

ENERGÍAS RENOVABLES Y MODELO ENERGÉTICO, UNA PERSPECTIVA DESDE LA SOSTENIBILIDAD*

Javier Domínguez Bravo

Carmen Lago Rodríguez

Ana Prades López

*CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)***

María del Pilar Díaz Cuevas

*Universidad de Sevilla****

RESUMEN

En la actualidad, las energías renovables forman parte de las estrategias adoptadas para fomentar el cambio hacia un nuevo sistema energético, más eficiente y diversificado. Esta aportación analiza el papel de la energía eólica en este proceso de transición y como una mejor gestión del territorio, donde el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta fundamental, puede contribuir a acelerar la implantación de un nuevo modelo energético, caracterizado por la sostenibilidad.

Palabras clave: energías renovables, sistema energético, territorio, Sistemas de Información Geográfica (SIG), sostenibilidad.

Renewable energies and energy model. A sustainable perspective

ABSTRACT

Renewable energies are currently part of the strategies to promote a change towards a new energy system, more efficient and diversified. This paper aims to analyse how wind power plays an important role in this transition process and how a better management of the territory, in which the use of GIS is essential, might contribute to speed up the transition to a new energy model that favours sustainability.

Key words: renewable energies, energy system, Geographical Systems Information (GIS), territory, sustainability.

INTRODUCCIÓN

¿Es sostenible el actual modelo de crecimiento y desarrollo económico basado en un uso intensivo de la energía? La crisis en la que nos vemos envueltos parece afirmar que este

* Fecha de recepción: 2 de septiembre de 2010.

Fecha de aceptación: 20 de octubre de 2010.

** CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). Ministerio de Ciencia e Innovación. Av. Complutense, 22. 28040 Madrid (España). E-mail: javier.dominguez@ciemat.es, carmen.lago@ciemat.es, ana.prades@ciemat.es.

*** Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla. C/ Doña María de Padilla, s/n. 41004. Sevilla (España). E-mail: pilard@us.es.

modelo de desarrollo no es en absoluto sostenible, ni tan siquiera desde una perspectiva de riqueza económica.

El uso irracional de la energía, encaminado a la satisfacción de una demanda en constante crecimiento, tiene ante sí dos graves problemas: el agotamiento de las fuentes de energía convencionales y la pérdida, cambio o deterioro de otros valores naturales como el medio ambiente, el clima o el paisaje.

El agotamiento de los combustibles fósiles y su concentración en áreas relativamente pequeñas del planeta, tiene como consecuencias la enorme dependencia de los países no productores y un difícil juego geopolítico internacional que consume recursos y esfuerzos y desestabiliza las posibilidades de un crecimiento internacional armónico.

Desde la perspectiva ambiental, la enorme incidencia del consumo de combustibles fósiles sobre los valores naturales y el clima, demostrada en numerosas ocasiones, nos lleva a una necesidad imperiosa e ineludible de trabajar por un nuevo modelo energético, respetuoso con el medio, y que garantice un desarrollo armónico y equitativo de la sociedad.

El modelo energético en uso se caracteriza por la concentración y especialización territorial, donde los recursos, los centros de transformación y generación y el consumo están, en muchas ocasiones, a grandes distancias, incluso continentales. El consecuente transporte, tanto de la energía primaria como de la electricidad, entre los centros de recursos, generación y consumo, implica numerosos impactos sobre el territorio y el medio ambiente.

Este modelo concentrado tiene un gran impacto en la explotación de recursos fósiles (minería, yacimientos petrolíferos y gasísticos...), tanto en el uso del suelo como en las emisiones generadas en su extracción. La transformación de estos combustibles se produce pasando por una fase de refinado donde también se realiza un uso extensivo del espacio y una notable emisión de contaminantes. Tras el refinado o la preparación del combustible, este se consume bien mediante la generación de electricidad en centrales térmicas (con impacto sobre el paisaje y emisiones) o bien en motores de combustión interna (transporte fundamentalmente) o calefacciones (energía mecánica y calor) con una notable contaminación atmosférica. Además, todo el proceso de transporte, del propio combustible o de la electricidad generada, tiene un alto impacto y notables pérdidas e ineficiencias.

Un modelo de generación más distribuida, y con una alta penetración de energías renovables, se caracteriza por que la explotación del recurso y la generación son coincidentes o están muy próximas (biomasa) y suelen ser más cercanas a la demanda, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y a aminorar los impactos de las redes de distribución¹.

