizan cuando el beneficio marginal es igual al coste marginal, es decir, el punto donde se cruzan las curvas de oferta y demanda. Este punto determina la asignación eficiente de los recursos en la producción de un bien.



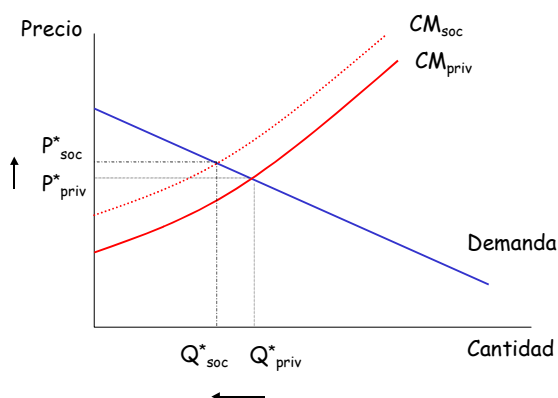
**Figura 1. Eficiencia**

Pongamos por ejemplo el caso de la contaminación atmosférica producida por una central térmica de carbón. Esta contaminación produce unos efectos negativos en los cultivos de la zona por ejemplo que suponen unos costes adicionales a los agricultores. Debido a que el propietario de la central no soporta este coste adicional, el no va a modificar la cantidad de energía que produce ni el precio, con lo que se va a originar un fallo de mercado. Este fallo está provocado porque la herramienta de asignación de

recursos en el mercado que es el precio no recoge adecuadamente todos los costes asociados al proceso de producción. Dicho precio debería ser mayor e incorporar los costes sociales que está produciendo el kWh producido en esa central.

Si estos efectos externos se incluyeran en el precio de la energía producida por esta central éstos se incrementarían con lo cual se producirían los siguientes efectos:

- la cantidad de energía que podría vender a este precio más elevado sería menor, con lo que disminuiría su producción y por tanto los efectos negativos derivados de la misma
- por otra parte existiría un incentivo económico para reducir las emisiones por el cual el empresario intentaría producir de una forma más limpia para poder producir más y así vender más energía.



**Figura 2. Externalidad**

En el ejemplo que hemos visto se trata de una externalidad negativa o coste externo, pero existen casos de externalidades positivas o beneficios externos. Como ejemplo podemos citar la reducción de la erosión que se consigue al cultivar biomasa para producir electricidad en tierras de retirada. Esta reducción de erosión produce efectos beneficiosos sobre otros agricultores o sobre los ríos y embalses de la zona. Estos beneficios no se ven reflejados en el precio de la electricidad producida por lo que éste se sitúa por encima de lo que debería y la cantidad producida es inferior a la óptima.

Estas externalidades desaparecen cuando se compensan o internalizan. Es decir, cuando los costes o beneficios externos se incorporan al precio del producto. Esto trae como consecuencia la corrección del fallo de mercado, una distribución de recursos más eficaz y una mejora en el bienestar social. Existen varias formas de internalizar estas externalidades pero en casi todos los casos es necesario primero cuantificarlas y valorarlas en los mismos términos que el precio, es decir, en unidades monetarias.

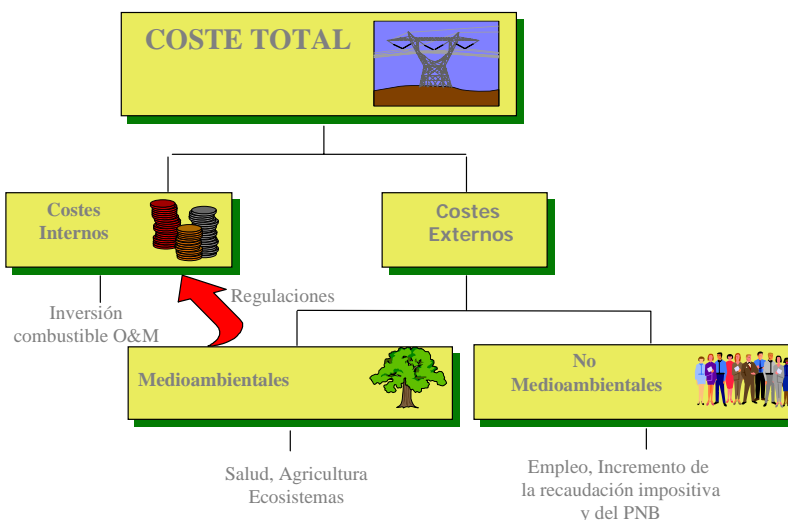
## 2.2 Coste total de la energía

El coste total de la energía serán los costes privados (combustible, operación y mantenimiento e inversiones), más los costes externos o externalidades negativas o menos los beneficios externos o externalidades positivas. Puesto que los costes costes

privados están expresados en términos monetarios, la cuantificación de las externalidades en términos monetarios es la forma más directa de dar un valor real a la producción de energía.

La razón más importante para la evaluación económica de las externalidades de la energía es la de asegurar una estructura óptima de fuentes de energía que permita satisfacer una determinada demanda energética. Si los costes externos son tenidos en cuenta se derivan otra serie de aplicaciones importantes en la toma de decisiones:

- En la selección de tecnologías y combustibles en función de los impactos que producen
- Introducción de nuevas tecnologías energéticas cuyos costes privados sean más altos pero con beneficios ambientales
- Selección de emplazamientos desde una perspectiva global (mínimos costes totales : privados + externos)
- Establecimiento de prioridades en los planes sobre energía, medio ambiente e investigación
- Optimización de las regulaciones sobre contaminación determinando el nivel óptimo de tasas y subsidios
- Desarrollo de estrategias para un desarrollo sostenible. Se pueden usar como indicadores para establecer prioridades.
- Contabilidad verde, como forma de contabilizar los daños mediambientales en introducirlos en el PIB de los países



**Figura 3. Coste total de la energía**





### **2.3 Influencia de los costes/beneficios externos en la competitividad y mercado de las energías renovables**

Las tecnologías de generación energética que utilizan fuentes de energía renovables presentan una serie de beneficios frente a las energías convencionales que no se encuentran recogidos dentro de la estructura convencional de precios de la energía. Estas ventajas tienen una triple vertiente: medioambiental, social y económica. Así,

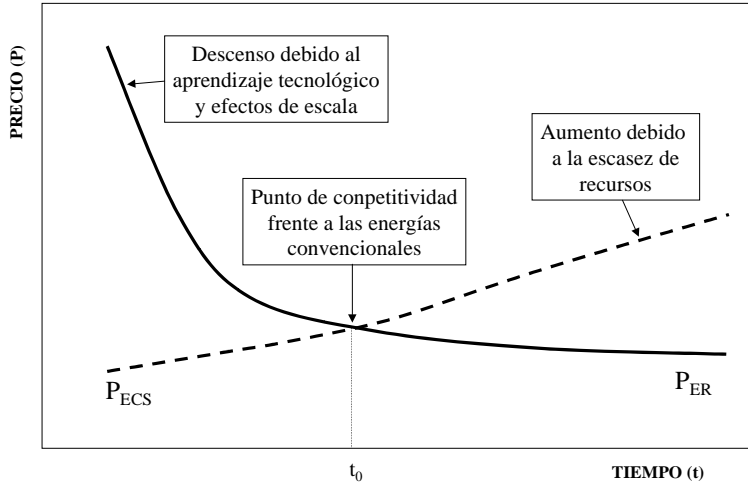
- Contribuyen a la diversificación y a la estabilidad de la oferta energética.
- Reducen emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la generación energética contribuyendo al mismo tiempo a una reducción de los riesgos de cambio climático.
- Producen beneficios sociales y económicos a través de la reducción de otros impactos medioambientales (emisiones de SO<sub>2</sub>) a escala local y regional.
- Aumentan el nivel de empleo en zonas rurales en labores de fabricación, instalación y operación, así como estimulan el desarrollo de las pequeñas y medianas empresas.
- Mejoran la cohesión económica y social, especialmente en comunidades rurales alejadas, proporcionándoles servicios energéticos y maximizando la utilización de recursos energéticos endógenos

Existen por otra parte impedimentos para el desarrollo de las tecnologías de conversión de fuentes renovables dentro del mercado energético. Estos impedimentos se encuentran relacionados con el funcionamiento técnico y del mercado de las energías renovables. Aunque no todas las tecnologías de conversión de las fuentes de energía renovables se encuentran cerca de su competitividad comercial, existen dos factores que afectan al funcionamiento correcto de este tipo de energías:

- En primer lugar, una serie de factores tecnológicos determinan que las energías renovables posean un perfil de inversiones que requieren una mayor intensidad en capital que las fuentes convencionales, lo cual en ciertos casos puede detener a los inversores.
- En segundo lugar, el fallo que se produce en el mercado energético respecto a la internalización de los costes sociales y medioambientales en los cuales incurren las fuentes de energía convencionales que compiten con las energías renovables.

Cada una de las tecnologías de conversión de las energías renovables tiene una serie de cargas y beneficios medioambientales, que pueden representar una adición o una reducción de costes. Sin embargo, estos costes no se han comparado con aquellos producidos por las tecnologías de conversión convencionales de una forma consistente. Ello sitúa claramente en una posición desfavorable a las energías renovables frente a las convencionales.

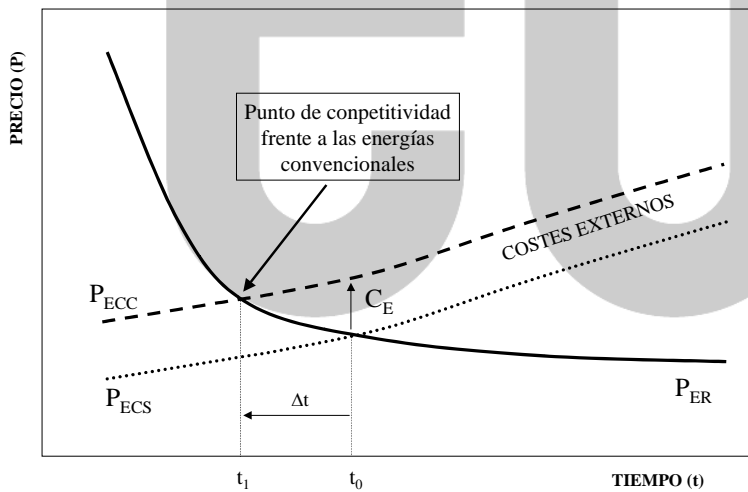
A pesar de ello, los costes de generación de las energías convencionales aumentan de forma progresiva frente al descenso que se está produciendo en los costes de generación de las energías renovables, debido fundamentalmente a su proceso de desarrollo tecnológico. Sin tener por tanto en cuenta la inclusión de los costes/beneficios externos relacionados con las fuentes renovables, el proceso de sustitución de las energías convencionales por las renovables se produciría en un determinado periodo de tiempo  $t_0$ , tal como aparece reflejado en la figura 4.



$P_{ER}$ : precio de generación de las energías renovables  
 $P_{ECS}$ : precio de generación de las energías convencionales sin considerar sus costes externos

**Figura 4. Evolución temporal de los costes de generación de las tecnologías energéticas sin tener en cuenta los costes/beneficios externos.**

La falta de consideración de los costes/beneficios externos dentro del mercado energético supone que el proceso de difusión de las energías renovables sufra un retraso, tal como reflejan las siguientes figuras 5 y 6.



$P_{ER}$ : precio de generación de las energías renovables  
 $P_{ECS}$ : precio de generación de las energías convencionales sin considerar sus costes externos  
 $P_{ECC}$ : precio de generación de las energías convencionales considerando sus costes externos  
 $C_E$ : costes externos de las energías convencionales

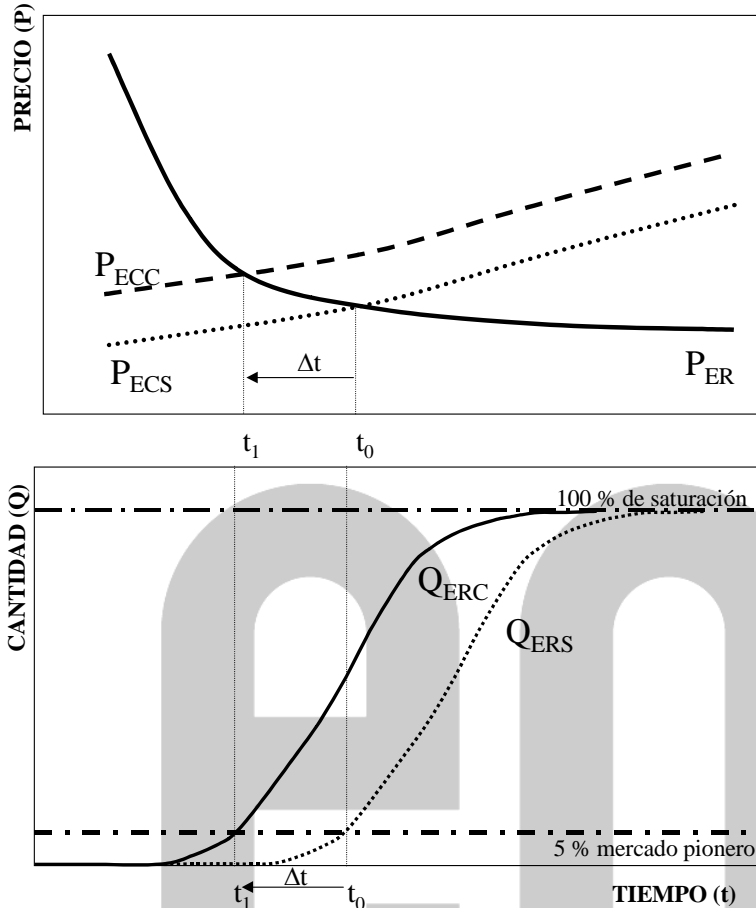
**Figura 5. Evolución temporal de los costes de generación de las tecnologías energéticas considerando los costes/beneficios externos.**

Debido a que el ajuste de precios de generación de las distintas fuentes energéticas por parte del mercado no se realiza de una forma adecuada para el caso de tecnologías de generación competitivas, las administraciones públicas deberían ser el organismo encargado de corregir este deficiente funcionamiento del mercado energético. Desde el



punto de vista teórico, esta internalización de costes y beneficios externos debería ser llevada a cabo en primer lugar a través de la imposición fiscal sobre las actividades energéticas que generan costes a la sociedad. Sin embargo, en la práctica está en discusión la efectividad de estas medidas desde el punto de vista de los costes en los que sería necesario incurrir en tareas de control y también bajo el prisma de la competitividad de las empresas en un mercado energético cada vez más internacionalizado. Por otra parte, desde el punto de vista político es difícil superar la resistencia de los grupos interesados a la inclusión de un nuevo impuesto sobre sus actividades. Una de las formas de evitar estas controversias es la instauración de subsidios o precios especiales para las energías renovables, aunque ello debería realizarse en la medida que estos beneficios comparativos o costes evitados fuesen evaluados de forma consistente.

Una conclusión derivada de la figura 6 es la necesidad de llevar a cabo una valoración económica de todos los costes/beneficios derivados de la utilización de fuentes energéticas convencionales y renovables. Volviendo a la anterior figura 6, la consideración de todos los costes externos de las energías convencionales aumentaría la distancia existente entre las curvas  $P_{ECS}$  y  $P_{ECC}$ , lo cual provocaría que el punto de corte entre las curvas  $P_{ECC}$  y  $P_{ER}$  se produjera de forma anticipada en el tiempo, en un punto más próximo al origen que el punto  $t_1$ . Ello supondría anticipar la introducción de las energías renovables en el mercado energético.



$P_{ER}$ : precio de generación de las energías renovables  
 $P_{ECS}$ : precio de generación de las energías convencionales sin considerar sus costes externos  
 $P_{ECC}$ : precio de generación de las energías convencionales considerando sus costes externos  
 $Q_{ERS}$ : curva de difusión en el mercado de las energías renovables sin considerar los costes/beneficios externos  
 $Q_{ERC}$ : curva de difusión en el mercado de las energías renovables considerando los costes/beneficios externos

**Figura 6. Difusión en el mercado de las energías renovables debido a la consideración de los costes/beneficios externos.**

### 3 Mecanismos de internalización de los costes/beneficios externos

Una completa internalización de los costes/beneficios externos generados por las distintas fuentes energéticas no parece todavía posible, debido principalmente a la incertidumbre asociada a la valoración monetaria de estos costes/beneficios, aunque se está produciendo un consenso generalizado acerca de la consideración de estos costes/beneficios dentro de la estructura energética de cada país.

El proceso de internalización de los costes/beneficios externos debe llevarse a cabo teniendo en cuenta, al menos, las siguientes etapas:

- La identificación de todos los efectos externos positivos y negativos originados a lo largo del ciclo de producción de energía por cada uno de los combustibles.



- La definición precisa de cada uno de los efectos producidos y su ruta de impacto.
- La cuantificación y valoración económica de cada uno de los efectos socioeconómicos y medioambientales generados en cada etapa del ciclo.
- La selección del mecanismo de internalización más apropiado en cada caso aplicable al coste/beneficio externo analizado.
- La implantación del mecanismo de internalización seleccionado.

Una consideración importante acerca de la internalización de estos costes/beneficios externos relacionados con la generación, supone la consideración de las ventajas o inconvenientes que conllevaría la aplicación de caminos alternativos hacia esta internalización. En el caso de que el objetivo a alcanzar fuese la consideración dentro del mercado energético de los costes totales, inicialmente este objetivo podría lograrse a través de dos caminos:

- La utilización de instrumentos penalizadores sobre las fuentes energéticas generadoras de costes externos, o
- La consideración de instrumentos o mecanismos que valorasen los beneficios externos generados por las fuentes energéticas.

Ambos caminos requieren la utilización de instrumentos económicos que pueden estimular cambios en el comportamiento de los productores y consumidores dentro del mercado energético. Sin realizar un repaso exhaustivo sobre ellos, los más importantes serían:

- Impuestos sobre emisiones. Se trata de un impuesto sobre la cantidad de contaminante emitido. Este instrumento económico se puede aplicar una vez evaluado económicamente el efecto externo producido por una unidad de contaminante emitido (en forma sólida, líquida o gaseosa) por cada tecnología de generación energética.
- Impuestos sobre el tipo de combustible. En función del efecto externo generado durante todo el ciclo de vida de cada combustible, es posible aplicar un impuesto en función del coste externo generado que grave su utilización.
- Estandarización o Límites de emisión: Se fijan emisiones máximas. Este tipo de regulación es el que se aplica por ejemplo a las grandes centrales de combustión.
- Comercialización de permisos de contaminación. Los límites de contaminación fijados por las autoridades públicas, marcan la creación de un mercado de permisos de contaminación entre fuentes energéticas alternativas. Estos permisos se reparten inicialmente en el mercado. Las tecnologías más limpias tendrán un exceso de permisos de emisión que podrán vender a otras tecnologías más contaminantes. Existe así un incentivo económico claro para reducir la contaminación.
- Subsidiación de fuentes energéticas. Este apoyo público, que se puede realizar bien a través de subvenciones directas de capital, de explotación o financieras, o bien a través de precios reconocidos por encima de los precios de mercado, debe basarse en ambos casos en la valoración de los beneficios socioeconómicos y ambientales de cada fuente energética.
- Desgravaciones fiscales. Como en el caso anterior, las desgravaciones fiscales aplicables a las inversiones o rentas generadas por fuentes de energía renovables



deben estar basadas en el análisis particular de los beneficios generados por cada una de ellas.