Con lo expuesto, no debe pensarse que la existencia de un modelo implica la inexistencia del otro, sino más bien, debe visualizarse una transición hacia este nuevo modelo más sostenible donde, paulatinamente, se vaya produciendo una sustitución de las fuentes convencionales y una mejora en la gestión, la cual irá pareja a las nuevas disponibilidades de la tecnología y a la presión de la sociedad en pos de este cambio.

Como forma de transición hacia una mayor sostenibilidad este trabajo quiere analizar el papel que está jugando la energía eólica, para a continuación, explorar como una mejor

¹ Si bien este modelo distribuido colabora a optimizar las redes de transmisión de energía, no debemos de olvidar que este modelo probablemente deba desarrollarse junto a grandes redes de interconexión que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos renovables y junto a nuevas formas de gestión inteligente e interconexión.

gestión del territorio respecto a la misma puede contribuir a acelerar la implantación de un nuevo paradigma energético.

2. LA ENERGÍA EÓLICA, UN MODELO PARA EL ANÁLISIS DE UN FUTURO RENOVABLE

El papel preponderante del consumo energético en los problemas medioambientales de la sociedad actual está claramente reconocido. Por ello, el análisis de su influencia en el medio ambiente es una de las tareas fundamentales en la actualidad, para minimizar, en lo posible, sus posibles efectos adversos y al tiempo potenciar aquellas energías que sean más beneficiosas desde un punto de vista medioambiental.

Las energías renovables son más sostenibles que las convencionales debido, entre otras razones, a sus menores emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a mitigar el cambio climático, según se reconoce en la Directiva Europea de promoción y fomento de las energías renovables de 2008.

La importancia que ha adquirido el desarrollo eólico en nuestro país viene avalada por el hecho de que en el año 2009 terminó con una generación eólica superior al 14 % del total, habiendo llegado a producir, en ciertas puntas de generación, más de un 50 % de la electricidad demandada. Es por ello, que consideramos que el análisis de esta fuente puede ser paradigmático del futuro papel de las energías renovables.

La energía eólica en particular no genera ninguna emisión durante la fase de operación lo que unido a su carácter renovable, la convierte en una de las energías más prometedoras tanto a nivel global como local. Según el *Global Wind Energy Council* (GWEC), los 97 GW eólicos operativos en 2007 permitieron el ahorro de 122 millones de toneladas de CO₂.

Tradicionalmente la energía eólica se ha desarrollado en “tierra” (on-shore), ocupando los espacios disponibles con las mejores condiciones de viento. Pero a medida que la tecnología ha ido avanzando, ya es posible también el aprovechamiento de la energía eólica en el “mar” (off-shore), aumentando con ello las posibilidades de obtención de electricidad en aquellos mares con plataformas continentales someras.

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es una potente herramienta que permite evaluar todos los impactos medioambientales contabilizando el consumo de materias primas y las emisiones derivadas de cualquier actividad o proceso energético o industrial.

El Análisis de Ciclo de Vida puede definirse como: “un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y cuantificación de la energía y los materiales usados y los residuos descargados al medioambiente; evaluar su impacto e identificar y evaluar oportunidades para efectuar mejoras medioambientales. Esta evaluación abarca todo el ciclo de vida del producto, proceso o actividad, incluyendo la extracción y procesamiento de las materias primas, el manufacturado, el transporte y la distribución, el uso, reuso y mantenimiento, el reciclaje y el vertido final.”

Esta metodología, por tanto, describe y analiza todas las corrientes que entran desde la naturaleza al sistema estudiado y aquellas que salen del sistema a la naturaleza en todas las etapas de su ciclo de vida. Ha sido desarrollada en los últimos años fundamentalmente por tres instituciones: SETAC (*Society for Environmental Toxicology and Chemistry*),

SPOLD (*Society for the Promotion of Life Cycle Development*) e ISO (*International Standard Organization*).