- Medidas promocionales. El establecimiento de campañas de información y educación, planes de promoción o apoyo a potenciales inversores. Ayuda y estimulación en la creación de fondos de inversión en energías renovables. Minimización de los costes de transacción (permisos, acceso a red eléctrica,...) en el caso de inversiones en estas energías.

Estándares, tasas y subvenciones son mecanismos equivalentes para restaurar la eficacia. Si el riesgo de daño ambiental es muy elevado fijaremos un límite de emisión, en caso contrario aplicaremos incentivos económicos y dejaremos que el mercado actúe. Sin embargo, la aplicación de estos instrumentos económicos como mecanismos de internalización de los costes/beneficios externos generados por las distintas fuentes energéticas, requiere la existencia de una serie de condiciones:

- El funcionamiento óptimo de los instrumentos económicos se produce en circunstancias donde los mecanismos del mercado funcionan razonablemente bien o no existen distorsiones de mercado. Por tanto, es preciso conocer si los actores afectados por la aplicación de estos instrumentos operan en un mercado competitivo donde tienen además acceso a la información necesaria para tomar sus decisiones.
- La introducción de un mecanismo de internalización de costes/beneficios externos debe tener en cuenta si éste refuerza o contrarresta el funcionamiento de los ya existentes en el mercado energético.
- La introducción de impuestos debe conllevar la aplicación de una serie de incentivos para lograr el cambio de actitud de los productores/consumidores.
- La introducción de instrumentos económicos para alcanzar la internalización de costes/beneficios externos debe realizarse a través de un proceso gradual o bien informando anticipadamente al mercado, permitiendo así a los productores/consumidores tenerlos en cuenta en sus decisiones futuras de inversión/consumo.

#### **4 Directrices comunitarias relativas a las ayudas estatales a energías renovables. Cálculo de las primas.**

La comisión europea en su documento "Directrices comunitarias sobre ayudas estatales en favor del medio ambiente" publicado en el DOCE del 3/2/2001 (C 37/3), y más concretamente en su apartado E.3.3. en el que se establecen las "Condiciones aplicables a todas las ayudas de funcionamiento a favor de las energías renovables", se proponen tres opciones por las que los Estados miembros puedan conceder ayudas a las energías renovables:

- La opción 1 consiste en que los Estados miembros podrán conceder ayudas que compensen la diferencia entre los costes de producción de las energías renovables y el precio de mercado de la electricidad.
- La opción 2 consiste en que los Estados miembros podrán conceder ayudas utilizando mecanismos de mercado como los certificados verdes, donde los



productores de energías renovables se benefician de una demanda de certificados cuyo precio se fija por oferta y demanda.

- La opción 3 consiste en que los Estados miembros podrán conceder ayudas de funcionamiento a las nuevas instalaciones de producción de energía renovable, calculadas sobre la base de los costes externos evitados. Los costes externos evitados son los costes medioambientales que la sociedad debería soportar si la misma cantidad de energía se generase en una instalación de producción que funcionase con energías convencionales. Estos costes se calcularán sobre la base de la diferencia entre, por una parte, los costes externos producidos y no abonados por los productores de energía no renovable, y por otra los costes externos producidos y no abonados por los productores de energía renovable. Para realizar estos cálculos, el Estado miembro deberá utilizar un método de cálculo internacionalmente reconocido. Se añade que en cualquier caso, el importe de la ayuda concedida de esta forma al generador de energía renovable no podrá exceder de 5 céntimos de euro por kWh.

El problema en esta opción 3 es la elección de ese método de cuantificación de externalidades internacionalmente reconocido. Veamos ahora qué metodologías existen hasta la fecha para el cálculo de externalidades.

## 5 Cuantificación de externalidades

Ha habido varios intentos hasta la fecha de realizar la cuantificación de las externalidades especialmente las de la energía. Una revisión de las metodologías más importantes y las diferencias entre ellas se puede encontrar en Shleisner, 1999.

### 5.1 Metodologías TOP-DOWN:

Es la metodología utilizada en los primeros trabajos sobre externalidades (Hohmeyer, 1988). Esta metodología calcula las externalidades de forma global y generalmente a escala regional o nacional y usa valores medios estimados previamente tanto de las cantidades de contaminantes emitidos como de los daños causados. Se calcula así para cada emisión de contaminante el daño producido. Se trata de una metodología muy útil, dada su simplicidad para tener una idea general de los daños producidos por los ciclos de combustibles. Sin embargo tiene una serie de limitaciones. Al estar basado en valores medios nacionales es imposible calcular por este sistema el efecto de una instalación adicional con sus características específicas. No se considera tampoco el efecto de variaciones en la distribución de cargas y receptores. No es así posible calcular el coste marginal de una instalación adicional. Esto supone una limitación a la hora de internalizar las externalidades introduciendo estos costes en el precio ya que para ello necesitamos costes marginales. Además el impacto producido por distintas centrales es probablemente muy distinto según sea su tecnología y emplazamiento. La asignación de un valor medio distorsionaría la asignación eficiente de los recursos por el mercado.

## 5.2 Metodologías BOTTOM-UP

Las metodologías con un enfoque bottom-up es decir, de abajo a arriba tratan de evitar esta limitación (Ottinger et al, 1990, Bernow, 1990 y 1995, Pearce, 1992, TER, 1995), utilizando datos de emisión específicos de cada tecnología y los datos específicos de localización de cada central. Se han realizado algunos estudios de este tipo utilizando diferentes métodos de valoración. En este tipo de metodologías se encuadra la metodología propuesta por el proyecto ExternE (EC, 1995), que es un proyecto de la Comisión Europea dentro del programa JOULE que desarrolla una metodología de evaluación de externalidades de la energía. En la siguiente tabla se muestran resultados de las valoraciones de las distintas metodologías.

**Tabla 1. Costes externos de distintos ciclos de combustible utilizando distintas metodologías**

ESTUDIO	CICLOS DE COMBUSTIBLE						
	CARBÓN	FISIÓN	GAS	FUEL	HIDRO	SOLAR	EÓLICA
Hohmeyer*	4 -9	2 -21	4 - 9	4 - 9	No calculado	-(7 - 17)	-(6 - 13)
Ottinger et al. *	7	3	1 - 2	3 - 8	No calculado	0 - 0.5	0 - 0.1
Pearce*	2 - 8	0.5	1	9	0.1	0.1	0.1
Bernow et al 1995*	0.3	0.01	0.02	0.15	No calculado	No calculado	0
ExternE, 1997**	5,63	0,45	1,7	5,6	0,3	0,24	0,15

\*1994 UScents/kWh

\*\* 10<sup>-2</sup> Euro/kWh

Los resultados de las distintas aproximaciones de valoración de costes externos muestran una variación bastante amplia debido a diferencias metodológicas y a los distintos supuestos considerados. Para una discusión sobre el tema ver Stirling.

## 5.3 Costes de control vs Costes de daño

Los métodos de cuantificación de las externalidades difieren entre unos estudios y otros. Uno de los métodos propuestos es el de *costes de control*. Este método se basa en la





consideración de los costes de control de la contaminación, es decir, los costes de reducir las emisiones de contaminantes, o bien los *costes de restitución o mitigación* que serían los costes de restaurar los daños producidos, como substitutos de los costes del daño producido. Ambos conceptos, costes de control y costes del daño, no están relacionados ya que el coste de por ejemplo poner un filtro en una chimenea para reducir las partículas emitidas hasta un cierto nivel no tiene nada que con el coste del daño que producen estas partículas. Se trata sólo de una aproximación por defecto de los beneficios de reducir el nivel de contaminación hasta ese nivel, puesto que el hecho de instalar esos filtros implicaría que los beneficios de hacerlo son mayores que los costes de dicha instalación cualesquiera que éstos sean. Algunos estudios utilizan este método al considerar que el coste marginal de reducir las emisiones a los límites exigidos por la legislación expean la disponibilidad a pagar de la sociedad para evitar el daño producido por las mismas. Los costes de restitución por su parte pueden no recoger la totalidad del daño producido puesto que algunos daños pueden ser irreversibles.

Una forma de estimar los costes del daño propiamente de dicho es el método de *la función de daño o ruta de impacto*. Este método, también conocido como Coste directo o Valoración directa de daño, identifica todos los impactos producidos por la contaminación y los cuantifica en términos físicos como son las disminuciones en las cosechas, los daños en los edificios, etc. Después les asigna valores en unidades monetarias y calcula el daño total. Esta es la aproximación utilizada en el proyecto ExternE por considerarla la mas apropiada para cuantificar las externalidades.

## 6 La metodología ExternE

La metodología ExternE ha sido desarrollada en el seno de un proyecto de la Comisión Europea, el Proyecto ExternE (EC, 1995) dentro del Programa JOULE II, cuyo objetivo fue desarrollar una metodología para la cuantificación de externalidades de las diversas tecnologías de generación eléctrica. Esta iniciativa empezó en 1991 como un proyecto en colaboración entre el Departamento de Energía de Estados Unidos y la Comisión Europea, y fue continuado por la Comisión como el Proyecto ExternE. Es este proyecto inicial participaron más de 40 instituciones europeas de 9 países así como científicos de Estados Unidos. El resultado fue el primer intento de usar una misma metodología de tipo bottom-up para evaluar los costes externos de una amplio rango de diferentes ciclos de combustible. Posteriormente, y dentro del Programa JOULE III, el proyecto se continuó en tres diferentes áreas:

- el programa CORE dedicado a completar y perfeccionar la metodología (EC, 1999a,b, c)
- el programa TRANSPORT dedicado a adaptar la metodología a la evaluación de las externalidades del sector transporte (EC, 1999b)
- el programa NATIONAL IMPLEMENTATION dedicado a aplicar la metodología desarrollada en 12 diferentes ciclos de combustible de 15 países europeos. Este programa ha proporcionado una base de datos muy amplia de costes externos de diferentes ciclos de combustible tanto convencionales como renovables en Europa.



Se trata de una metodología con un enfoque bottom-up, basado en el método de la función de daño o ruta de impacto.

Las características fundamentales de esta metodología son:

- tiene un enfoque marginal o incremental, es decir, se analiza el efecto de una actividad adicional a las ya existentes
- se basa en la especificidad del emplazamiento de la actividad y de la tecnología. Se necesitan datos concretos del lugar donde se sitúan las centrales en cuanto a la distribución de los distintos receptores de los impactos: población, cultivos, materiales etc.; así como de la tecnología utilizada para tener datos concretos de emisiones, efluentes, mano de obra, etc.
- Tres fundamentos básicos

**transparencia:** que es necesaria debido al alto grado de incertidumbre existente. Todos los métodos de estimación y los supuestos considerados tienen que ser claramente definidos y explicados para reflejar el grado de incertidumbre.

**coherencia:** se refiere a la utilización de los mismos supuestos y métodos para los mismos impactos independientemente de la actividad que los produce. Esto permite realizar comparaciones entre opciones obviando la incertidumbre del método de cuantificación.

**globalidad:** se refiere a la consideración de todas las etapas del ciclo energético, en nuestro caso desde la plantación del cultivo energético hasta el desmantelamiento de la central.

## 7 Fases del análisis

### 7.1 Caracterización del emplazamiento y la tecnología

El punto de partida del análisis es la Definición de sus límites espaciales y temporales. Estos límites deben ser diseñados para capturar los impactos de la forma más completa posible. Un ejemplo clásico son las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se trata de emisiones puntuales en un lugar determinado que sin embargo tienen consecuencias a largo plazo y a escala global.

Es imposible imponer una única escala temporal o espacial para todos los impactos ya que el periodo de tiempo y el área sobre la que actúan cada uno será variable. Habrá que analizarlos hasta el punto en que se considere que son relevantes. Sin embargo, siempre es necesario truncar el análisis en algún punto y momento. Habrá que mantener un equilibrio entre el carácter global del análisis y la precisión de los resultados que disminuye al ampliar la escala.

En cuanto a la tecnología, todas las etapas del ciclo de combustible deben ser consideradas. Se trataría de un caso particular de ANALISIS DE CICLO DE VIDA. Un tipo de evaluación similar en el que todas las etapas deben ser tenidas en cuenta. Se debe incluir la definición de todas las actividades desde la extracción del combustible hasta el desmantelamiento de la central. No se puede suponer de forma previa que alguna etapa no es relevante ya que todas pueden causar impactos significativos.



Hay que tener en cuenta que hay impactos que aparecen al inicio y al final de la vida útil de la central. Asimismo hay que considerar todos los subproductos y el manejo que se hace de ellos hasta el momento en que están listos para ser utilizados en otro lugar.

La localización de las diferentes etapas del ciclo de combustible es importante a la hora de determinar la magnitud de los impactos. Por ello se han de estudiar en detalle las características de los distintos emplazamientos. En la descripción del emplazamiento es importante el estudio de las características físicas como el clima y el suelo ya que influyen en muchos procesos como erosión y transporte de contaminantes; usos del suelo; vegetación; y características socioeconómicas como distribución y características de la población, niveles de empleo, importancia de los diferentes sectores económicos, etc.

En cuanto a los aspectos físicos son muy útiles los sistemas de información geográfica que como veremos permiten una integración muy fácil de la distribución de los receptores de los impactos (población, vegetación, cultivos, suelos, etc...) con la distribución de los contaminantes.

## **7.2 Identificación de cargas e impactos**

Como cargas se entiende cualquier acción o consecuencia del ciclo que estamos considerando que es capaz de producir un impacto.

Cargas típicas a tener en cuenta son:

- emisiones
- residuos
- accidentes
- exposición ocupacional a sustancias tóxicas
- ruido
- calor

etc...

El objetivo es contabilizar todas las cargas del ciclo para proporcionar las bases para un análisis global y coherente. En este punto es irrelevante si es probable o no que estas produzcan un impacto o si este va a ser o no significativo. Se trata de tenerlo todo en cuenta y luego ya priorizaremos. Las cargas identificadas incluirán asimismo no sólo las originadas de forma rutinaria sino aquellas producidas en situaciones de accidentes que pueden llegar a ser muy importantes en el caso por ejemplo de manchas negras por hundimientos de petroleros o accidentes en centrales nucleares. Para ello será normalmente necesario tener en cuenta los datos históricos y las tasas de accidentes calculadas. La consideración de estos accidentes, sobre todo en el caso de accidentes extremos está en cualquier caso sujeta a un muy alto grado de incertidumbre.

El siguiente paso es la identificación de los impactos que pueden producir estas cargas. Se deben identificar todos los posibles impactos. En este punto no se debe ignorar ningún impacto que se conozca o se sospeche por el mero hecho de no poder ser cuantificado o porque se piense que sea insignificante. Impactos que ahora se consideran despreciables pueden demostrarse significativos en los próximos años o al revés. Otros que no pueden cuantificarse en este momento pueden serlo en el futuro.



Toda esta identificación se realiza mediante la matriz de contabilización, una matriz donde todas las actividades, consecuencias e impactos se presentan de forma resumida.

### **7.3 Priorización de los impactos**

Hay un gran número de impactos que resultan de la puesta en marcha de un ciclo de generación eléctrica. Sin embargo, muchos de ellos pueden ser despreciables y otros pueden ser muy difíciles de cuantificar. El análisis completo de todos los impactos es inabordable por lo que hay que seleccionar aquellos efectos que van a producir las externalidades más importantes. Sobre la base de resultados previos o mediante el juicio de expertos se seleccionan aquellos que son más importantes.

En esta fase del análisis existe un riesgo de cometer errores importantes. Por ejemplo, en muchos casos los efectos locales se desprecian frente a los regionales porque afectan a un número más restringido de receptores y porque normalmente son fácilmente evitable mediante una correcta ordenación del territorio. Sin embargo, esto no es así en todos los impactos, por ejemplo los accidentes ocupacionales se producen fundamentalmente a nivel local, ni en todos los ciclos de combustible, por ejemplo los ciclos de renovables tienen la mayoría de sus impactos restringidos al ámbito local.

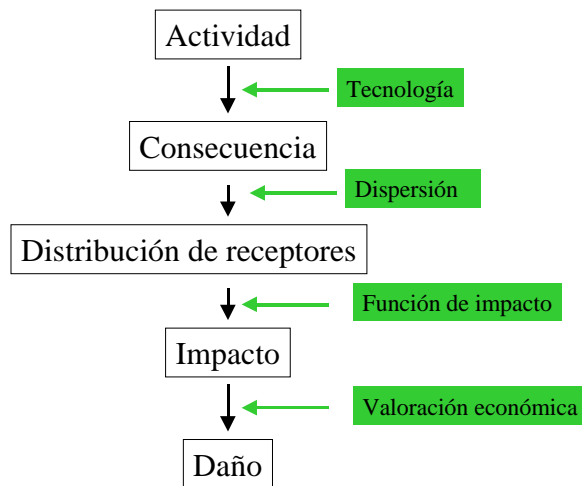
La selección de impactos depende también de si se pretende evaluar daños o externalidades. La diferencia entre ellos radica en su grado de internalización. Por ejemplo, los accidentes laborales que siempre suponen grandes daños, pueden estar internalizados en gran medida en los sueldos por lo que la externalidad será muy pequeña. Esto es discutible si tenemos en cuenta que sería necesario que los trabajadores estuvieran bien informados del riesgo que corren y existiera una completa movilidad en el mercado laboral, condiciones que pueden no existir en muchos casos.

Debido a que sólo se van a considerar algunos impactos, los resultados que se obtengan solo serán subestimaciones de la externalidad total producida. Cada caso deberá ser analizado de forma individualizada porque las diferencias introducidas por el emplazamiento pueden ser muy importantes.

### **7.4 Cuantificación de los impactos**

La cuantificación de los impactos se realiza con el método de la función de daño o ruta de impacto que vimos anteriormente. Esta ruta es el conjunto de etapas lógicas que permiten ir desde la actividad que origina el impacto hasta llegar al daño producido y a su valoración económica de una forma individualizada para cada impacto.

A continuación se representa de forma simplificada esta ruta de impacto



**Figura 7.** Ruta de impacto

Las rutas de impacto pueden ser más o menos complicadas dependiendo de las actividades y del impacto. En algunos casos, la relación será relativamente directa, mientras que en otros pueden aparecer un gran número de interacciones e impactos asociados.