Es esta última organización quien ha estandarizado y descrito la metodología en las normas internacionales ISO 14040 y 44. Las etapas principales que componen este análisis son las siguientes:

1. Definición del objetivo y alcance del estudio: en esta etapa se definen los objetivos globales del estudio y se establece la finalidad del mismo, el producto a estudiar, la audiencia a la que se dirige y el alcance o magnitud del estudio, es decir, los límites del sistema. Asimismo se define la unidad funcional, los datos necesarios para la realización del estudio y el tipo de revisión crítica a la que se someterá posteriormente.
2. Análisis de inventario: En la fase de inventario se contabilizan todas las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de la unidad funcional. Estas cargas ambientales son: las entradas de materia y energía; el producto o productos; los residuos y las emisiones al aire, al agua y a la tierra. La metodología usa la aproximación conceptual del análisis de sistemas, en el sentido en que traza una frontera alrededor del sistema analizado y cuantifica las entradas y salidas a través de esa frontera.
3. Evaluación de los impactos del ciclo de vida: consiste en interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales. La evaluación de impacto consta de una serie de etapas:
 - Clasificación: cada carga ambiental se une a una o varias categorías de impacto relacionando así las cargas ambientales con los efectos que producen.
 - Caracterización: la contribución de cada carga ambiental a cada una de las categorías de impacto se calcula multiplicando las cargas por unos factores de caracterización. Los resultados dentro de cada una de las categorías de impacto se suman para dar un resultado de cada categoría.
 - Normalización. Cada resultado de cada categoría se normaliza para obtener una estimación de la importancia del resultado en las diferentes categorías.
 - Valoración. El resultado normalizado se multiplica por un factor de ponderación que representa la importancia relativa de cada categoría de impacto. Los resultados ponderados se pueden entonces sumar para dar un resultado final del impacto ambiental del sistema estudiado.
4. Interpretación de los resultados obtenidos en el estudio. En esta fase se identifican y evalúan las oportunidades de reducir los impactos ambientales.

2.1. ACV y energía eólica

El ACV permite realizar de una manera clara y objetiva, el análisis comparativo de los impactos ambientales asociados a la producción de electricidad.

Durante los últimos años se han llevado a cabo, desde diferentes instituciones y empresas, una serie de ACVs para determinar el impacto generado por la producción de energía eólica.

El ACV no sólo considera las emisiones derivadas de la construcción, operación y desmantelamiento del parque eólico, sino que tiene en cuenta todas las materias primas consumidas y todas las emisiones realizadas a lo largo de todo el ciclo de vida. Además, el ACV permite detectar aquellas fases que generan mayor impacto para así poder acometer las reformas necesarias en dicho proceso para reducir su contribución al impacto global.

El ACV de la energía eólica se puede dividir en cinco fases:

1. Fase de construcción. En ella se incluye la producción de las materias primas necesarias para la construcción los diferentes componentes del parque eólico. Por lo tanto se incluyen todos los materiales (acero, aluminio, fibra de vidrio, etc.) necesarios para fabricar la torre, la góndola, el buje, las palas, las bases de las torres y todos los cables de la conexión eléctrica.
2. Fase de levantamiento del parque eólico. Incluye todos los trabajos necesarios para erigir los aerogeneradores. En algunas ocasiones esta fase se incluye o bien en la fase de construcción o en la de transporte.
3. Fase de transporte. En ella se incluye tanto el transporte de las materias primas para la producción de los diferentes componentes como el transporte de los aerogeneradores y demás componentes al lugar de emplazamiento y todo el transporte necesario durante el tiempo de operación del parque eólico.
4. Fase de operación. Se refiere fundamentalmente al mantenimiento del parque eólico incluyendo los cambios de aceite, lubricación y el transporte de estos componentes usados en el mantenimiento.
5. Fase de desmantelamiento. En ella se incluye tanto el desmantelamiento del parque eólico como su transporte hasta la eliminación de los residuos o el reciclaje de los componentes aprovechables.

Numerosos estudios basados en la metodología del ACV han sido llevados a cabo con objeto de conocer, evaluar y cuantificar el impacto ambiental generado por este tipo de energía, las emisiones evitadas al medio ambiente y su contribución en la minimización del cambio climático. Para la realización de este análisis nos hemos centrado en los siguientes estudios:

1. Proyecto europeo “Environmental and ecological life cycle inventories for present and future power systems in Europe” (ECLIPSE). El proyecto se centró en las tecnologías más representativas de los aerogeneradores más utilizados en ese momento, año 2003. Sin embargo, todas las variabilidades fueron analizadas: diferentes tamaños: 600 kW, 1500 kW, 2500 kW y 4500 kW; torre tubular y enrejada; diferentes tipos de bases de los aerogeneradores, etc.
2. La compañía de aerogeneradores Vestas, llevó a cabo varios estudios de ACV comparativos de sus parques eólicos tanto de onshore como de offshore compuestos por máquinas de 2 y 3 MW de potencia unitaria. (2005-2006)