La primera etapa es la determinación de las cargas o consecuencias y su distribución espacial y temporal dentro de los límites previamente definidos. Es importante contar con datos fiables y actualizados por lo que la etapa de recolección de datos es extremadamente importante y determina la fiabilidad de los resultados. Esta distribución puede requerir de la utilización de herramientas complejas como modelos de simulación para la dispersión de contaminantes atmosféricos o de transporte de agroquímicos en el suelo y hacia las aguas subterráneas y superficiales.

Una vez conocida esta distribución de las consecuencias del ciclo y la distribución de los posibles receptores afectados, los impactos se cuantifican utilizando las funciones de impacto. Estas funciones pueden ser más o menos complejas. Por ejemplo, para obtener los accidentes laborales aplicaremos tasas de accidentes, pero otros impactos requerirán funciones más complejas como funciones dosis-respuesta. Estas funciones relacionan las cargas con los cambios producidos en los receptores y están definidas para algunos impactos como por ejemplo el efecto de las emisiones de contaminantes en la salud o en los cultivos.

Estas funciones no siempre existen para las condiciones de aplicación concretas de cada caso y hay que recurrir a otras funciones desarrolladas para otras condiciones. Esto produce errores e incertidumbres ya que la transferencia de estas funciones no siempre es directa.



## 7.5 Valoración económica

La última etapa de la estimación de las externalidades es la valoración económica de las mismas. Esto permite incluir las externalidades de forma explícita en medidas de regulación o en análisis coste-beneficio al mismo nivel que otras variables.

Esta valoración incluye dos aspectos:

- estimación de los costes y beneficios inducidos
- determinación del grado en que están internalizados.

La valoración económica se basa en la obtención de la **Disponibilidad a pagar** para evitar el impacto negativo o beneficiarse del efecto positivo, o bien la **Disponibilidad a aceptar** un pago como compensación.

Cuando existe un mercado para los bienes y servicios que se valoran se utiliza el precio como indicador, aunque a menudo el precio está distorsionado por impuesto o subvenciones.

El problema es que en la mayoría de los casos los bienes que se valoran no se intercambian en el mercado y por tanto no existe precio para ellos. En estos casos hay que utilizar métodos de valoración alternativos:

- Costes de control: costes asociados a la reducción de las consecuencias del ciclo. No son aceptables porque no tienen relación con la magnitud de los daños. Sería por ejemplo el coste de poner un filtro de partículas en una chimenea. El coste de control es mucho más reducido que el valor económico de los daños evitados.
- Costes de tratamiento: más aceptable aunque no es óptimo. Sería por ejemplo el coste de eliminar los sedimentos de los embalses acumulados debido a los fenómenos de erosión. Los valores de disponibilidad a pagar se espera que sean mayores puesto que la gente prefiere pagar más para evitar el riesgo de sufrir un daño. Aquí influye la percepción del riesgo por parte de la gente.
- valoración contingente
- precio hedónico
- coste del viaje

Estos últimos están afectados de un alto grado de incertidumbre ya que son muy específicos y su transferibilidad es muy limitada.

Dado que los costes y beneficios de un ciclo de combustible se distribuyen a lo largo de amplios períodos de tiempo, deben ser llevados al momento actual para poder ser comparados en igualdad de condiciones. Esto se hace aplicando la *tasa de descuento* que reduce el valor de los costes y beneficios futuros en relación con el presente. Hay dos razones que justifican una tasa de descuento: la primera es la impaciencia o preferencia temporal de los individuos que refleja la preferencia a consumir ahora antes que en el futuro. La segunda razón es la productividad marginal del capital: el capital es productivo y una peseta de hoy se convierte en algo más de una peseta en el futuro. Las tasas de descuento basadas en la productividad del capital son en general mayores que las tasas de preferencia temporal social. Por tanto el uso de tasas de descuento basadas en las tasas observadas en el mercado son demasiado elevadas desde el punto de vista social. La tasa de descuento central utilizada por la metodología es del 3%.



Cuanto mayor sea la tasa de descuento utilizada menor será el valor ligado a los beneficios y costes que se producen en el futuro. Una gran parte de la literatura medioambiental está en contra del uso de la tasa de descuento puesto que traslada los costes a las generaciones futuras.

## 8 Incertidumbre

En todo este proceso de estimación y valoración de externalidades existen numerosas fuentes de incertidumbre que van a afectar al resultado final de la valoración.

En primer lugar en la estimación de las cargas o consecuencias puede haber errores debido a la variabilidad de los datos. La cuantificación de los impactos puede ser incierta debido a la complejidad de los fenómenos implicados. La aplicación de las funciones dosis-respuesta y los supuestos adoptados para ello engloban una gran cantidad de incertidumbre. La valoración económica como hemos visto también presenta numerosos puntos débiles.

Las incertidumbres pueden clasificarse en diferentes categorías:

- incertidumbre en los datos
- incertidumbre en la modelización
- incertidumbre relacionada con decisiones políticas o sociales como la elección de la tasa de descuento
- incertidumbre acerca del futuro

Las primeras dos categorías son de naturaleza científica y deberían poder tratarse utilizando técnicas estadísticas para obtener intervalos de confianza alrededor de un estimación central. El problema es en muchos casos la distribución de probabilidades de los fenómenos no se conoce. Para los otros dos tipos de incertidumbre la realización de análisis de sensibilidad es más adecuada para ilustrar como se ven influenciados los resultados con las diferentes opciones o escenarios de futuro.

En el proyecto externE se ha hecho un intento de estimación de la incertidumbre de tipo científico considerando que en la mayoría de los casos las distribuciones de probabilidades se ajustan a una distribución lognormal y los intervalos de confianza se expresan dando una media geométrica y una desviación típica geométrica.

## 9 Ecosense

*Ecosense* fue desarrollado para evaluar los impactos producidos por la exposición a contaminantes atmosféricos en la salud, los cultivos, los materiales de construcción, los bosques y los ecosistemas. Los impactos sobre el calentamiento global no están incluidos en *Ecosense* debido a la naturaleza global del impacto y sus muy diferentes mecanismos. Los impactos debidos a accidentes, tampoco se incluyen ya que su estimación se basa en el análisis de estadísticas más que en una modelización.

Los contaminantes contemplados dentro de la herramienta incluyen SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, CO, dioxinas, metales pesados, hidrocarburos y ozono. *Ecosense* incorpora varias bases de datos relativas a tecnología, receptores, funciones dosis-respuesta y valores monetarios. Para simular la dispersión atmosférica de los contaminantes utiliza dos códigos, el modelo ISC (Industrial Source Complex Model) desarrollado por la



EPA para la dispersión a nivel local y el modelo WTM (Windrose Trajectory Model) para la dispersión a nivel regional. Incluye también un modelo regional para ozono basado en el modelo EMEP.

El módulo de evaluación de impactos calcula los impactos en unidades físicas aplicando funciones dosis respuesta y utilizando los campos de concentraciones resultantes de los modelos de dispersión, y en la medida de lo posible calcula los costes en unidades monetarias.

La herramienta genera un informe con los resultados finales en formato de texto y de tabla que puede ser exportado a una hoja de cálculo.

## **10 Impactos prioritarios de las diferentes tecnologías de generación eléctrica.**

Dentro del proyecto ExternE se han analizado un gran número de ciclos energéticos de generación de electricidad. Los impactos seleccionados como prioritarios en las diferentes tecnologías son los siguientes:

### **10.1 Impactos prioritarios de las tecnologías fósiles**

- Efectos de las emisiones atmosféricas sobre la salud (90% de los daños)
- Salud ocupacional
- Efectos de las emisiones atmosféricas en los materiales
- Efectos de las emisiones atmosféricas en los cultivos
- Efectos de las emisiones atmosféricas en los bosques
- Impactos sobre el calentamiento global

### **10.2 Impactos prioritarios de la tecnología nuclear**

- Impactos radiológicos y no radiológicos sobre la salud del público en general de las emisiones rutinarias y accidentales
- Impactos radiológicos y no radiológicos sobre la salud ocupacional de las emisiones rutinarias y accidentales

### **10.3 Impactos prioritarios de las energías renovables**

Los impactos prioritarios varían considerablemente con el tipo de tecnología y son en general muy dependientes de las condiciones locales.

#### **10.3.1 Energía eólica**

- Accidentes
- Impacto visual
- Impacto del ruido
- Impacto de las emisiones atmosféricas en las etapas del ciclo correspondiente a la fabricación de las turbinas y la construcción del parque.
- Impacto de los aerogeneradores sobre las aves





### 10.3.2 *Energía hidráulica*

- Accidentes ocupacionales
- Beneficios sobre el empleo y otros efectos en la economía local
- Impacto de las líneas de transmisión en las aves
- Daños a bienes privados como bosques, agricultura, etc
- Daños a bienes ambientales y culturales.

### 10.3.3 *Energía fotovoltaica*

- Accidentes
- Impacto visual
- Impacto de las emisiones atmosféricas en las etapas del ciclo correspondiente a la fabricación e instalación de los paneles.
- Uso del suelo

### 10.3.4 *Energía de la biomasa*

- Efecto de las emisiones atmosféricas en la salud
  - Efecto de las emisiones atmosféricas en la agricultura
  - Efecto de las emisiones de CO<sub>2</sub> sobre el fenómeno del calentamiento global
  - Erosión
  - Contaminación agraria difusa
- Impactos socioeconómicos
- Creación de empleo
  - Efecto macroeconómicos
  - Accidentes y uso de carreteras

## **11 Impacto de las emisiones atmosféricas en la salud**

Los procesos de combustión causan un incremento en la concentración de ciertos contaminantes atmosféricos, muchos de los cuales han sido asociados con efectos adversos sobre la salud del público en general.

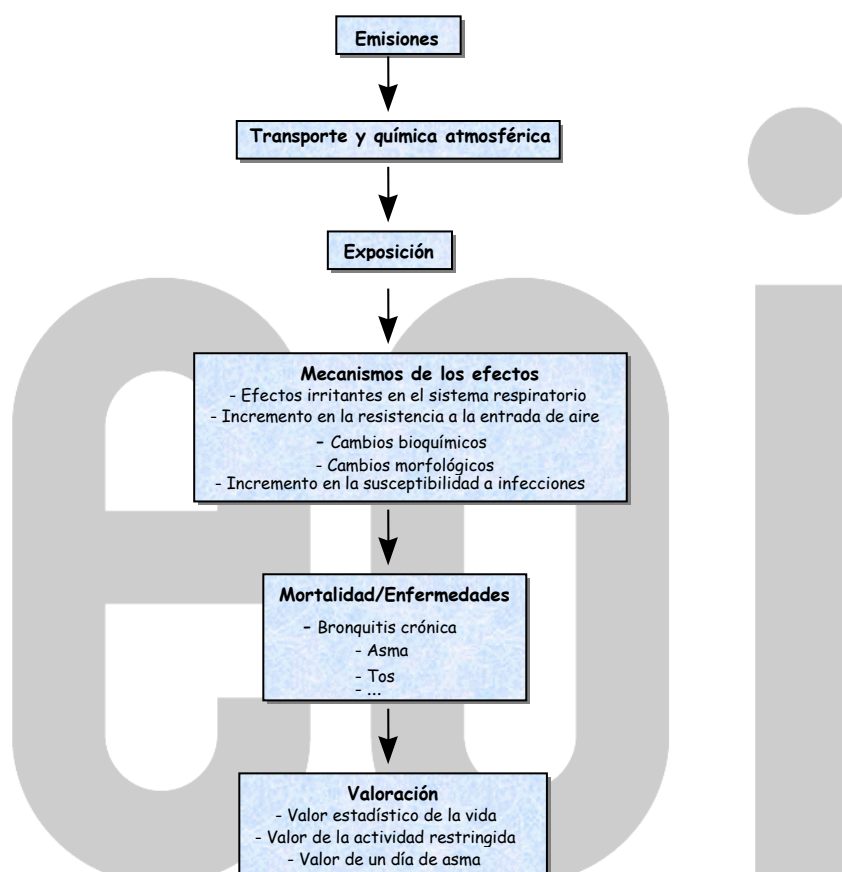
El incremento de concentración de contaminantes produciría un incremento en la exposición a los mismos de la población, definiéndose como exposición a un contaminante el contacto de una persona con un contaminante a una cierta concentración y durante un cierto periodo de tiempo (COST, 1991). Este contacto puede ocurrir por inhalación, ingestión o penetración a través de la piel. En nuestro caso, los contaminantes emitidos por la central entran en contacto con los receptores - la población - principalmente mediante inhalación siendo las otras formas de contacto extremadamente raras, y por tanto estas últimas formas no van a ser consideradas.

La población potencialmente expuesta a estos contaminantes es muy elevada y no se restringe a la que vive cerca del origen de las mismas, debido a procesos de transporte a grandes distancias y de transformación de contaminantes en la atmósfera.

En cuanto a los contaminantes considerados se incluyen los efectos del SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, las partículas primarias, es decir, las emitidas directamente y las secundarias (sulfatos y nitratos formados a partir de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), los VOCs y los efectos de los

oxidantes fotoquímicos como el ozono formado a partir de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno en el seno del penacho contaminante.

La ruta de impacto considerada para los efectos sobre la salud de las emisiones de la central se muestra en la siguiente figura



**Figura 8.** Ruta de impacto de los efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica

Aunque aquí se señalen algunos posibles mecanismos por los cuales se producen los efectos observados en la mortalidad y en la incidencia de enfermedades, estos mecanismos no se conocen y la estimación de los impactos se realiza a través de estudios epidemiológicos que relacionan concentraciones de los contaminantes en el aire con efectos observados en la salud y que permiten obtener funciones dosis-respuesta.

En el análisis se realizan una serie de simplificaciones que facilitan la cuantificación de los daños. Así, aunque los niveles de concentración presentan una gran variabilidad tanto temporal como espacial, se consideran sólo concentraciones medias anuales. En consecuencia, los efectos de concentraciones pico no se analizan sino que éstos se tienen en cuenta a través del cambio en esta concentración media anual. Asimismo, tampoco se consideran las posibles diferencias existentes entre las



concentraciones en el exterior y las que existen en el interior de edificios o recintos cerrados donde la gente pasa una gran parte de su tiempo.

### **11.1 Funciones dosis-respuesta.**

El incremento de contaminación en el aire producido por la combustión de la biomasa es debido a la mezcla de contaminantes que directamente emite y aquellos que se forman con posterioridad al interaccionar las emisiones con el medio ambiente. A la hora de cuantificar los efectos que sobre la salud produce esta compleja mezcla de contaminantes se procede a desagregar los efectos y a aplicar funciones dosis-respuesta específicas para cada uno de los contaminantes considerados.

Es necesario distinguir aquí los *efectos agudos* que se producen en el mismo día en que ocurre el incremento de contaminación o poco después, de aquellos *efectos crónicos* más o menos retardados que se producen a consecuencia de una exposición prolongada al contaminante.

Existen numerosas evidencias de los efectos agudos del SO<sub>2</sub> y en especial de las partículas sobre la incidencia de una gran variedad de enfermedades por lo que existen un gran número de funciones dosis-respuesta utilizables. Los efectos de exposiciones prolongadas a contaminantes son más difíciles de analizar debido a las complicaciones que entrañan los estudios epidemiológicos. Aun así existen funciones dosis respuesta que relacionan la exposición prolongada a partículas con el incremento de las tasas de mortalidad y la incidencia de afecciones respiratorias crónicas como luego veremos.

Una de las incertidumbres principales que se plantean en el uso de funciones dosis-respuesta es la transferibilidad de las mismas. En general parece que las funciones son aplicables a diferentes climas y lugares especialmente las que se refieren a hechos biológicos. En algunos casos, sin embargo, cuando se han derivado relaciones a partir de estudios sobre un mismo efecto realizados en diferentes sitios, se ha demostrado que pueden existir diferencias. En particular, los efectos agudos debidos a las partículas en Norte América han resultado ser mayores que los efectos en Europa, en particular la mortalidad y las admisiones hospitalarias. Las razones no están claras, pero se apunta a una mayor co-exposición a SO<sub>2</sub> en Europa. En cuanto a las admisiones hospitalarias, es probable que otros factores de tipo sociocultural estén implicados. Las diferencias observadas en estos estudios se han utilizado como factores de ajuste para extrapolar funciones dosis-respuesta obtenidas en Norte América para su aplicación a Europa, dentro del proyecto Externe.

Otra de las fuentes de incertidumbre de la metodología usada es la consideración o no de umbrales de respuesta. A escala individual es clara la existencia de un umbral en el sentido de que la mayoría de la gente no tiene riesgo de sufrir efectos agudos severos a los niveles de concentración habituales. Sin embargo, a escala de población, incluso con concentraciones muy bajas algunos individuos vulnerables pueden experimentar efectos adversos. En consecuencia, y siguiendo la metodología ExterneE consideraremos que no existe umbral de respuesta en la consideración de los efectos de la contaminación sobre la salud. La falta de consideración de umbrales de respuesta y el carácter lineal de las funciones dosis-respuesta lleva a que, en la cuantificación de los daños, sólo sea necesario conocer los incrementos de



concentración producidos por las emisiones de la central y que los impactos cuantificados sean independientes de la concentración de fondo de la zona.

Las partículas, en especial las de pequeño tamaño, irritan el sistema respiratorio, y pueden penetrar profundamente en los pulmones al ser inhaladas. El parámetro usado en el presente estudio como medida de partículas es  $PM_{10}$ , es decir, partículas de menos de  $10\mu$  de diámetro aerodinámico. Los efectos observados sobre la salud van desde efectos agudos como empeoramiento del asma (Dusseldorp et al, 1995 ; Roemer et al, 1993 ; Pope y Dockery, 1992), infecciones respiratorias, broncoconstricción, infartos, e incluso mortalidad aguda (Spix et al, 1996). También se han detectado efectos crónicos como tos crónica y bronquitis crónica en niños y adultos (Dockery et al, 1989 ; Abbey et al, 1995), y recientes estudios han demostrado una asociación entre los niveles de partículas y la mortalidad crónica (Pope et al, 1995). En la tabla siguiente se relacionan las funciones dosis-respuesta utilizadas para la cuantificación de los diferentes efectos producidos por las partículas, que son las recomendadas en la metodología ExternE.

En cuanto a los efectos del  $SO_2$  se han demostrado asociaciones entre los niveles de este contaminante y efectos agudos como incremento de admisiones hospitalarias relacionadas con problemas respiratorios (Ponce de León, et al 1996) e incluso mortalidad aguda (Anderson et al, 1996).

Los efectos del ozono pueden ser importantes, existiendo en la literatura científica numerosos estudios que relacionan concentración de ozono con una gran variedad de efectos agudos sobre la salud y habiéndose derivado una gran variedad de funciones dosis respuesta. Recientes estudios realizados en Europa demuestran que existe una relación entre concentraciones de ozono y admisiones hospitalarias (Ponce de León, 1996) y mortalidad aguda (Sunyer, et al 1996).

En cuanto a los efectos de los óxidos de nitrógeno, existen estudios epidemiológicos que relacionan las concentración de  $NO_x$  con determinadas enfermedades (Sunyer, et al, 1996 ; Ponce de León, 1996) aunque esta relación no parece causal sino el efecto de una compleja mezcla de contaminantes no bien medidos en los estudios y para la que el  $NO_x$  estaría actuando de sustituto. Sin embargo, tienen un efecto indirecto al formar nitratos y al intervenir en los procesos de formación del ozono troposférico.

En cuanto a la aditividad de los resultados, éstos se consideran en términos de casos adicionales de los diferentes efectos considerados, y se consideran aditivos aunque existan pequeños solapes entre ellos. En cuanto a los efectos sobre mortalidad aguda y crónica, los efectos crónicos sobre la mortalidad incluyen de hecho la mortalidad aguda, por lo que en el caso de partículas consideraremos sólo mortalidad crónica. Los efectos debidos a  $SO_2$ ,  $NO_x$ , ozono, y partículas se consideran asimismo aditivos.

**Tabla 2.** Funciones dosis respuesta y valores monetarios para los distintos efectos sobre la salud de los contaminantes atmosféricos

Receptor	Impact Category	Reference	Pollutant	$f_{er}^1$	Monetary value (EURO)
----------	-----------------	-----------	-----------	------------	-----------------------

ASTHMATICS (3.5% of population)



<i>Adults</i>	Bronchodilator usage	Dusseldorp <i>et al</i> , 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.163 0.163 0.272 0.272	40
	Cough	Dusseldorp <i>et al</i> , 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.168 0.168 0.280 0.280	45
	Lower respiratory symptoms (wheeze)	Dusseldorp <i>et al</i> , 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.061 0.061 0.101 0.101	8
<i>Children</i>	Bronchodilator usage	Roemer <i>et al</i> , 1993	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.078 0.078 0.129 0.129	40
	Cough	Pope and Dockery, 1992	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.133 0.133 0.223 0.223	45
	Lower respiratory symptoms (wheeze)	Roemer <i>et al</i> , 1993	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.103 0.103 0.172 0.172	8
<i>All</i>	Asthma attacks (AA)	Whittemore and Korn, 1980	O <sub>3</sub>	4.29E-3	75
<b>ELDERLY 65+ (14% of population)</b>					
	Congestive heart failure	Schwartz and Morris, 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates, CO	1.85E-5 1.85E-5 3.09E-5 3.09E-5 5.55E-7	3260
<b>CHILDREN (20% of population)</b>					
	Chronic bronchitis	Dockery <i>et al</i> , 1989	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	1.61E-3 1.61E-3 2.69E-3 2.69E-3	240
	Chronic cough	Dockery <i>et al</i> , 1989	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	2.07E-3 2.07E-3 3.46E-3 3.46E-3	240
<b>ADULTS (80% of population)</b>					
	Restricted activity days (RAD) <sup>2</sup>	Ostro, 1987	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.025 0.025 0.042 0.042	104 45
	Minor restricted activity day (MRAD) <sup>3</sup>	Ostro and Rothschild, 1989	O <sub>3</sub>	9.76E-3	



Chronic bronchitis	Abbey <i>et al</i> , 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	2.45E-5 2.45E-5 3.9E-5 3.9E-5	169330
<b>ENTIRE POPULATION</b>				
Respiratory hospital admissions (RHA)	Dab <i>et al</i> , 1996  Ponce de Leon, 1996	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates SO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.07E-6 2.07E-6 3.46E-6 3.46E-6 2.04E-6 3.54E-6	4320
Cerebrovascular hospital admissions	Wordley <i>et al</i> , 1997	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	5.04E-6 5.04E-6 8.42E-6 8.42E-6	4320
Symptom days	Krupnick <i>et al</i> , 1990	O <sub>3</sub>	0.033	45
Cancer risk estimates	Pilkington <i>et al</i> , 1997	Benzene Benzo[a]Pyrene 1,3 butadiene Diesel particles	1.14E-7 1.43E-3 4.29E-6 4.86E-7	
? Acute (AM)	Mortality Spix <i>et al</i> , 1996, Verhoeff <i>et al</i> , 1996  Anderson <i>et al</i> , 1996, Touloumi <i>et al</i> , 1996 Sunyer <i>et al</i> , 1996	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates SO <sub>2</sub>  O <sub>3</sub>	0.040% 0.040% 0.068% 0.068% 0.072%  0.059%	
Chronic (CM)	Mortality Pope <i>et al</i> , 1995	PM <sub>10</sub> , Nitrates, PM <sub>2.5</sub> , Sulphates	0.129% 0.129% 0.214% 0.214%	

## 11.2 Valoración monetaria

### 11.2.1 Mortalidad:

La valoración de la mortalidad está basada es la estimación de la *Disponibilidad a pagar* por un cambio el riesgo de muerte. Esto nos lleva a la determinación del denominado *Valor de la Vida Estadística*. Existen tres métodos de estimación de esta disponibilidad a pagar:

- ▣ Estudios sobre las compensaciones que aceptan los individuos para trabajar en puestos donde el riesgo de muerte es mayor (Disponibilidad de aceptar compensación). Se basa en que hay suficiente movilidad laboral para que los individuos elijan las ocupaciones que satisfacen todas sus preferencias incluidas las de riesgo. Esto es bastante cuestionable. Además en este tipo de estudios los riesgos son mayores que los que se producen en los ciclos de combustible estudiados y estos puestos de riesgo están ocupados por personas cuya percepción del riesgo es diferente que la de la población normal (son más osados y temen menos a la muerte). Están aceptando voluntariamente un riesgo y la disponibilidad a aceptar



compensación por un riesgo voluntario es muy inferior a la de un riesgo involuntario como sería el caso de la exposición a contaminación. Todas estas razones conducen a que estos valores de disponibilidad a aceptar compensación sean estimaciones por defecto del valor de la vida.

- ▣ Estudios de Valoración Contingente en donde a los individuos se les pregunta por su Disponibilidad a pagar por medidas que reducen el riesgo de muerte en ciertas actividades o por la Disponibilidad a aceptar compensación por medidas que aumentan el riesgo de muerte. La crítica fundamental de este método es que las preguntas son hipotéticas y que los individuos no están familiarizados con los conceptos de riesgo planteados. Los valores obtenidos son normalmente demasiado altos.
- ▣ Estudios basados en gastos reales de las personas en artículos o dispositivos que reducen el riesgo de muerte como por ejemplo los airbags de los coches. Los valores obtenidos con este método son los más bajos.

Lo que se hace es tomar un valor intermedio entre los tres que resulta ser, actualizado al año 2000, de 3.3 millones de EUROS (alrededor de 550 millones de pesetas)

El uso del Valor de la Vida estadística para la valoración de la mortalidad debida a exposición a contaminantes ha tenido numerosas críticas. Estas críticas están relacionadas con el hecho de que muchos casos de muerte debido a contaminación son personas cuya esperanza de vida era muy reducida y que hubieran muerto por cualquier otra causa poco tiempo después (ancianos o personas con mala salud). Para evitar esta crítica se introduce el concepto de *Años de Vida Perdidos* que se aplica a los casos en que las muertes ocurren tras un periodo de latencia o cuando la probabilidad de supervivencia de los individuos está reducida, dejando el Valor de la Vida Estadística para los accidentes mortales y otros casos en que la muerte es repentina. El Valor de los Años de Vida Perdidos es especialmente apropiado para la mortalidad debida a exposición a contaminación atmosférica. Para efectos agudos la pérdida de años de vida se estima en 9 meses y para efectos crónicos en 5 años. Utilizando el Valor de la Vida Estadística se estima el valor de los Años de Vida Perdidos para mortalidad aguda y crónica que son diferentes ya que el período de latencia y de supervivencia después de la enfermedad son diferentes. Los valores obtenidos para diferentes tasas de descuento son los siguientes:

**Tabla 3** Valor monetario de los efectos sobre mortalidad

	Tasa de descuento	Valor de los años de vida perdidos (EURO)
Mortalidad aguda	0%	104760
	3%	165700
	10%	333530
Mortalidad crónica	0%	104760
	3%	96500
	10%	90700




---

Valor de la vida estadística	3313900
------------------------------	---------

---

### 11.2.2 Enfermedades

La valoración económica de las enfermedades se realiza igualmente estimando la Disponibilidad a pagar por evitar padecer una enfermedad. Esta disponibilidad a pagar tiene varios aspectos:

- ▣ El valor del tiempo perdido a causa de la enfermedad (medido por el sueldo pagado o por el coste de oportunidad del tiempo de ocio)
- ▣ El valor de la utilidad perdida debido al dolor y al sufrimiento (solo medible mediante estudios de valoración contingente)
- ▣ El coste de cualquier medida tendente a evitar o mitigar los efectos de la enfermedad (gastos médicos)

Se han realizado en Europa algunos estudios de valoración contingente que determinan la disponibilidad a pagar de los individuos para evitar sufrir determinadas enfermedades y estos estudios sirven de base para la valoración monetaria que propone la metodología ExternE. Los valores monetarios usados se muestran en la tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Existen asimismo valoraciones de la disponibilidad a pagar para evitar accidentes no mortales.

## 12 Impactos de las emisiones de radionucleidos

La generación eléctrica en una central nuclear tiene como cargas asociadas las emisiones rutinarias de radionucleidos al aire y al medio acuático así como la producción de residuos radioactivos que tienen efectos demostrados sobre la salud humana en cuanto incrementan el riesgo de cánceres y efectos hereditarios severos. La metodología ExternE (EC, 1995 b) utiliza para evaluar estos impactos, la metodología existente de evaluación de dosis radiológicas. La evaluación se realiza de forma independiente para cada uno de los radionucleidos emitidos dependiendo de las cantidades emitidas y las diferentes vías de exposición.

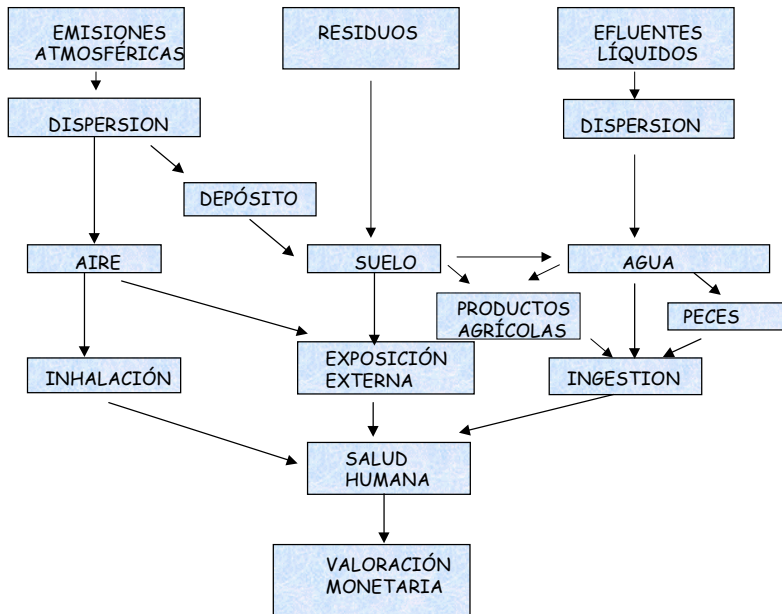
La base del cálculo de los impactos es la obtención de la dosis colectiva total calculada sumando las dosis colectivas producida por cada uno de los radionucleidos emitidos y obtenida a partir de las dosis individuales.

### 12.1 Ruta de impacto

En la siguiente figura se muestra la ruta de impacto de las diferentes fuentes de emisiones radiológicas que se consideran: emisiones atmosféricas, efluentes líquidos y residuos. Las vías de impacto más importantes son las siguientes:

- Inhalación y exposición externa a los radionucleidos presentes en el aire
- Exposición externa a la radiación depositada en el suelo
- Ingestión de alimentos contaminados debidos a la radiación depositada en el suelo.





**Figura 9.** Ruta de impacto para las emisiones de radionucleidos

La dispersión de los radionucleidos en el medio se estima utilizando modelos de simulación atmosféricos e hidrológicos obteniendo de esta forma las concentraciones de los distintos radionucleidos en el aire, en el agua y en el suelo en las áreas local y regional. Existen sin embargo algunos radionucleidos que se dispersan globalmente en la atmósfera y los océanos, como es el caso del H-3, el C-14, el K-85 y el I-129, y en estos caso se usan modelos de caja de dispersión a escala global.

Las dosis de inhalación se producen al respirar dentro de la nube radioactiva y se estiman utilizando la cantidad de aire inhalada por un adulto medio, y factores de conversión a dosis por inhalación específicos de cada radionucleido.

La exposición externa se produce por inmersión en la nube y por exposición a la actividad depositada en el suelo. La exposición a la nube se produce en el momento en que ésta pasa por cada lugar mientras que la exposición a la actividad depositada continua por un tiempo que dependerá de la vida media de cada radionucleido y de la velocidad de migración del mismo fuera de la superficie del suelo. Se usan factores de conversión a dosis específicos de cada radionucleido para estimar las dosis por esta vía de exposición.

La ingestión de productos agrícolas contaminados se produce por un depósito directo en la vegetación y por la absorción por parte de los cultivos de radionucleidos a través de las raíces. Se utilizan para ello diferentes factores de transferencia que relacionan la actividad depositada y la concentración en los diferentes productos. Los productos agrícolas se pueden consumir directamente por la gente o bien a través de animales que nos dan leche y carne. Las dosis recibidas se calculan teniendo en cuenta las diferentes técnicas de preparación de los alimentos y el tiempo que transcurre entre la cosecha y el



consumo. Se tiene en cuenta asimismo los hábitos de consumo de la zona considerada. Se considera además que toda la producción se consume localmente y sólo los excedentes se consumen en otras áreas. La ingestión de agua contaminada es asimismo tenida en cuenta así como el consumo de peces y mariscos.

En cuanto a los residuos depositados en los repositorios, se considera que con el tiempo las barreras de contención pueden fallar y se produciría una contaminación de aguas subterráneas que podrían ser captadas para consumo humano o para riego. Se utilizan modelos que simulan los escapes producidos en los repositorios y el transporte geológico de los mismos.

## 12.2 Funciones dosis respuesta

La relación entre la dosis recibida y el número esperado de efectos radiológicos se estima utilizando los factores recomendados por el ICRP (1991) y aceptados en el ámbito internacional. Estos factores son los siguientes:

**Tabla 4** Factores de riesgo de ocurrencia de efectos sobre la salud

Población	Ocurrencia (por man.Sv)		
	Cáncer mortal	Cáncer no mortal*	Efectos hereditarios severos
Público	0.05	0.12	0.01
Trabajadores	0.04	0.12	0.006

\*Valores redondeados

## 12.3 Valoración monetaria

### 12.3.1 Cáncer no mortal

La metodología ExternE utiliza un valor monetario de 481,050 EUROS. Este valor se añade al valor de un cáncer mortal para reflejar el coste del dolor y el sufrimiento padecido.

### 12.3.2 Efectos hereditarios severos

Se asume que si este efecto ocurre dará lugar a la muerte inmediata o bien a una calidad de vida muy restringida. Por esta razón parece apropiado usar como valor monetario el *Valor de la Vida Estadística* de 3,313,900 EURO. Debido a que estos efectos se producirán durante varias generaciones después de la exposición, se tomará un valor multiplicado por 0.114 por la tasa de descuento del 3% y por 0.015 para la tasa de descuento del 10%.

### 12.3.3 Cáncer mortal

Se toma el valor medio de los *Años de Vida Perdidos* de varios tipos de cánceres y se le añade el valor de 481,050 EURO que refleja el coste de la enfermedad.

**Tabla 5** Valor monetario de los *Años de Vida Perdidos* de varios tipos de cánceres

	Leukaemia	Lung cancer	Stomach cancer
Latencia(años)	8	15	15
Media estimada de Años de Vida Perdidos (YOLL)	22	16	15
Valor monetario (VLYL)			
DR: 0%	2,790,090	2,159,380	2,052,480
DR: 3%	2,415,940	1,635,570	1,539,360
DR: 10%	1,742,470	930,030	876,580

En la tabla siguiente se muestran los valores monetarios usados para los diferentes efectos radiológicos considerados y las diferentes tasas de descuento.

**Tabla 6** Resumen de los valores monetarios usados

	DR 0%	DR 3%	DR10%
Cáncer no mortal	481,050	481,050	481,050
Efecto hereditario	3,313,900	377,785	49,709
Cáncer mortal	2,333,983	1,863,623	1,183,027
Valores por man.Sv			
Público	207,564	154,685	117,374
Trabajadores	170,969	134,538	105,345

### 13 Impacto de las emisiones atmosféricas sobre los materiales.

Los contaminantes atmosféricos emitidos por las actividades de combustión tienen serios impactos sobre los edificios. Estos efectos incluyen decoloración, pérdida de fuerza mecánica, agrietamiento y fallo de las cubiertas protectoras debido a la degradación de los materiales. Es también muy evidente el fenómeno de ensuciado de edificios por deposición de partículas en ellos.

Se ha desarrollado funciones dosis-respuesta para diversos tipos de materiales que se usan normalmente en los edificios. Estas funciones dosis-respuesta relacionan la cantidad de contaminación con el grado de corrosión del material. Para poder ser capaces de estimar los costes originados por esta corrosión de los materiales se necesita una función de daño que relacione el grado de corrosión del material con el tiempo de reposición o mantenimiento de este material. El momento en que se considera necesario proceder al reposición o mantenimiento del material corroído se determina considerando un nivel crítico de corrosión.



En la metodología ExternE (EC, 1999a) se han desarrollado funciones dosis-respuesta que expresan la frecuencia de mantenimiento en función de un daño crítico y unos parámetros de contaminación.

La valoración de los daños sobre materiales es compleja debido a que depende mucho del material y del significado cultural del objeto en cuestión. Normalmente se usan para valorar los costes de reposición y mantenimiento de los materiales. Para los edificios de valor cultural como catedrales, la estimación de los daños es más compleja. En estos casos se deberían tener en cuenta el valor recreativo y de existencia. Los meros costes de reposición no capturan todo el coste de, por ejemplo, la pérdida de unos relieves en una catedral. Estos costes sin embargo son muy dependientes del valor del propio edificio y de la forma en que se puede reparar. Otro problema añadido es la determinación del “stock at risk”, es decir, la cantidad de materiales expuestos a los daños.

### **13.1 Degradación de los materiales de construcción**

La corrosión es un fenómeno que se produce incluso en la ausencia de contaminación por lo que se trata de cuantificar el grado en que las situaciones con contaminación aceleran la corrosión natural de los materiales. El azufre y los compuesto nitrogenados incluyendo los contaminantes secundarios como sulfatos, nitratos y ozono y las partículas son los agentes corrosivos más importantes dentro de los contaminantes atmosféricos. Estos compuestos actúan tanto sobre materiales metálicos como no metálicos.