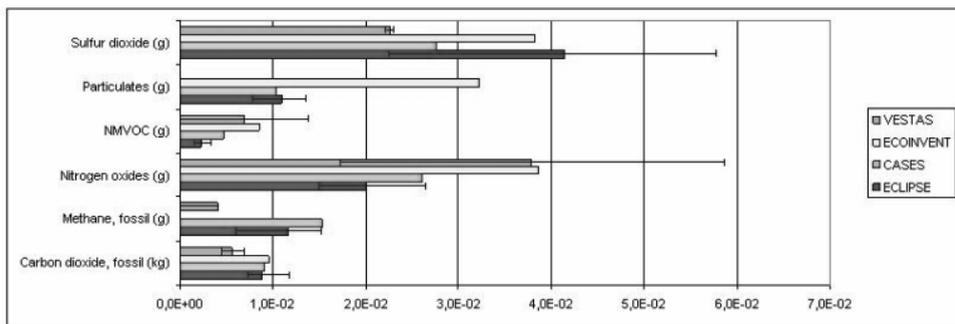
3. Base de datos Ecoinvent. La versión v2.0 incluye datos de diferentes fuentes de producción de electricidad, entre los cuales están recogidos datos de parques eólicos usando máquinas de 800 kW para las propuestas onshore y molinos de 2 MW para los desarrollos en offshore.
4. Proyecto europeo “New energy externalities development for sustainability” (NEEDS). El proyecto, finalizado en 2008, analizó únicamente la vertiente de offshore, tanto en el corto como en el largo plazo, comparando esta tecnología con otras fuentes de producción de electricidad. La tecnología analizada se basó en máquinas de 2 MW de potencia con tres palas, con regulación por cambio del ángulo de paso, rotor a barlovento, eje horizontal y cimentación con un solo pilote. La configuración elegida como representativa de la opción offshore en Europa fue un parque eólico de 80 aerogeneradores, localizado a 14 km de la costa.
5. Proyecto europeo “Cost assessment for sustainable energy systems” (CASES). Se estimaron las emisiones de contaminantes emitidas en cada fase de producción por unidad de electricidad producida para diferentes fuentes de producción incluyendo tanto la energía eólica procedente de onshore como de offshore. El proyecto concluyó en 2008.

A) Onshore.

Resultados de los inventarios

Los resultados de los inventarios de los proyectos Vestas, Ecoinvent, Cases y Eclipse se muestran en la figura 1. Las barras muestran la variabilidad presente en los resultados cuando se analizan diferentes configuraciones de los parques eólicos.

Figura 1. Emisiones derivadas de la producción de 1 kWh en parques eólicos onshore a lo largo del ciclo de vida.

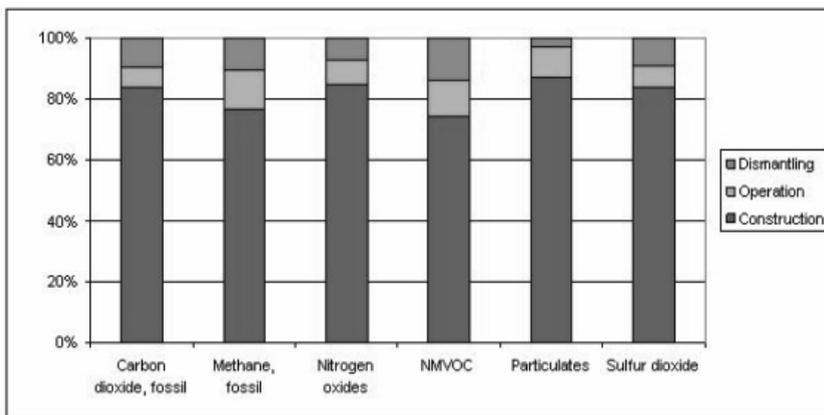


Fuente: Elaboración propia con datos de Vestas, Ecoinvent, Cases y Eclipse.

Las emisiones de CO₂ varían de 5.6 a 9.6 g/kWh en los estudios analizados. Las emisiones de metano se mueven en un rango entre 11.6 y 15.4 mg/kWh y las de SO₂ entre 22.5 y 41.1 mg/kWh. Los óxidos de nitrógeno emitidos presentan una variación que oscila entre los 20 y los 38.64 mg/kWh. Los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) varían sus emisiones entre 2.2 y 8.5 mg/kWh, mientras que las emisiones de partículas oscilan entre 10.3 y 32.3 mg/kWh. Todas estas emisiones, excepto en el caso de las partículas, se sitúan en niveles muy por debajo de las emitidas por las tecnologías convencionales.