#### *13.1.1 Mecanismo de los daños*

Se reconocen dos tipos de procesos de deposición que afectan a los contaminantes: deposición seca y deposición húmeda. La deposición húmeda se refiere a la precipitación mientras que la deposición seca se refiere al resto de los procesos, incluyendo la deposición en fase gaseosa y la deposición de partículas. Las velocidades de deposición dependen de varios parámetros climáticos que son así importantes en los procesos de degradación.

##### *13.1.1.1 Efectos climáticos*

El viento y el agua pueden causar erosión y las fluctuaciones de temperatura pueden resultar en ciclos de congelación descongelación. La expansión que sufre el volumen de agua la volverse hielo produce un estrés significativo en los materiales porosos. La radiación solar puede también ser un factor directo en la degradación sobre todo de polímeros.

El fenómeno de deposición seca de los contaminantes está influenciado de manera importante por la temperatura y la humedad relativa dado que son los factores que determinan la presencia de humedad en caso de ausencia de lluvia. El concepto de tiempo de humedad TOW (time of wetness) se usa frecuentemente y se refiere al tiempo en que existe una lámina de agua sobre los materiales que es el tiempo durante el que se produce el fenómeno de corrosión. Así, el proceso de degradación puede considerarse discontinuo ocurriendo solamente cuando la superficie está suficientemente húmeda.



### ***13.1.1.2 Efectos de la deposición seca***

La deposición seca se refiere al proceso por el cual las partículas y los gases son transferidos desde la atmósfera a la superficie del material. La velocidad de depósito depende no solo de las condiciones de la atmósfera sino también del espesor de la capa de humedad, la reactividad del material y las propiedades de los productos de corrosión. EL  $\text{SO}_2$  es uno de los agentes corrosivos más importantes. Se disuelve en la capa de humedad formando sulfito y posteriormente sulfato. Esto produce una acidificación de la capa de humedad que aumenta el proceso de corrosión. La velocidad de depósito depende del material y varía entre 0.01 y 2 cm/s.

El  $\text{SO}_2$  puede también ser oxidado en la atmósfera y contribuir a la acidez de la deposición húmeda.

El papel de los óxidos de N en los procesos de degradación no está todavía muy claro. El N se emite normalmente como NO, formándose posteriormente  $\text{NO}_2$  y  $\text{HNO}_3$  que puede formar nitratos con  $\text{NH}_3$ . El  $\text{NO}_2$  es mucho menos dañino para los materiales que el  $\text{SO}_2$  aunque puede contribuir igualmente a la acidificación de la precipitación.

El ozono tiene un papel preponderante en la degradación de las gomas y en general de todos los materiales orgánicos que contengan enlaces dobles de C como por ejemplo las superficies pintadas, los polímeros y los productos textiles. Es también un oxidante general y tiene un efecto sinérgico con el  $\text{SO}_2$  como el  $\text{NO}_2$ .

Las partículas formadas por nitratos y sulfatos amónicos tienen un papel importante en la corrosión debido a su capacidad para aumentar el TOW por sus propiedades higroscópicas.

### ***13.1.1.3 Efectos de la deposición húmeda***

La deposición húmeda puede ser dañina o beneficiosa dependiendo de las condiciones. Por una parte, la deposición húmeda transporta compuestos químicos activos presentes en la lluvia hasta la superficie del material e incrementa así la corrosividad de la capa de humedad. Por otro lado sirve para lavar de la superficie los compuestos químicos antes depositados con lo que tiene el efecto opuesto. Cuando la acidez de la lluvia es alta, los efectos negativos dominan.

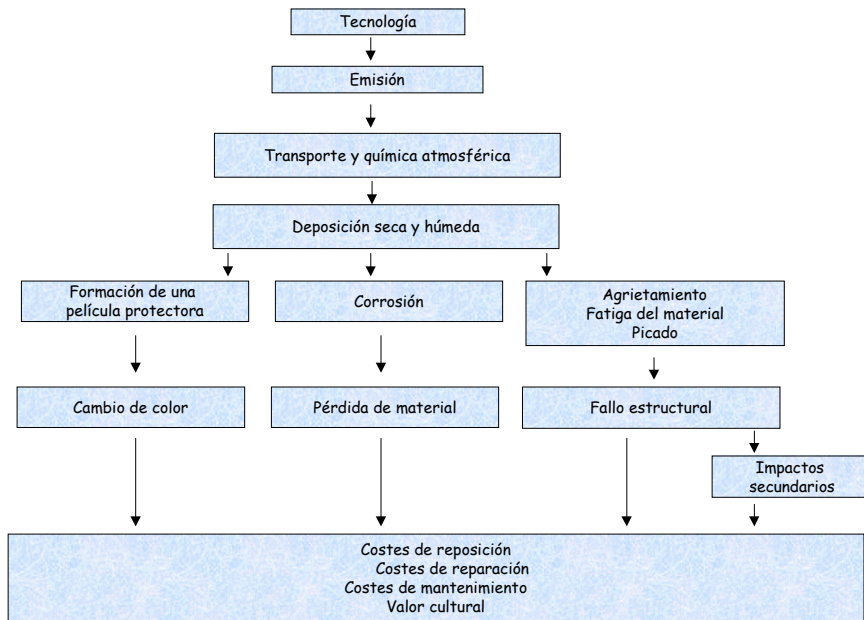
## ***13.2 Rutas de impacto***

Se han descrito, dentro de la metodología varias rutas de impacto que describen los efectos de la deposición ácida y los fotooxidantes sobre diferentes materiales. Los impactos producidos caen dentro de las siguientes categorías:

- Decoloración
- Pérdida de material
- Fallo estructural

No existen en la actualidad estudios que permitan la valoración de los daños por decoloración, aunque es probable que estos daños sean pequeños. Los daños por fallos estructurales son bastante improbables a excepción de que la estructura del edificio sea defectuosa o que en el edificio no se haya realizado ningún tipo de mantenimiento. Por tanto lo que se analiza dentro de la metodología son los efectos de la corrosión.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una ruta de impacto que describe los efectos de la deposición ácida en los metales.



**Figura 10.** Ruta de impacto para los efectos de la deposición ácida sobre los metales

Los materiales para los que se consideran daños son los siguientes:

- Materiales pétreos
- Hormigón
- Metales
- pinturas

### 13.3 Funciones dosis-respuesta

Se han desarrollado varias funciones dosis-respuesta para numerosos materiales a partir de estudios de exposición de los materiales a diferentes condiciones. Estas funciones expresan la frecuencia de reposición o mantenimiento en función de los valores de concentración de contaminantes y los parámetros ambientales relevantes en cada caso y un daño crítico o espesor crítico que refleja la pérdida de material alcanzada la cual el mantenimiento es necesario o deseable. Un ejemplo, para la corrosión de la caliza por efecto del SO<sub>2</sub>:

$$1/t = ( 2.7[\text{SO}_2]^{0.48} e^{-0.018T} + 0.019P [\text{H}^+]/R )^{1/0.96}$$

siendo : t el tiempo en años, [SO<sub>2</sub>] la concentración de SO<sub>2</sub>, P la cantidad de precipitación en mm [H<sup>+</sup>] la concentración de acidez en la lluvia y R el espesor crítico en micras.



### 13.4 Stock at risk

La cantidad de materiales de cada tipo expuestos a los efectos de la corrosión se obtiene de datos estadísticos sobre número de edificios y materiales de construcción. Los datos sobre número de edificios existen normalmente a nivel municipal en las estadísticas de vivienda y edificios. Los datos sobre tipo de materiales son más difíciles de conseguir y existen únicamente para edificios de nueva construcción.

Dentro de *Ecosense* existe una base de datos para toda Europa compilada utilizando en lo posible los datos de cada país y utilizando extrapolaciones para el resto de los casos.

### 13.5 Cuantificación de los impactos en materiales

Para estimar los daños sobre los materiales de construcción necesitamos una estimación de la frecuencia de reposición o mantenimiento necesaria en cada caso. Esta estimación se realiza a partir de los datos de corrosión utilizando estimaciones de ingeniería o bien datos de comportamiento real en la práctica del mantenimiento de edificios. Así se estima un espesor crítico de pérdida de material alcanzado el cual se debe proceder a la reposición o a efectuar un mantenimiento. Estos espesores críticos son los siguientes:

**Tabla 7.** Espesores críticos

Material	Espesor crítico
Piedra natural	4 mm
Enfoscado	4 mm
Mortero	4 mm
Zinc	50 $\mu\text{m}$
Acero	50 $\mu\text{m}$
Pintura	50 $\mu\text{m}$

### 13.6 Valoración monetaria

La valoración de los impactos se debería realizar, de acuerdo con la metodología, utilizando la disponibilidad a pagar para evitar el daño. Sin embargo, no existen evaluaciones de este tipo por lo que se usan los costes de reparación o sustitución como aproximación del daño económico.

A la hora de determinar estos costes un aspecto importante son las diferencias de comportamiento entre los individuos. Algunas personas dejarán que la degradación continúe más allá del momento en que se debería hacer el mantenimiento por lo que al final se enfrentará con costes de reparación mucho mayores al darse mecanismos de degradación secundarios que podrían incluso afectar a la integridad estructural de la propiedad. Otras personas sin embargo actuarán antes de lo económicamente ideal. La cuantificación de cuantos casos habrá de cada tipo no es posible aunque es probable que haya más del primer tipo. Si los propietarios de los edificios se comportan de una forma económica los costes de reparación serán menores o iguales que los daños y por tanto una estimación por defecto de las externalidades producidas.



Las estimaciones de los daños se han tomado de diferentes fuentes europeas y los valores usados son los siguientes:

**Tabla 8** Estimación valor monetario de daños en diferentes materiales

Material	EURO/m <sup>2</sup>
Piedra natural	280
Enfoscado	30
Mortero	30
Zinc	25
Acero	30
Pintura	13

Para obtener el valor de la externalidad se multiplica el valor de la frecuencia de reposición o mantenimiento de cada material por la superficie de cada material en cada celda del dominio considerado y por los costes unitarios dados en la tabla anterior.

## 14 Impacto de las emisiones atmosféricas sobre la agricultura

El impacto principal que producen los distintos ciclos de generación eléctrica sobre la agricultura se debe a las emisiones de contaminantes atmosféricos. De estos contaminantes, los más importantes son los ácidos, como el SO<sub>2</sub>, los oxidantes fotoquímicos, como el O<sub>3</sub> y los nitratos de peroxiacetilo (PAN) (que suelen estar presentes a bajas concentraciones), los NO<sub>x</sub>, con carácter tanto ácido como de precursores fotoquímicos, y el CO<sub>2</sub>, este último por sus consecuencias sobre el clima global. Un estudio realizado en EEUU (NAPAP, 1991) estableció la importancia relativa de los contaminantes regionales para la agricultura, por este orden (que puede ser válido también para nuestro país):

O<sub>3</sub> > SO<sub>2</sub> > deposición ácida > NO<sub>x</sub>

El efecto del CO<sub>2</sub> está sujeto a mayores incertidumbres, aunque sus consecuencias pueden ser muy importantes.

Para las partículas no está bien definido el posible efecto que puedan tener sobre los cultivos (EPA, 1982). Se han observado algunos efectos, tales como la oclusión de estomas por las partículas, o la absorción de iones. Sin embargo, estos efectos son sólo relevantes en el caso de cercanía a grandes fuentes de emisión (cementeras, p.ej.). Los metales pesados en forma de partícula también pueden afectar a los cultivos, tanto a través de los estomas como a través de las raíces.

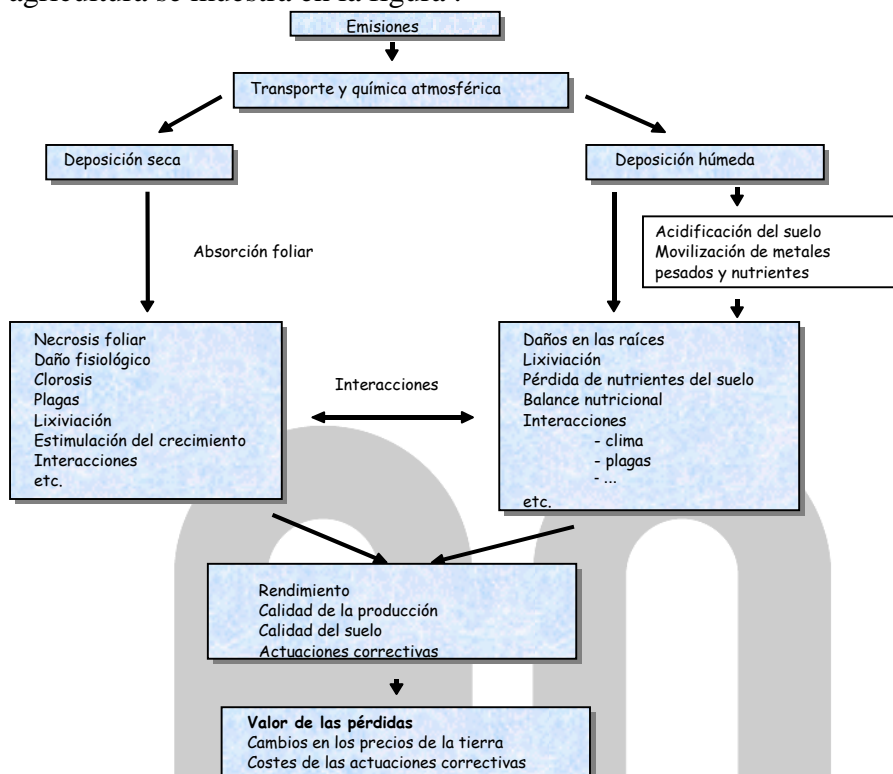
En las áreas rurales, pueden aparecer concentraciones elevadas de SO<sub>2</sub>, aunque los períodos de exposición suelen ser breves. Las concentraciones de O<sub>3</sub> están influidas por la luz solar, por lo que las más elevadas suelen presentarse en primavera y verano, sobre el mediodía.

A continuación se expone el método general de valoración aunque hay que tener en cuenta que en el caso particular de la biomasa los daños debidos a SO<sub>2</sub> no van a producirse.

El método propuesto para la evaluación es el de *la función de daño*, que consiste en seguir una serie de etapas desde la actividad que genera el daño, hasta la



cuantificación de éste. Esto se ilustra en la llamada *ruta de impacto*, cuya aplicación a la agricultura se muestra en la figura .



**Figura 11** Ruta de impacto de los contaminantes atmosféricos en los cultivos

La deposición húmeda se suele considerar poco importante, ya que los ecosistemas agrícolas, especialmente el suelo, están siendo continuamente manipulados por el hombre, que con sus actuaciones (enmiendas, fertilización) contrarresta los efectos de esta deposición de forma casi inadvertida (no como sucede, por ejemplo, con los ecosistemas naturales, en los que esta deposición puede tener gran importancia).

La deposición seca tiene efectos más graves, ya que los vegetales son los seres vivos más sensibles a la contaminación atmosférica de origen gaseoso (Guderian, 1985). Estos productos penetran en las plantas por los estomas, participando en reacciones químicas que pueden dar lugar incluso a compuestos más fitotóxicos que los originales.

Los efectos que se pueden producir pueden ser agudos (necrosis que impidan el funcionamiento de los órganos del vegetal), crónicos (clorosis que reduzcan la actividad, pero no la anulen), o no visibles (p.ej., reducción de la conductividad estomática o la fotosíntesis). Las plantas pueden defenderse de estos efectos mediante mecanismos de detoxificación. Pero no hay que olvidar que estos mecanismos funcionan a base de las reservas del vegetal, por lo que éste siempre resulta afectado.

Los daños que producen los contaminantes atmosféricos pueden ser muy variados, como se verá posteriormente. Esto se ve complicado por la participación de muchos otros factores, además de la dosis recibida:



- **abióticos:** humedad relativa, temperatura, estado nutricional, presencia de otros contaminantes, etc.
- **bióticos:** presencia de plagas y agentes patógenos.
- **genéticos:** puede haber variedades más resistentes que otras.
- **edad:** dependiendo del contaminante, son las hojas más recientemente formadas o las más nuevas las que presentan daños. Las plantas perennes tienen un mayor riesgo de sufrir daños por contaminación a largo plazo, aunque, por otra parte, tienen mayores oportunidades de recuperación.
- **estado fenológico:** en determinados estadios, las plantas son más sensibles a la contaminación atmosférica.

Además de esto, hay interrelaciones con el resto del ecosistema, ya que unas especies pueden desplazar a otras, o se puede ver reducida la variabilidad genética de una población. Hay que recordar el papel de los vegetales como primeros eslabones de la cadena trófica.

Todas estas interrelaciones entre los factores hacen que sea muy complicado evaluar los efectos de la contaminación en los cultivos.

Una primera medida para determinar el grado de afección de los cultivos es comparar con el nivel crítico. El término “Nivel Crítico” se define como la concentración de un contaminante en la atmósfera por encima de la cual pueden producirse efectos adversos sobre receptores. Se han definido niveles críticos para SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, deposición húmeda de acidez y ozono. Sin embargo, los niveles críticos sólo dan una visión cualitativa y no cuantitativa de los daños. La cuantificación de los daños se suele realizar utilizando funciones dosis-respuesta que relacionan la dosis recibida de un contaminante con los efectos que se producen en el rendimiento o la calidad del cultivo y que se obtienen de estudios experimentales en condiciones controladas o semicontroladas.

#### **14.1 Efectos del dióxido de azufre sobre los cultivos**

Si bien el SO<sub>2</sub> se considera siempre como un contaminante, hay que recordar que el azufre es esencial para las plantas. Los suelos agrícolas contienen habitualmente entre un 0,01 y un 0,05% de azufre, que es absorbido por las raíces en forma de sulfato. Las necesidades de las plantas suelen ser de 10 a 40 kg de S por ha y año. Este azufre interviene en la síntesis de proteínas por el vegetal.

Esto hace que, con concentraciones relativamente elevadas de SO<sub>2</sub>, algunos cultivos aumenten su rendimiento, debido a su efecto fertilizante (Murray and Wilson, 1989). También se deduce de esto que aquellas especies cuya tasa de síntesis de proteína sea baja (como las arbóreas) se verán más afectadas por una alta concentración de SO<sub>2</sub>. Este efecto parece ser mayor en invierno, cuando la baja iluminación y crecimiento limitan la capacidad de detoxificación de la planta (Davies, 1980).

El SO<sub>2</sub> puede actuar sobre los cultivos por dos vías: la deposición húmeda, y la deposición seca. La primera de ellas suele ocasionar efectos indirectos, como es el cambio en las condiciones de acidez del suelo. Este cambio a su vez tiene consecuencias sobre la movilidad de los cationes pesados en el suelo, algunos de los cuales pueden ser muy tóxicos, como el aluminio. Sin embargo, los agricultores



combaten tradicionalmente esta acidez con la aplicación de enmiendas al suelo. Se ha calculado (EC, 1995) que el incremento en las cantidades aplicadas para contrarrestar los efectos de la deposición ácida es despreciable, pudiendo muy bien incluirse en el margen de error de la aplicación.

En cuanto a la deposición seca, es decir, la absorción del  $\text{SO}_2$  por los estomas de la planta, puede producir distintas consecuencias.

El  $\text{SO}_2$  que penetra por los estomas es oxidado a sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), altamente tóxico, y después a sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), menos tóxico. A bajas concentraciones, el exceso de  $\text{SO}_2$  puede ser acumulado por la planta en forma de sulfato, sin que se presenten daños. Sin embargo, y condicionado también por otros factores bióticos y abióticos, este  $\text{SO}_2$  puede producir daños cuando las concentraciones son altas. Estos daños podrán ser reparados por la planta o no, pero en cualquier caso se producirán disminuciones en el rendimiento del cultivo.

Los daños son muy distintos, y difíciles de extrapolar, por las interacciones con otros factores. Además, no hay ningún indicador específico del estrés producido por el  $\text{SO}_2$ , ya que hay otros que pueden presentar síntomas similares. El síntoma más común, para el daño agudo por  $\text{SO}_2$ , es la necrosis blanquecina o parda localizada predominantemente en zonas intercostales (“efecto cola de pescado”), aunque a veces pueden aparecer en el ápice o en los márgenes del limbo. En el caso de las plantas monocotiledóneas, el daño típico inducido por el contaminante es una necrosis blanquecina que comienza en el ápice foliar y se extiende por la hoja (Halbwachs, (1984), Manning y Feder (1980)). El síntoma característico del daño crónico por  $\text{SO}_2$  es la clorosis internervial. Posteriormente, las hojas van adquiriendo una coloración blanquecina que pasa a rojiza cuando los daños son severos.

Otro efecto es la erosión de las ceras epicuticulares, con lo que disminuye la resistencia cuticular al vapor de agua, aumentando la permeabilidad (y con ello el riesgo de estrés hídrico).

El  $\text{SO}_2$  en altas concentraciones también puede reducir la conductancia estomática, al dañar las células guarda. Ello produce una reducción en la fijación de  $\text{CO}_2$ . Aumenta la cantidad de azúcares solubles, y se reduce el contenido de almidón y carbohidratos no estructurales.

## **14.2 Efectos del ozono**

El ozono debe su toxicidad para los cultivos a su carácter oxidante y a su contribución a la formación de radicales libres.

En presencia de los precursores necesarios (hidrocarburos y Noxs) en la atmósfera, una alta irradiación solar favorece la formación de ozono troposférico. Este ozono es absorbido por las plantas a través de los estomas. Una vez en la planta, se descompone aumentando la cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e ion hidroxilo que son dañinos para la célula. Al ser esta la vía de entrada del ozono en la planta, aquellas condiciones que reduzcan la transpiración como la sequedad del terreno limitan el efecto del contaminante. Una alta humedad relativa, favorecerá la absorción del  $\text{O}_3$ .

Los mayores daños se producen en habitualmente en primavera y verano cuando la irradiación es mayor. Esto coincide en la zona mediterránea con un período de



crecimiento de los cultivos hortícolas que además de ser muy sensibles son los de mayor valor económico.

El síntoma más común de daños de ozono es la aparición de manchas bronceadas distribuidas entre los nervios que evolucionan progresivamente a partir de las hojas más antiguas y más expuestas a la luz. En general, la capacidad fotosintética se ve reducida y se alteran los patrones de distribución de carbono a favor de los brotes y a expensas de la raíz. A su vez, esta reducción de las reservas de las raíces puede aumentar la sensibilidad del cultivo a las heladas, al calor y al estrés hídrico. Otro de los efectos es la aceleración de la senescencia. En algunas especies se ha comprobado la reducción del número de flores frutos y semillas. Como efectos asociados se favorece la extensión de distintas plagas y enfermedades.

### **14.3 Efectos de los óxidos de nitrógeno**

La vía principal de impacto de los óxidos de nitrógeno es la precipitación ácida que no reviste una gran importancia. Sin embargo, los óxidos de nitrógeno tienen una gran relevancia por su papel como precursores de la formación de ozono.

Los óxidos de nitrógeno entran por los estomas y forman nitratos y nitritos. El NO es menos soluble en agua que el NO<sub>2</sub> por lo que se absorbe en menor cantidad y es menos fitotóxico. Los nitratos y nitritos se pueden reducir a amoníaco, mediante la nitrato reductasa y la nitrito reductasa, siendo así incorporados a los compuestos orgánicos. Si se absorbe más Nox del que se puede asimilar por este proceso se producen daños agudos en forma de necrosis.

Al igual que ocurre con el SO<sub>2</sub>, los óxidos de nitrógeno pueden tener efectos beneficiosos por su poder fertilizante o perjudiciales. En general estos efectos se consideran poco importantes aunque pueden ser más graves en caso de interacciones con ozono y SO<sub>2</sub>. También como para el SO<sub>2</sub> parece que los efectos son mayores en condiciones de baja iluminación y baja temperatura.

Se han observado efectos fertilizantes en leguminosas, mientras que en girasol o tabaco en cambio se han observado daños. Pueden aparecer clorosis inespecíficas y caída prematura de las hojas. También puede causar reducciones de crecimiento y reducciones de la fotosíntesis neta.

No se han desarrollado funciones dosis-respuesta para este contaminante.

### **14.4 Acido Fluorhídrico**

Este contaminante es el que se considera como más fitotóxico de los contaminantes primarios. Se han comprobado reducciones significativas de crecimiento y rendimiento del cultivo incluso a dosis bajas al ser absorbido rápidamente por las plantas. Se han observado daños como clorosis y necrosis en la punta de las hojas que se extiende hasta los márgenes y la base. Se han desarrollado algunas funciones dosis respuesta para este contaminante.



### **14.5 Nitratos de peroxiacilo**

Los daños causados por los PAN suelen observarse en el ápice de las hojas más jóvenes y en la base de las hojas más viejas. Estos daños son más frecuentes en el caso de altas temperaturas.

Los síntomas son variados y pueden confundirse con los de otros impactos. Se pueden encontrar manchas oscuras en el envés, en palntas de hoaj ancha o bandas cloróticas en las hojas en plantas de hoja estrecha.

### **14.6 Interacciones entre contaminantes**

Además de las interacciones con otros factores como el clima, el suelo, las plagas, y los patógenos, los distintos contaminantes pueden interactuar entre si alterando la respuesta de los cultivos.

Estas respuestas pueden ser aditivas, sinérgicas o antagónicas. Con concentraciones bajas, la respuesta suele ser sinérgica, en cambio cuando uno de los contaminantes está presente en concentraciones muy elevadas es éste el que determina el daño.

También en este caso hay diferencias entre especies. Así las plantas herbáceas tienden a mostrar respuestas aditivas o sinérgicas a las mezclas de SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. En general hay una reducción sinérgica de la fotosíntesis y del rendimiento.

El efecto de la mezcla de Nox y SO<sub>2</sub> es sinérgico ya que se reduce la capacidad de detoxificación de nitritos. También impide que se cierren los estomas lo que empeora la capacidad de retención de agua.

### **14.7 Cuantificación de los impactos**

La cuantificación de los impactos se realiza utilizando como hemos dicho funciones dosis-respuesta. Para ello es necesario en primer lugar disponer de las concentraciones existentes de los contaminantes en la zona. Estas concentraciones serán el resultado de sumar a la concentración existente anteriormente el incremento debido a la actividad considerada. Las concentraciones habituales pueden conseguirse en las redes de vigilancia atmosférica mientras que los incrementos se estiman mediante la utilización de modelos de dispersión atmosférica de los contaminantes.

Una vez conocida la concentración hay que determinar los receptores del daño. Para ello se obtienen las superficies de cada cultivo y multiplicando por el rendimiento del periodo considerado, las producciones habituales.

La aplicación directa de las funciones podría producir un error en la estimación, ya que los cultivos están sometidos en condiciones normales a un nivel de contaminación, con lo que el rendimiento utilizado ya incorpora un cierto efecto del contaminante. Para tener en cuenta este efecto, habrá que multiplicar el rendimiento en condiciones habituales por el ratio:

$$\frac{\text{Pérdida de rendimiento a niveles incrementados}}{\text{Pérdida de rendimiento a niveles habituales}}$$

Por tanto, la pérdida relativa de rendimiento se puede expresar como:



$$\Delta y = \frac{1 + y_i}{1 + y_n} - 1$$

donde

$y_i$ : variación de rendimiento para la concentración incrementada por las emisiones de la generación

$y_n$ : variación de rendimiento para la concentración

Por último, es necesario recordar que, debido al tipo de funciones dosis-respuesta utilizadas, esta estimación sólo incorpora los efectos directos de la contaminación en la pérdida de rendimiento, sin tener en cuenta las posibles interacciones con factores climáticos o edáficos, plagas, patógenos, u otros contaminantes.

Otro aspecto de gran importancia para los cultivos agrícolas, que no suele ser tenido en cuenta en la cuantificación de los impactos, es el impacto de los contaminantes en la fecha de maduración del cultivo, y la calidad del mismo. Sin que necesariamente haya pérdidas de rendimiento, la alteración de la calidad o de la fecha de maduración pueden causar importantes pérdidas económicas, por sus efectos en el mercado.

En este proceso de cuantificación aparecen gran número de incertidumbres, cuya repercusión en el resultado final es muy difícil de evaluar.

#### **14.8 Valoración monetaria**

La última etapa del análisis es la valoración económica de los efectos de los contaminantes. En este caso, como existe un mercado para estos bienes utilizaremos el precio de mercado. Esto puede hacerse si se hacen dos importantes supuestos:

- los precios no varían
- los comportamientos no cambian

La estabilidad de los precios sólo se puede defender si la variación de los rendimientos no es muy grande en relación a la producción total del mercado. En caso contrario, se produciría una variación de la oferta global y habría un nuevo precio de equilibrio en el mercado.

Asimismo, los agricultores pueden variar sus prácticas para reducir los efectos de la contaminación como utilizar variedades resistentes, cambiar la distribución de los cultivos o sustituir la calidad del aire por otros inputs como tierra, trabajo o agua. En general estos comportamientos correctores harán que las pérdidas económicas sean menores en relación a las pérdidas en rendimiento.

En cualquier caso, no parece probable que los efectos producidos por una actividad individual sean capaces de alterar los precios o los comportamientos por lo que la aproximación de utilizar los precios del mercado es válida.

Por otro lado, los precios de los mercados agrícolas casi nunca reflejan los costes reales por la existencia de subvenciones a la producción agrícola. Para estimar correctamente los costes externos y no sobrestimarlos habrá que utilizar los precios sombra de los productos. Se considera que una aproximación válida a estos precios sombra son los



precios de los mercados internacionales tomando la media de precios de un año para tener un valor representativo.

## **15 Efectos de las emisiones de CO<sub>2</sub> sobre el fenómeno del calentamiento global**

El cambio climático es producido por numerosos gases de efecto invernadero además del dióxido de carbono. El metano y el óxido nitroso también contribuyen directamente al efecto invernadero. Otros gases como los óxidos de nitrógeno emitidos en la estratosfera (aviones) y el SO<sub>2</sub> tienen influencia sobre las concentraciones de ozono (gas de invernadero) y de sulfatos en forma de aerosol (efecto enfriador a corto plazo al reflejar la radiación solar incidente) influenciando también el proceso en direcciones opuestas.

### **15.1 Impactos del cambio climático**

El cambio climático tiene un gran número de impactos siendo los más importantes la subida del nivel del mar, la aparición de fenómenos meteorológicos extremos, así como impactos en la salud humana, la agricultura, las reservas de agua y los ecosistemas.

En cuanto a los impactos sobre la salud, los impactos debidos al estrés de calor o de frío se verán influenciados en direcciones opuestas por lo que el efecto neto será probablemente pequeño. Las zonas donde se puedan desarrollar las enfermedades parasitarias y de vectores, especialmente la malaria, serán más grandes y los impactos podrían ser grandes. Otros impactos sobre la salud producidos indirectamente por otros impactos en la producción de comida, reservas de agua o subida del nivel del mar, son difíciles de estimar pero podrían ser grandes.

Los impactos agrícolas dependen de cambios regionales en la temperatura y precipitación así como niveles de dióxido de carbono. Se podría esperar que la producción agrícola aumentara debido al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y de la temperatura, pero el cambio en el patrón de precipitaciones podría contrarrestar estos beneficios en muchos lugares. Se usan modelos biofísicos para determinar las áreas donde pueden producirse cambios en cultivos y en rendimientos pero los cambios de rendimientos dependen de muchos factores entre los que se pueden mencionar los cambios adaptativos (nuevas variedades, riego, etc.) y las variaciones en la demanda.

En cuanto a la subida del nivel del mar, se estima que esta sea de 30 a 50 cm. Esto causaría inundaciones en zonas costeras afectando a actividades humanas de gran valor y a los ecosistemas costeros y requeriría una protección costosa. Otro aspecto del mismo problema sería la tendencia a la migración inducida por la pérdida de las tierras y su degradación.

Los impactos en los ecosistemas y la biodiversidad son complejos y difíciles de estimar. La mayoría de los principales tipos de ecosistemas se verán afectados. Sin embargo la valoración de las pérdidas es muy difícil y se basa en valoraciones de pérdidas de especies y de parajes concretos. Aun en estos casos, las valoraciones son difíciles de aplicar a un análisis marginal como el que se plantea aquí.



Fenómenos meteorológicos como olas de calor o de frío, sequías, inundaciones, tormentas y ciclones tropicales podrían verse afectados. La frecuencia y severidad de fenómenos extremos puede no ser dependiente linealmente del cambio del clima. Asimismo los daños producidos pueden variar dependiendo del sitio y del momento en que se produzcan estos fenómenos.

## 15.2 Valoración económica

Para la estimación de los daños marginales del CO<sub>2</sub> la metodología ExternE ha usado tres modelos:

- El modelo Open Framework for Economic Valuation of Climate Change
- Dos versiones del modelo Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND). La primera versión 1.6 refleja la visión de primera mitad de los 90 y enfatiza los impactos negativos del cambio climático. Desde entonces la visión de la literatura científica en cuanto a cambio climático ha cambiado sustancialmente encontrándose efectos positivos sobre por ejemplo el consumo de energía y la agricultura. Estos cambios de visión se reflejan en la versión 2.0.

Las estimaciones finales de la metodología en cuanto a daños marginales de gases de efecto invernadero se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 9 .** Daños marginales de los gases de efecto invernadero

EURO/t	Mínimo	Bajo	Estimación central	Alto	Maximo
CO <sub>2</sub>	0.1	1.4	2.4	4.1	16.4
N <sub>2</sub> O	24.3	440.2	748.3	1272.1	5242.1
CH <sub>4</sub>	1.9	28.2	44.9	71.5	257.0

## 16 Ruido

El ruido es un coste externo importante de las energías renovables, particularmente de los parques eólicos debido a que aunque producen incluso menos ruido que otros sistemas de conversión energética, en estos ciclos energéticos no existen otros impactos importantes y puede que los lugares en que estos impactos de ruido se producen sean más sensibles

El nivel de ruido se mide en decibelios dB, definido en función de la presión del sonido en Pa de la siguiente forma:

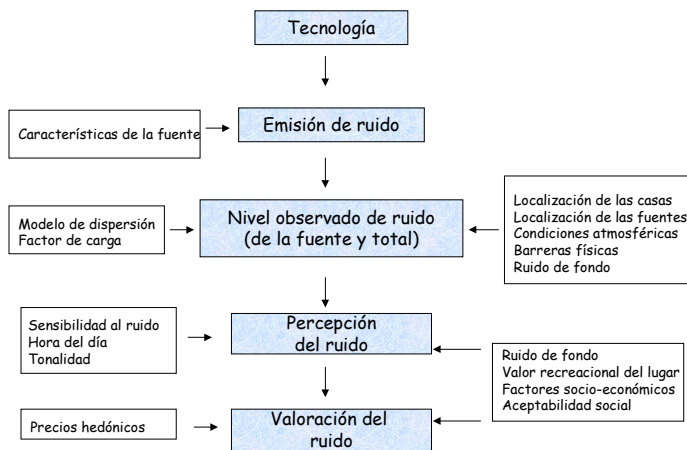
$$\text{Nivel de ruido} = 20 \log (\text{presion de sonido}/20 \mu\text{Pa})$$

La sensibilidad al ruido no es igual a todas las frecuencias, siendo el oído humano más sensible en un rango intermedio de frecuencias. Por ello se utilizan escalas de dB ponderadas que dan más peso a estas frecuencias intermedias. La escala usada aquí es la escala A, que se denota como dB(A)

### 16.1 Ruta de impacto

En la siguiente figura se muestra la ruta de impacto utilizada para evaluar los impactos del ruido.





**Figura 12. Ruta de impacto para el ruido**

### 16.1.1 Emisiones de sonido

Lo que es necesario saber respecto a las emisiones de ruido para evaluar las externalidades producidas es lo siguiente:

- Magnitud de las emisiones de sonido en dB(A)
- Variaciones del ruido según la hora del día
- Análisis de la tonalidad del ruido
- Análisis de la intermitencia

### 16.1.2 Propagación del sonido y nivel observado de ruido

La forma más simplista es considerar que el ruido se propaga por la atmósfera sin atenuación ni obstrucción. Existen además numerosos modelos de propagación en los que se incluyen otros factores como la atenuación por el aire, la absorción por el terreno, el viento y otras condiciones meteorológicas y la existencia de barreras. El efecto de todos estos factores puede ser muy importante. Así, el terreno, en particular si es blando, puede absorber gran cantidad de sonido y reducir los niveles de ruido. El efecto del viento y de los gradientes de temperatura es refractar el sonido y el efecto puede ser aumentar o disminuir los niveles de ruido dependiendo de las condiciones. Las barreras acústicas reducen sensiblemente los niveles de ruido.

El nivel observado de ruido se obtiene sumando el nivel de ruido proveniente de la fuente más el ruido de fondo existente.

### 16.1.3 Percepción del nivel de ruido observado

Los niveles de ruido observado calculados anteriormente son medidas objetivas del ruido que los individuos oirán. Sin embargo estos niveles no son necesariamente buenos indicadores del ruido que percibirá la gente, el cambio en confort que experimentarán y el valor que darán a esos cambios.