El análisis ambiental de las distintas fases de la tecnología eólica se muestra en la figura 2. Se observa que la fase de construcción es aquella en la se concentran la mayor parte de las emisiones y, por lo tanto, es la que genera mayor impacto. Prácticamente el 80% de las emisiones se producen durante la etapa de construcción, mientras que la fase de operación, en la que se incluye también el mantenimiento y el recambio de los materiales, es sólo responsable de 7 al 12% de las emisiones totales. Finalmente la fase de desmantelamiento contribuye con un porcentaje que puede variar entre el 3 y el 14%.

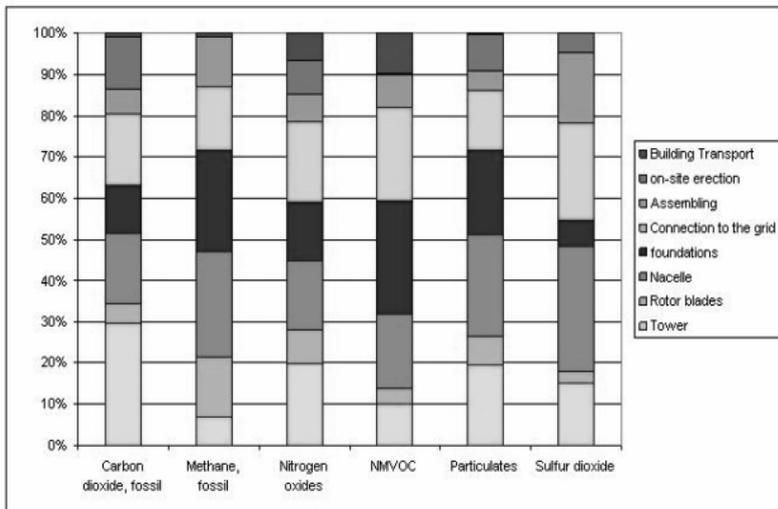
Figura 2. Porcentaje de emisiones por etapas a lo largo del ciclo. Onshore.



Fuente: Elaboración propia basada en datos de ECLIPSE.

El análisis detallado de la fase de construcción nos permitirá conocer la contribución al impacto de las diferentes sub-etapas incluidas en ella, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Contribución de los componentes de la fase de construcción lo largo del ciclo. Onshore.



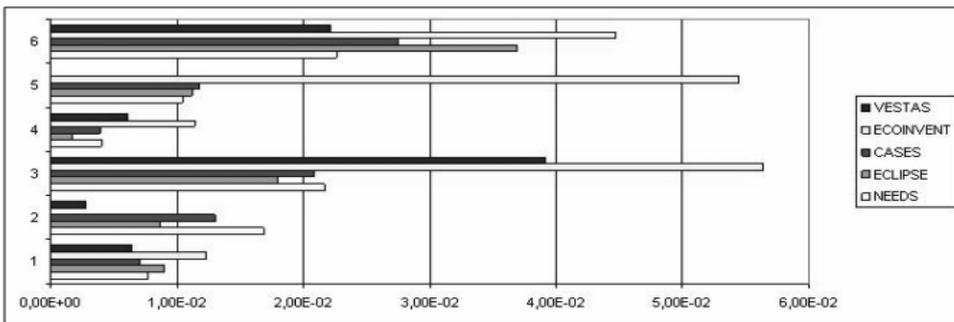
Fuente: Elaboración propia basada en datos de ECLIPSE.

B) Offshore

Resultados de los inventarios

Para analizar los impactos de los parques eólicos en el mar se han utilizado los datos procedentes de los siguiente proyectos: Vestas, Ecoinvent, Cases, Eclipse y Needs. La figura 4 muestra el inventario de emisiones más significativas. Las barras manifiestan la variabilidad presente en los resultados cuando se analizan diferentes configuraciones de los parques eólicos en el mismo estudio.

Figura 4. Emisiones derivadas de la producción de 1 kWh en parques eólicos offshore a lo largo del ciclo de vida.



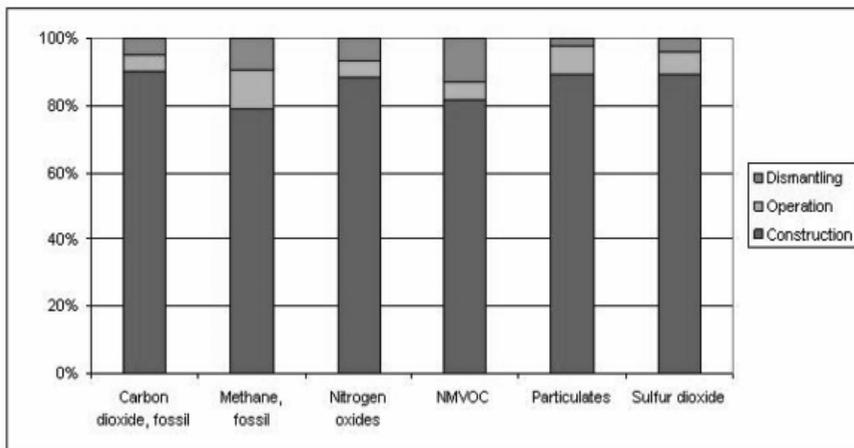
Fuente: Elaboración propia con datos de Vestas, Ecoinvent, Cases, Eclipse y Needs.

Las emisiones de CO₂ varían de 6.4 a 12.3 g/kWh en los estudios analizados. Las emisiones de metano se localizan en el rango entre 2.8 y 19.6 mg/kWh y las de SO₂ entre 22.1 y 44.7 mg/kWh. Los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) presentan unas emisiones entre 1.7 y 118.4 mg/kWh, mientras que las emisiones de partículas oscilan entre 10.5 y 54.4 mg/kWh. Los óxidos de nitrógeno fluctúan entre 18 y 56.4 mg/kWh.

Los datos de los inventarios muestran unas emisiones bastante similares entre las tecnologías onshore y offshore para la producción de electricidad eólica.

La contribución por fases se muestra en la figura 5, donde nuevamente puede observarse la importancia de la fase de construcción en el impacto generado. En un esquema offshore la influencia de esta fase es incluso mayor que en onshore, alcanzando hasta un 85% de las emisiones generadas a lo largo de todo el ciclo de vida.

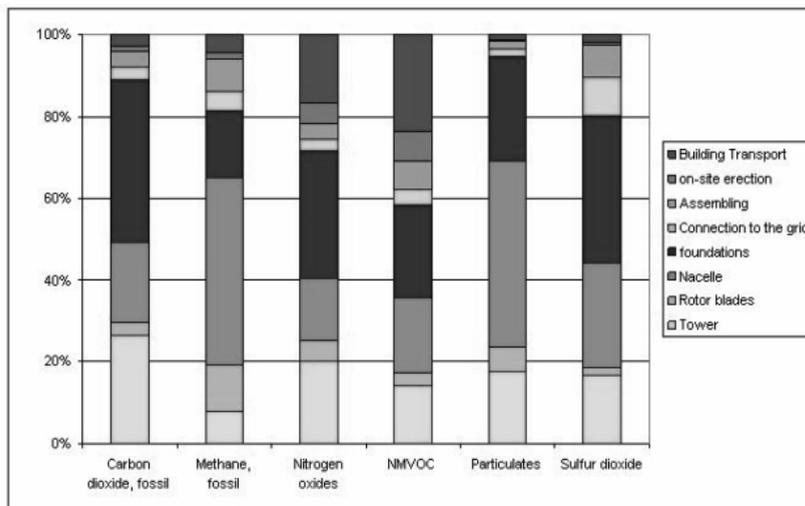
Figura 5. Porcentaje de emisiones por etapas a lo largo del ciclo. Offshore.



Fuente; Elaboración propia basada en datos de ECLIPSE

Profundizando en la etapa de construcción vemos diferencias con respecto a la tecnología onshore. En el esquema offshore, como muestra la figura 6, la contribución de la góndola y de la cimentación aparece como predominante seguida de la torre. La fabricación de las palas contribuye en una escasa medida a las emisiones. Sin embargo, las emisiones procedentes del transporte en offshore sí que son significativas en cuanto a NO_x y COVNM.

Figura 6. Contribución de los componentes de la fase de construcción a lo largo del ciclo. Offshore.



Fuente: Elaboración propia basada en datos de ECLIPSE.