La escala utilizada de dB es una representación lineal de la intensidad del ruido percibido por el oído humano. Sin embargo existen otros factores que afectan al nivel de molestia experimentado, empezando por el hecho de que el ruido es un sonido indeseado. Existen además otros factores a considerar:

- La percepción varía en función de la hora del día y de la intermitencia. El ruido es más molesto durante la noche que durante el día
- Existen diferencias de sensibilidad al ruido entre las personas
- La tonalidad (frecuencias discretas de sonido o tonos) en el ruido aumenta la molestia
- La percepción del ruido puede verse afectada por la actitud general hacia la fuente de dicho ruido.
- El nivel de ruido de fondo afecta. Un bajo nivel de ruido es generalmente considerado como un factor importante en la calidad ambiental de una zona. Los efectos del ruido es un ambiente con un nivel de ruido bajo, como es el caso en general de los parques eólicos, es probablemente mayor que en áreas más contaminadas acústicamente. Estas diferencias pueden ser muy significativas.
- La valoración monetaria se ve afectada por numerosos factores socioeconómicos del área en cuestión principalmente porque la valoración económica se basa en el método de precios hedónicos.

De todo esto se deriva que la transferibilidad de los resultados de impactos de ruido de un lugar a otro es muy restringida dada la importancia de las características locales en el análisis.

## **16.2 Valoración monetaria**

Se usa el método de los precios hedónicos. Este método estima la depreciación en el valor de las propiedades inmobiliarias en una zona como consecuencia del nivel de ruido ambiente definiéndose así un *Índice de Sensibilidad de Depreciación por Ruido*. El valor de este índice, obtenido a partir de estudios de ruido de tráfico, es estima en 0.9% de depreciación por dB(A). Para obtener el valor del impacto del ruido en un área determinada bastará con multiplicar el nivel de ruido en cada sitio, por el número de casas afectadas, por el valor de cada casa y por el índice de depreciación.

## **17 Impacto visual**

Existen dos tipos de impactos visuales que resultan de los ciclos de generación energética:

- Intrusión visual ocasionado por ejemplo por la presencia de aerogeneradores en un paisaje natural
- Reducción de la visibilidad debido a las emisiones de contaminantes a la atmósfera: la metodología ExternE no realiza una estimación de estos impactos.

### **17.1 Intrusión visual**

Este tipo de impacto sólo ha sido considerado como prioritario en el caso de energías renovables en zonas rurales: parques eólicos y centrales hidroeléctricas.

La intrusión visual es un impacto de carácter local. Los efectos visuales de una misma tecnología en diferentes lugares puede variar considerablemente debido a la naturaleza tan heterogénea del paisaje y a que determinados paisajes pueden tener un gran valor.

Para la valoración del paisaje se ha utilizado el concepto de *Disponibilidad a pagar* por preservación del paisaje. Esta disponibilidad a pagar se puede obtener de dos formas:

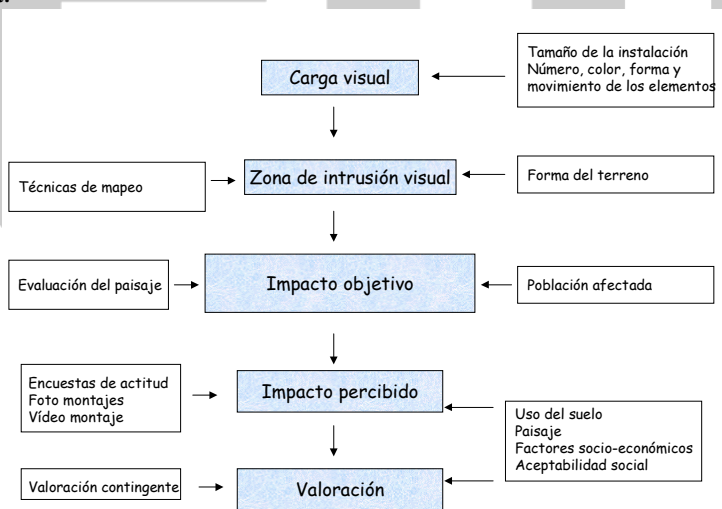
- Valoración directa: Mediante estudios de valoración contingente: tiene la ventaja de medir directamente el efecto producido pero sólo puede realizarse para sitios en los que han llevado a cabo encuestas de valoración contingente.
- Valoración indirecta: A partir de los resultados de valoración monetaria llevados a cabo en otros lugares. Es una técnica más generalizable pero cuenta con los problemas de tranferibilidad.

### 17.1.1 Valoración directa.

La valoración directa sólo se puede realizar en lugares donde se hayan realizado estudios de valoración contingente. En estos casos, los individuos que viven en el área alrededor de la nueva instalación se les presenta un paquete de impactos positivos y negativos de la instalación y se trata de determinar la disponibilidad a pagar de esos individuos para evitar esos impactos.

### 17.1.2 Valoración indirecta

La ruta de impacto para evaluar los impactos por intrusión visual se muestra en la siguiente figura.



**Figura 13** Ruta de impacto para la intrusión visual

### 17.1.3 Población afectada

Es necesario primeramente la población que se va a ver afectada por la intrusión visual. Especialmente en los casos en los que el paisaje de la zona tenga una importancia escénica para el turismo, la población afectada no va a ser sólo la población residente



como lo demuestran muchos estudios de valoración contingente. Así, la población afectada se puede dividir en 4 grupos:

- Residentes en el área donde la instalación es visible
- Visitantes
- Gente que trabaja en el área
- Gente que atraviesa el área en viajes

Al menos los dos primeros grupos deben ser considerados. El tercero puede solaparse en gran medida con el primero por lo que puede ignorarse y el cuarto puede llegar a ser importante cuando las instalaciones se sitúan cerca de carreteras o vías de tren principales.

#### *17.1.4 Carga visual*

La carga visual son los atributos visibles de la instalación: tamaño, forma, estructura, color y movimiento. En la práctica existe poca información sobre el efecto de estos parámetros sobre el impacto visual. Lo más importante es el tamaño porque determina el rango de visibilidad y la magnitud del cambio en la imagen para un observador en un sitio concreto. El color puede también afectar a la visibilidad y tiene también implicaciones estéticas.

#### *17.1.5 Zona de intrusión visual e impacto objetivo*

La zona de intrusión visual se define como el área de terreno desde donde cualquier parte de la instalación es visible. Esta zona se puede calcular conociendo la topografía local. La distancia máxima desde la que se puede ver una instalación depende del tiempo y del observador así como del tamaño de la instalación, pero en todos los casos la vegetación y los edificios limitan la visibilidad por debajo de lo que topográficamente sería posible.

#### *17.1.6 Evaluación del paisaje*

En la evaluación del paisaje es inevitable la existencia de una fuerte componente subjetiva. Sin embargo, existe conceptos y procedimientos que permiten describir el paisaje objetivamente. El objetivo es clasificar el paisaje y describirlo en términos más o menos objetivos que engloban por ejemplo su equilibrio, escala, apertura, textura, color, diversidad, unidad y forma.

#### *17.1.7 Impacto visual percibido*

El impacto percibido por los individuos depende de tres factores adicionales:

- Actitud hacia el paisaje y la belleza natural: depende de la estética del observador y está afectado por diversos factores socioeconómicos y personales
- Nivel de amenidad visual
- Actitud general hacia la fuente energética

### **17.2 Valoración monetaria**

Para la valoración monetaria se habrá de partir de estudios de impactos visuales realizados para otros tipos de instalaciones y en otros lugares. Para obtener el valor total



del impacto se multiplicará el valor medio de la disponibilidad a pagar de cada tipo de población afectada por el número de individuos en cada grupo.

## 18 Erosión del suelo

La erosión del suelo siempre es un coste aunque puede ser un beneficio relativo cuando se compara con los usos alternativos del terreno, especialmente cuando esta alternativa es el barbecho ya que la cubierta vegetal contribuye a la reducción de los procesos erosivos.

Se llama erosión a la pérdida acelerada del suelo con una reducción de sus compuestos orgánicos y minerales más finos. La erosión es un proceso progresivo e irreversible que puede tener impactos agronómicos, medioambientales y económicos significativos. Produce tanto desertificación como desertización. El primer término define la degradación de parámetros medioambientales como suelo y cubierta vegetal y el segundo se refiere a la despoblación causada por las condiciones naturales adversas.

La erosión del suelo puede estar causada por el agua o por el viento siendo la erosión hídrica la más importante. Ésta se define como el proceso de desintegración y transporte de las partículas del suelo por el agua y está afectada por numerosos factores de los cuales los más importantes son el clima, las características del suelo, la topografía y la cubierta vegetal.

Las características climáticas más importantes respecto a la determinación de la erosión del suelo son la distribución e intensidad de las lluvias y del viento. La pérdida de suelo está directamente relacionada con la precipitación debido al poder desintegrador de las gotas de lluvia al golpear la superficie del suelo y por su contribución a la escorrentía.

Las características del suelo incluyen la estructura y la textura, la composición química, y el contenido de materia orgánica. Normalmente los suelos profundos permeables y con un alto contenido de arena gruesa son menos erosionables.

Los factores topográficos más importantes son la longitud e inclinación de la pendiente ya que afectan al volumen y velocidad de la escorrentía.

La cubierta vegetal afecta a la erosión debido a su intercepción de las gotas de lluvia reduciendo su energía cinética. Por lo tanto, los efectos de la erosión dependerán de la altura de la cubierta y de su distribución. Las raíces también son importantes ya que contribuyen a fijar el suelo y a aumentar su permeabilidad.

### 18.1 Cuantificación de los impactos

Todas estas características son tenidas en cuenta para la cuantificación de la pérdida de suelo utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE).

$$Y = EI * K * LS * C * P * RO$$

Donde

Y: es la pérdida de suelo en t/ha

EI es el factor de energía de la lluvia

K es el factor de erosionabilidad del suelo

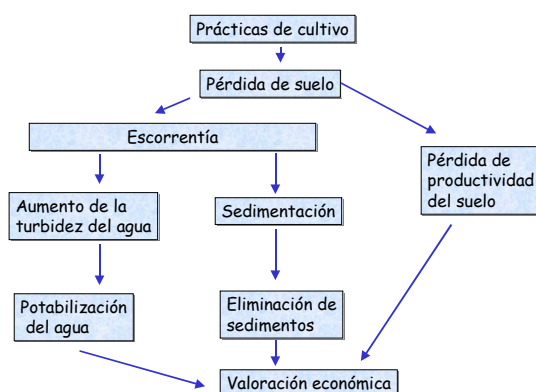
LS es el factor de inclinación y longitud de pendiente

C es el factor de manejo del cultivo

P es el factor de prácticas de control de la erosión y

RO es el factor de elementos gruesos

La ruta de impacto para evaluar los efectos de la erosión se presenta en la siguiente figura.



**Figura 14.** Ruta de impacto para la erosión

## 18.2 Valoración económica

Aunque la erosión del suelo produce daños significativos no se tienen datos de disponibilidad a pagar para evitar estos o de disponibilidad a aceptar compensaciones. Por tanto la valoración ha de hacerse con un enfoque de coste de restitución aunque esto no sea del todo coherente con la metodología propuesta.

Los impactos que han podido ser cuantificados son los originados por la pérdida de productividad del suelo y los originados por las labores de eliminación de sedimentos en los embalses puesto que disponemos de estos costes de restitución.

La pérdida de productividad del suelo se estima considerando el % de la primera capa (25 cm) que se pierde cada año considerando que es en esta capa donde el cultivo desarrolla su sistema radicular y la que posee la mayor riqueza en nutrientes. Eliminada esta capa la productividad se reducirá a cero. Este porcentaje se aplica a los rendimientos de los cultivos y se valora económicamente utilizando el precio pagado al agricultor.

Sin embargo, la pérdida de productividad no se considera una externalidad sino un coste internalizado ya que el agricultor lo tiene en cuenta a la hora de tomar decisiones y puede tomar medidas para disminuir la erosión.

En cuanto a la sedimentación en ríos y embalses, se considera para simplificar que todo el suelo erosionado va a los embalses y se calcula el coste de su eliminación.

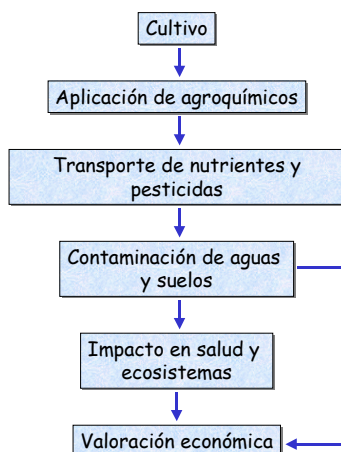
## 19 Contaminación agraria difusa

Esta se produce por el uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura. Estos productos aplicados al suelo pueden persistir durante tiempo o bien ser arrastrados por lixiviación o escorrentía a cursos de agua subterráneos y superficiales.

El comportamiento del suelo respecto de este tipo de contaminación dependerá de sus características físico-químicas biológicas, humedad y temperatura. Especialmente

importante es el contenido de materia orgánica y el contenido en arcilla. El agua por su parte es la vía principal para la movilización de estos compuestos

La ruta de impacto considerada se muestra en la siguiente figura.



**Figura 15.** Ruta de impacto de la contaminación agraria difusa

Los principales efectos de los fertilizantes en las aguas es la eutrofización de las mismas y la acumulación de metales pesados como cadmio y plomo que pueden estar incluidos en algunos fertilizantes.

La eutrofización es el crecimiento excesivo de algas y demás flora acuática favorecido por el alto contenido en nutrientes. Esto aumenta la demanda biológica de oxígeno creando en casos extremos condiciones anaerobias que a su vez producen la muerte de la fauna acuática.

La contaminación de agua por nitratos supone riesgos para la salud humana como la metahemoglobinemia en niños o los efectos carcinógenos de compuestos de nitrosaminas que pudieran formarse.

El nitrógeno se incorpora a las aguas por lixiviación y escorrentía siendo los compuestos nitrogenados muy móviles en el suelo por lo que la probabilidad de alcanzar las aguas subterráneas y los cursos de aguas superficiales es muy elevada.

Los efectos del fósforo sobre la eutrofización o la toxicidad no son muy graves ya que es fácilmente fijado al suelo y sólo contamina las aguas cuando es aplicado directamente. Algunos de los fertilizantes fosfatados contienen metales pesados como plomo o cadmio que pueden producir problemas de toxicidad.

Los pesticidas son en general muy tóxicos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Se trata normalmente de compuestos orgánicos que pueden persistir mucho tiempo en el suelo o por el contrario ser muy móviles en él.

La cantidad de contaminante lixiviado o perdido por escorrentía se puede estimar con cierta precisión utilizando modelos de simulación. Pero en cuanto a la cuantificación de los impactos no se dispone de funciones dosis-respuesta que relacionen el incremento



de contaminación de las aguas con el efecto que puede producir en los distintos receptores incluido el hombre. Por esta razón la valoración no puede ser llevada a cabo. Existen algunos estudios que determinan directamente la disponibilidad a pagar de la gente para evitar la contaminación de agua por nitratos. Utilizando estos valores podemos dar un valor monetario al coste del incremento de contaminación por N en el agua.

Uno de los problemas que afecta a esta forma de valorar es la transferibilidad de los resultados. En general los valores habrán sido obtenidos en países distintos a los de aplicación en donde los problemas de contaminación pueden o bien mayores o menores y así será la preocupación social por estos temas.

## **20 Efectos macroeconómicos**

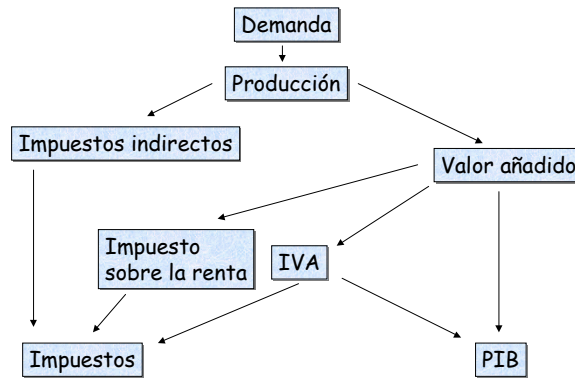
La cantidad invertida en la implementación de un ciclo energético crea un flujo asociado de consumo, una demanda de bienes y servicios, que no hubiera tenido lugar si el proyecto no se hubiera llevado a cabo y que es mayor que la cantidad invertida directamente en el proyecto. Esto es debido a lo que se denomina efecto multiplicador que es la demanda producida en todos los sectores de la economía por el incremento de demanda en uno de ellos debido a la interrelación existente entre ellos.

Estos efectos económicos no implican un aumento del bienestar si la economía está a pleno empleo ya que la nueva demanda de bienes y servicios se realiza a costa de la disminución en otras demandas. Sin embargo el pleno empleo no es una situación normal en la economía española. Por lo tanto podemos asumir que el efecto multiplicador producirá efectos económicos externos no incluidos en el análisis de costes del proyecto.

Estos beneficios externos se producen también en otras alternativas de inversión como por ejemplo ciclos de generación con energías convencionales. La comparación con otras alternativas determinará si existen o no beneficios netos.

Estos efectos macroeconómicos se evalúan por medio de modelos input-output. Estos reflejan las interacciones que existen entre los sectores de una economía por medio de la contabilización de los gastos de cada sector en inputs de otros sectores necesarios para producir sus respectivos outputs. Los efectos que se van a considerar son los cambios en el producto interior bruto y en los impuestos recaudados por el Gobierno utilizando la ruta de impacto señalada en la figura.





**Figura 16.** Ruta de impacto para efectos macroeconómicos

**20.1 Modelo input-output**

Las tablas input-output reflejan las interacciones que existen entre los sectores de una economía por medio de la contabilización de los gastos de cada sector en inputs de otros sectores necesarios para producir sus propios outputs. Con estos modelos podemos calcular la demanda generada en la economía por un aumento de la demanda de un sector específico.

Este modelo captura los efectos directos (gasto primario) e indirectos e inducidos. Por tanto para evaluar los efectos externos se resta del resultado del modelo la inversión directa.

La relación entre el aumento de la producción de la economía con el gasto directo se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta Q = (I - A)^{-1} \Delta D$$

donde :

$\Delta Q$  es el aumento de la producción

I es la matriz unidad

A es la matriz de coeficientes técnicos que se obtiene de las tablas input-output dividiendo cada elemento de la tabla por la producción de cada sector

$\Delta D$  es el incremento de la demanda producido por el gasto realizado

La expresión  $(I - A)^{-1}$  es lo que se denomina efecto multiplicador.

Lo que se hace es estimar la matriz de demanda que incluye los gastos que hay que realizar en cada uno de los sectores de la economía para llevar a cabo el proyecto descontados los gastos que se producen en los diferentes años del proyecto utilizando una tasa de descuento. Una vez que tenemos la matriz de demanda aplicamos el modelo y obtenemos el incremento de producción en la economía. Este incremento incluye los



gastos directos que en el proyecto que han de ser restados para obtener el incremento indirecto de producción.

## 20.2 Producto interior bruto

El cambio en el producto interior bruto puede calcularse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta \text{PIB} = \Delta \text{VA} + \Delta \text{IVA}$$

Donde

VA es el valor añadido

IVA es el impuesto sobre el valor añadido.