2.2. Beneficios comparativos renovables versus energías convencionales

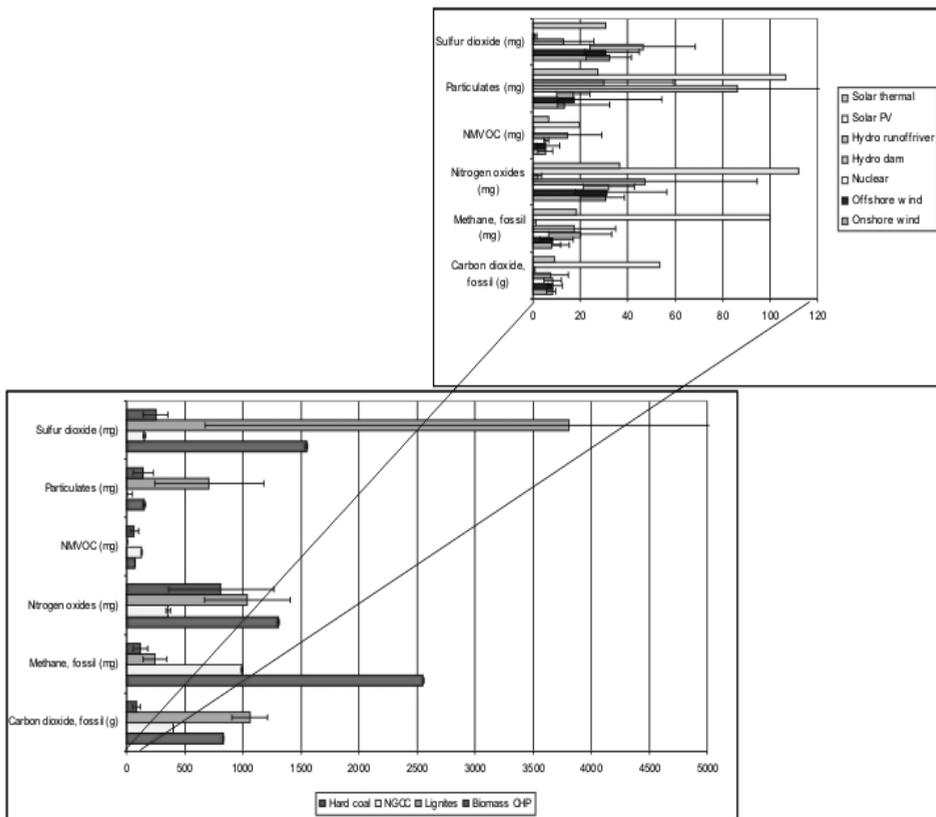
Los beneficios medioambientales de las energías renovables pueden ser valorados evaluando las emisiones evitadas al producir electricidad con este tipo de energías frente a las emisiones que se producirían si esa misma cantidad de energía fuera producida con tecnologías convencionales.

A partir de los datos de Cases, Ecoinvent y Needs se ha elaborado la figura 7 donde se muestran el inventario de las emisiones significativas para la producción de electricidad de 1kWh utilizando diferentes Fuentes energéticas: carbón, gas natural, biomasa, solar, hidroelectricidad, nuclear y eólica.

Las emisiones producidas a lo largo de todo el ciclo de vida son significativamente menores en el caso de todas las renovables. La única excepción se presenta en las emisiones de partículas, donde el gas natural presenta menores emisiones que las producidas por las energías renovables.

Las emisiones producidas en la generación de electricidad con diferentes fuentes energéticas se cuantifican en la tabla 1. Asimismo se especifican las emisiones evitadas utilizando energía eólica frente al carbón, lignito y gas natural.

Figura 7. Comparación de las emisiones derivadas de la producción de 1 kWh con diferentes tecnologías a lo largo del ciclo de vida.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ecoinvent y Needs.

Tabla 1. Emisiones de los contaminantes más significativos producidos por energía eólica, carbón y gas natural y los beneficios del uso de energía eólica en comparación con carbón y gas natural.

	Emissions						Benefits		
	Onshore wind	Offshore wind	Average wind	Hard coal	Lignite	NGCC	vs coal	vs Lignite	vs NGCC
Carbon dioxide, fossil (g)	8	8	8	836	1060	400	828	1051	391
Methane, fossil (mg)	8	8	8	2554	244	993	546	2362	984
Nitrogen oxides (mg)	31	31	31	1309	1041	353	1278	1010	322
NMVOC (mg)	6	5	6	71	8	129	65	3	123
Particulates (mg)	13	18	15	147	711	12	134	693	-6
Sulfur dioxide (mg)	32	31	32	1548	3808	149	1515	3777	118

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ecoinvent y Needs.