Por tanto es necesario calcular primero el VA y el IVA generados por el proyecto. Estos se obtienen utilizando funciones de regresión que relacionan la producción con el valor añadido y los impuestos.

Para el valor añadido, la función de regresión empleada es la siguiente:

$$\text{VA} = \exp(-1.32975Q^{1.0.3957})$$

Para el IVA la función de mejor ajuste es

$$\text{IVA} = -936,282 + 0,0442373 Q$$

## 20.3 Impuestos

Aquí se consideran además del IVA, el impuesto sobre la renta y los impuestos indirectos. La variación de los impuestos se calculará mediante funciones de regresión.

Las funciones empleadas son las siguientes:

$$\text{IRN} = -2.81697e+06 + 0.540229\text{VA}$$

$$\text{IND} = \exp(13,7136 + 9.8388e-09Q)$$

## 21 Empleo

La instalación de la central y el cultivo de la biomasa proporciona nuevas oportunidades de empleo. Sin embargo, las externalidades positivas de la creación de empleo solo aparecen si los trabajadores contratados estaban anteriormente desempleados y permanecerían así de otro modo. Es decir, solo habrá externalidad positiva si la tasa de desempleo es superior a la natural (5%) debida a desempleo temporal por cambio de trabajo o incorporación al mercado laboral. Cuando las tasas son superiores si que se producen externalidades positivas.

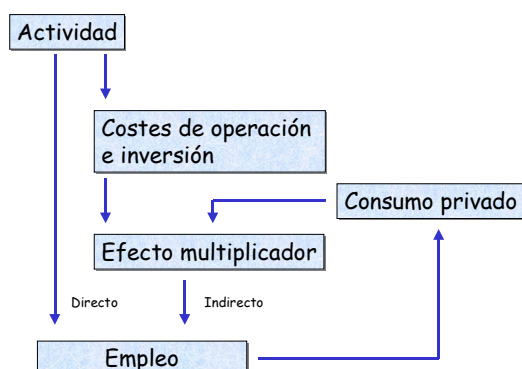
La mayoría de los gobiernos dedican considerables esfuerzos para reducir el desempleo. Estos esfuerzos, medidos por el presupuesto asignado a los programas de promoción de

empleo pueden ser tomados como la disponibilidad a pagar de la sociedad para evitar el desempleo. En algunos países, pueden aparecer más beneficios como consecuencia de la creación de empleo, como la reducción producida en el volumen de subsidios de desempleo pagados por el gobierno.

Por lo tanto, para evaluar los beneficios del empleo producidos por la instalación de una central eléctrica, tendremos que analizar la situación del mercado laboral del país, el presupuesto dedicado a la reducción del empleo, el volumen de los subsidios de desempleo y por supuesto el empleo generado por el nuevo proyecto.

El empleo generado por el proyecto puede ser directo o indirecto. El empleo directo es la cantidad de empleos necesarios para construir la planta, operarla y producir el combustible. El empleo indirecto es el creado en otros sectores de la economía por la demanda de bienes y servicios generada por el proyecto. Esta demanda procede de dos fuentes: en primer lugar, la inversión necesaria para la instalación estimula la actividad económica a través del efecto multiplicador y en segundo lugar, la economía también es estimulada por el aumento en el consumo producido por el incremento de renta de los trabajadores.

La ruta de creación de empleo se muestra en el siguiente diagrama.



**Figura 17.** Ruta de impacto para los efectos sobre el empleo

Los empleos fijos son los constituidos por los trabajadores empleados en la construcción, operación y mantenimiento de la central, así como en la producción del combustible.

El empleo indirecto es el creado en todos los sectores de la economía por la nueva demanda de bienes y servicios generada por el proyecto. Esta demanda es inducida como hemos dicho por el consumo en el proyecto y por el aumento del consumo privado debido a la nueva renta generada por los salarios pagados a los trabajadores del proyecto. La cantidad de empleos indirectos se calcula con el mismo modelo input-output, utilizando una función de regresión que relaciona el valor añadido con el empleo generado.

La función utilizada es la siguiente:



$$EMP = \exp(3.61071)VA^{0.32299}$$

Como dato indicativo del impacto sobre el empleo indirecto en otros sectores de la economía diremos que los sectores más afectados para el caso de generación de electricidad a partir de biomasa son el sector de maquinaria agrícola e industrial, el sector de productos químicos, el sector de crédito y seguros el sector de transporte por carretera y el de servicios a empresas.

Para valorar económicamente el empleo generado se puede utilizar como aproximación el ahorro que supone para el gobierno por la reducción en el volumen de subsidios para el desempleo pagados. Este método de estimar los beneficios externos correspondería a un enfoque *de coste evitado* que no es muy coherente con la metodología propuesta. La creación de empleo tiene un valor mayor que refleja el aumento de bienestar social. Para obtener la disponibilidad a pagar de la sociedad por la creación de empleo puede utilizarse como medida indicativa los gastos del gobierno en programas de promoción de empleo. Este enfoque sin embargo no es marginal en el sentido en que es bastante improbable que un pequeño cambio en el empleo como el generado por un ciclo de biomasa como el analizado pueda cambiar los gastos del gobierno en promoción de empleo. Por tanto no se espera que haya reducciones en estos gastos como consecuencia del proyecto. Sin embargo, si tomamos estas cifras como indicativas vemos que obtenemos beneficios mucho mayores que los obtenidos por el método de los costes evitados.

## 22 Accidentes y degradación de la red viaria

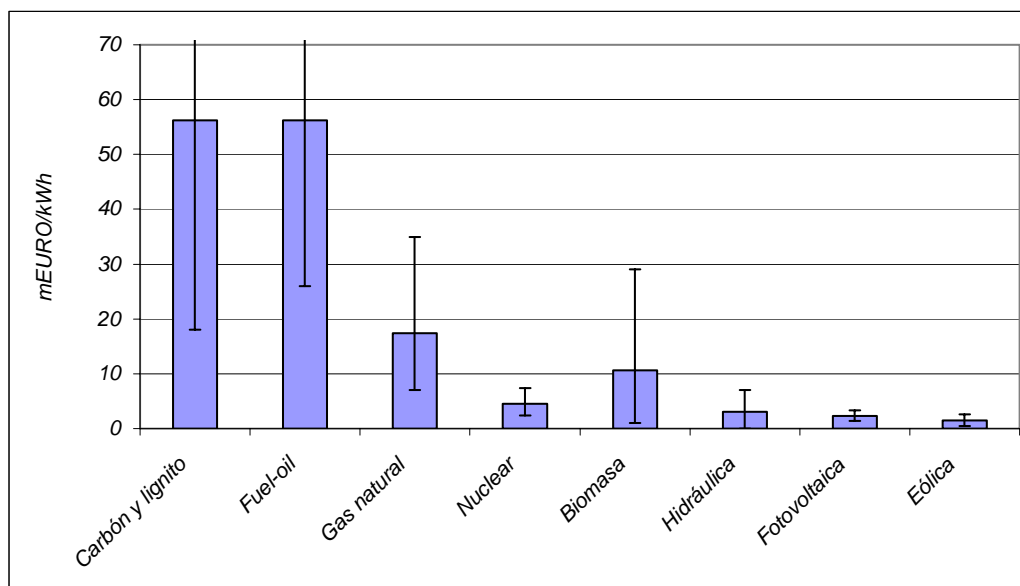
Se va a producir un incremento del tráfico pesado hacia la central debido al transporte del combustible. Este incremento de tráfico va a producir por una parte emisiones de contaminantes atmosféricos que van a afectar a la salud humana, los cultivos etc.. que se evalúan tal y como vimos anteriormente. Por otra parte este incremento de tráfico va a originar un incremento en los accidentes de carreteras y un incremento en el ritmo de degradación de las mismas.

Estos daños pueden estar internalizados de alguna manera mediante los seguros de accidentes y los impuestos sobre el uso de carreteras.

Para calcular el número de accidentes que se van a producir se utilizan estadísticas de accidentes de la DGT. La valoración económica se realiza según la metodología externE asignando un valor monetario a cada muerte y a cada accidente no mortal. Para obtener los daños en las carreteras se tiene en cuenta el coste adicional de repavimentación de las carreteras debido a este tráfico pesado.

## 23 Resultados

Dentro del proyecto ExternE National Implementation se realizó una estimación de los costes externos mediomambientales de las diferentes tecnologías de generación eléctrica en diferentes países europeos. Los resultados se muestran en la figura 12 y en la tabla 9.



**Figura 18.** Costes externos de diferentes tecnologías de generación.

**Tabla 9** Resultados del Proyecto Externe National Implementation

País	Daños en mEURO/kWh***									
	Carbón & lignito	Turba	Fuel-Oil & orimul.	Gas	Nuclear	Biomass	Hidrául.	Fotovol.	Eólica	Inciner.
AUT				11-26		24-25	0.04**			
BE	37-150			11-22	4.0-4.7					
DE	30-55		51-78	12-23	4.4-7.0	28-29		1.4-3.3	0.5-0.6	
DK	35-65			15-30		12.14			0.9-1.6	
ES	48-77			11-22		29-52*			1.8-1.9	15-24
FI	20-44	23-51				8-11				
FR	69-99		84-109	24-35	2.5	6-7	6			67-92
GR	46-84		26-48	7-13		1-8	5.1		2.4-2.6	
IE	59-84	33-38								
IT			34-56	15-27			3.4			46-77
NL	28-42			5-19	7.4	4-5				
NO				8-19		2.4	2.3		0.5-2.5	
PT	42-67			8-21		14-18	0.3			
SE	18-42					2.7-3	0.04-7			
UK	42-67		29-47 31-52	11-22	2.4-2.7	5.3-5.7			1.3-1.5	

\*: biomasa con lignitos

\*\* : beneficios no incluidos. Beneficios: 0.78 – 8.3 mEURO/kWh

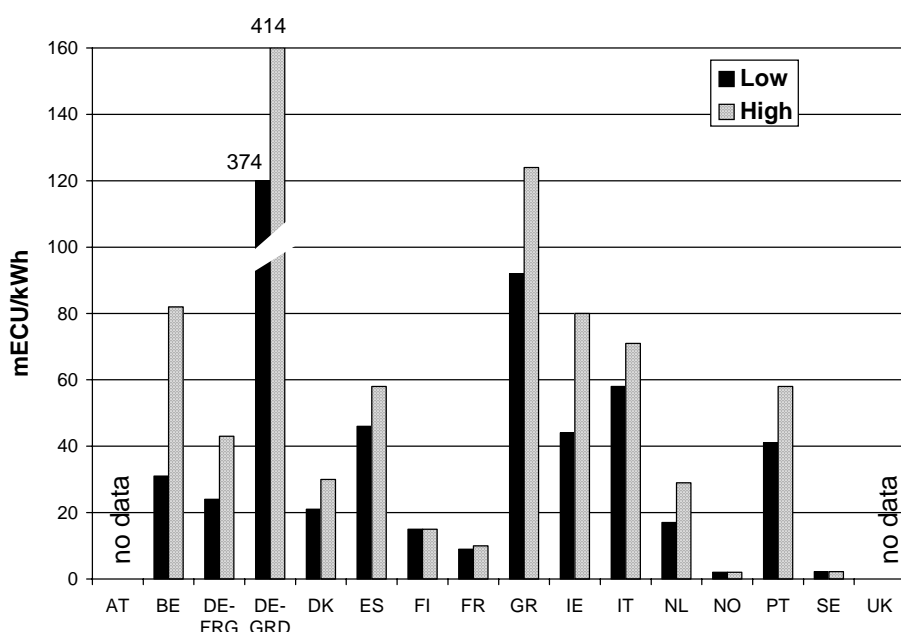
\*\*\*: Sub-total de externalidades cuantificables

El rango de variación de los resultados es muy amplio debido a las diferencias existentes entre los países en cuanto a tecnología y localización elegidas para su análisis por lo que las comparaciones no son fáciles de realizar. En términos generales, vemos como los combustibles fósiles tienen costes externos mucho más elevados que el resto de las tecnologías. El gas natural es el más competitivo en costes externos debido a sus bajas emisiones contaminantes.



En el caso de nuclear la evaluación realizada solo incluye una estimación muy preliminar de las consecuencias de los accidentes por lo que los resultados que se obtienen son muy bajos. De las energías renovables la biomasa es la que presenta los costes más elevados debido a las emisiones de la combustión. El resto de las energías renovables presenta costes externos muy reducidos debido a que no tienen emisiones significativas de CO2 ni de otros contaminantes. Así, la internalización de los costes externos de la energía supondría así una ventaja competitiva para las energías renovables y aceleraría su introducción en el mercado.

En la siguiente figura se muestran los costes externos agregados de todo el parque eléctrico en los distintos países por kWh generado.



**Figura 19.** Externalidades de la generación eléctrica en diferentes países europeos.

Los daños son mayores en aquellos países que usan el carbón y los lignitos de forma más extensiva como el caso de la antigua Alemania del Este, y Grecia por ejemplo y son menores en aquellos países que usan más la energía nuclear como el caso de Francia o las energías renovables los países escandinavos y Holanda. La posición geográfica influye también siendo los países centroeuropeos, con una densidad de población mucho mayor, los que presentan los mayores daños.

## 24 Referencias

Abbey, D.E., Lebowitz, M.D., Mills P.K., Petersen, F.F., Lawrence Beeson W, Burchette RJ (1995). *Long-term ambient concentrations of particulates and oxidants and development of chronic disease in a cohort of nonsmoking California residents.* Inhalation Toxicology 7, 19-34.



- Anderson HR, Ponce de León A, Balnd JM, Bower JS, Strachan DP (1996). *Air pollution and daily mortality in London : 1987-92*. BMJ 312 : 665-9.
- Bernow, S.S. and D.B. Marron (1990). *Valuation of environmental Externalities for energy planning and operation*. Tellus Institute, Boston.
- COST (1991) Commission of the European Communities. Report series on Air Pollution Epidemiology Report nº 1. *Exposure assessment*. Brussels: Commission of the European Communities.
- Dab, W., Quenel, S.M.P., Le Moullec Y., Le Tertre, A., Thelot, B., Monteil, C., Lameloise P., Pirard, P. Momas I., Ferry R., Festy, B. (1996). *Short term respiratory health effects of ambient air pollution: results of the APHEA project in Paris*. J. Epidem. Comm. Health 50 (suppl 1): S42-46.
- Davies, T. (1980). *Grasses more sensitive to SO<sub>2</sub> pollution in conditions of low irradiance and short days*. Nature, 284-483-5.
- Dockery, D.W., Speizer, F.E., Stram D.O., Ware J.H., Spengler J.D., Ferries B.G. (1989) *Effects of air pollution on respiratory health of children*. Am. Rev. Respir. Dis; 139: 587-594.
- Dusseldorp A., Kruize, H., Brunekreet B., Hotscheuder P., de Meer G., van Oudvorst A.B. (1995) *Associations of PM<sub>10</sub> and airborne iron with respiratory health of adults near a steel factory*. Am. J. respir. Crit. Care med. 152, 1932-39.
- EC, (1995a). European Commission. ExternE. Externalities of Energy. Vol. 2 Methodology.
- EC, (1995b). European Comission. ExternE. Externalities of energy. Vol 5. Nuclear.
- EC, (1999a). European Commission. ExternE. Externalities of Energy. Vol. 7 Methodology 1998 update.
- EC, (1999b). European Commission. ExternE. Externalities of Energy. Vol. 9 Fuel Cycles for emerging and end-use technologies, transport and waste.
- EC, (1999c). European Commission. ExternE. Externalities of Energy. Vol. 10 National Implementation.
- Guderian, R. (1985). *Air pollution by photochemical oxidants*. Springer-Verlag, Ecological studies, Vol. 52.
- Halbwachs, G. (1984). *Organismal responses of higher plants to atmospheric pollutants: sulphur dioxide and fluoride*. En: Treshow, M. (ed.) *Air pollution and plant life*. John Wiley and sons Ltd, pp 175-214.
- Hohmeyer, O. (1988). *Social costs of energy consumption*. Springer Verlag, Berlin.
- Manning, W. y W.A. Feder (1980). *Biomonitoring air pollutants with plants*. Applied science publishers, Ltd. London, pp. 11-36.
- Murray, F., y S. Wilson (1989). *The relationship between sulfur dioxide concentration and yield of five crops in Australia*. Clean Air, May 1989, Vol 23/2.
- NAPAP (1991). *Acid deposition: State of Science and Technology. Summary report of the US National Acid Precipitation Program*. US Government Printing Office, Washington, D.C.



- Ostro BD (1987). *Air pollution and morbidity revisited: a specification test*. J. Environ. Econ. Manage 14, 87-98.
- Ottinger, R.L. D.R. Wooley, N.A. Robinson, D.R. Hodas, S.E. Babb (1991). *Environmental costs of electricity*. Oceana Publications Inc., New York.
- Pearce, D. C. Bann, and S. Georgiou (1992). *The social costs of fuel cycles. A report to the UK Dept. of Trade and Industry*. HMSO, London.
- Ponce de Leon, A., Anderson, H.R., Blend J.M., Strachan, D.P., Bower J. (1996). *Effects of air pollution on daily hospital admissions for respiratory disease in London between 1987-88 and 1991-92*. J. Epidem. Comm. Health 50 (suppl 1): S63-70.
- Pope CA III, Thun M.J., Namboodiri M.M., Dockery D.W., Evans, J.S., Speizer F.E., Heath CW Jr (1995). *Particulate air pollution as predictor of mortality in a prospective study of US adults*. Am. J. Resp. Crit. Care Med. 151: 669-674.
- Pope, C.A. Dockery D.W. (1992) *Acute health effects of PM<sub>10</sub> pollution on symptomatic and asymptomatic children*. Am. Rev. Respir. Dis. 145, 1123-1126.
- Roemer, W., Hoek G., Brunekreet B. (1993) *Effect of ambient winter air pollution on respiratory health of children with chronic respiratory symptoms*. Am. Rev. Respir. Dis. 147: 118-124.
- Schleisner, L. (1999) *Differences in Methodologies used for Externality Assessment. Why are numbers different?* RISØ National Laboratoty, Denmark.
- Schwartz, J. and Morris R. (1995). *Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan*. Am. J. Epidemiol; 142: 23-35.
- Spix C, Wichmann HE (1996) *Daily mortality and air pollutants : findings from Köln, Germany*. J. Epidem Comm Health 50 (suppl 1) : S52-S58.
- Sunyer J., Castellsague J, Sáez M, Tobias A, Antó JM (1996) *Air pollution and mortality in Barcelona*. J. Epidem Comm Health 50 (suppl 1) : S76-S80.
- Stirling, A. Limits to the value of external costs, Energy Policy, Vol.25 No.5, pp.517-540
- Wordley, J. Walters, S., Ayres J.G. *Short term variations in hospital admissions and mortality and particulate air pollution*. (In press).