La tabla 2 muestra las emisiones de diferentes fuentes renovables (eólica, solar fotovoltaica, solar térmica y biomasa) y de la nuclear. Los beneficios ambientales se muestran comparándolas con la energía eólica.

Tabla 2. Emisiones de los contaminantes más significativos producidos por energías renovables y nuclear y beneficios del uso de energía eólica frente a nuclear y otras renovables.

vs Nuclear	Emissions					Benefits			
	Average wind	Nuclear	Solar PV	Solar thermal	Biomass CHP	vs Nuclear	vs Solar PV	vs Solar thermal	vs Biomass CHP
Carbon dioxide, fossil (g)	8	8	53	9	83	0	45	1	75
Methane, fossil (mg)	8	20	100	18	119	12	92	10	111
Nitrogen oxides (mg)	31	32	112	37	814	1	81	6	784
NM VOC (mg)	6	6	20	6	66	0	14	1	60
Particulates (mg)	15	17	107	27	144	1	91	12	128
Sulfur dioxide (mg)	32	46	0	31	250	15	-31	-1	218

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ecoinvent y Needs.

2.3. Impactos locales y paisaje

El ACV permite el análisis de una actividad o proyecto a lo largo de todo el ciclo de vida recogiendo tanto los impactos como los beneficios a escala global. Sin embargo los impactos generados a escala local necesitan de otro tipo de metodología para su análisis. La evaluación de impacto ambiental (EIA) regulada a través de la Directiva europea 85/337/CEE y sus sucesivas modificaciones 95/11/CE y 2003/35/CE, permite evaluar, previo a la instalación de un proyecto, los posibles impactos potenciales, tanto directos como indirectos, que tendrá dicha actividad sobre el medio ambiente. Deberá también proponer medidas de reducción de los efectos negativos en caso de ser necesarias.

Los objetivos de la EIA son:

- Prevenir el daño sobre el medio ambiente y la salud de las personas. (Cautela y acción preventiva)
- Asegurar el desarrollo sostenible
- Preservar los recursos naturales y la diversidad de las especies
- Conservar la capacidad de reproducción del sistema como recurso fundamental de la vida

El impacto local directamente relacionado con el paisaje es el impacto visual. Está compuesto de dos vertientes, por un lado puede ser evaluado por métodos cualitativos o cuantitativos, pero por otro tiene un componente de percepción subjetivo, de tal manera que frente al mismo proyecto unas personas pueden percibirlo de manera totalmente positiva, mientras que otras pueden considerarlo negativo o molesto. Este carácter subjetivo en la percepción debe ser evaluado y tenido en consideración en la fase de planificación de un parque eólico para evitar futuros rechazos por parte de la población.

El propio concepto de paisaje es muy complejo y diverso, definido de distinta manera según la disciplina de la que proceda: geografía, arte, arquitectura, ciencias naturales, etc. Además el paisaje no es estático, sino que va cambiando, tanto de manera natural con la sucesión de especies, como debido a la influencia humana.

El impacto visual generado por los aerogeneradores instalados en el territorio viene derivado de su propia naturaleza. Son estructuras verticales sustentadas en una torre sobre

la que se asientan un número determinado de palas que giran con el viento. Son por lo tanto, puntos dominantes del paisaje que atraen la atención de los observadores de la zona. El impacto visual disminuye con la distancia de tal manera que el impacto va disminuyendo a medida que nos alejamos de los molinos.

Dentro de la Unión Europea, la mayor parte de los parques eólicos están obligados a realizar una EIA. La EIA deberá identificar, describir y valorar los efectos directos e indirectos de un proyecto eólico sobre el paisaje y proponer las medidas de mitigación necesarias.

A) Onshore.

Se han desarrollado numerosas metodologías para la valoración del impacto visual. Algunas de las técnicas habitualmente utilizadas incluyen los siguientes análisis (Stanton, 2005):

- Definición de las zonas de intrusión visual. Mapas que recogen las áreas desde las cuales el parque eólico es visto total o parcialmente de acuerdo con la topografía del terreno.
- Fotografías que registren el estado inicial del paisaje.
- Diagramas en los que se refleje la escala, la forma y la posición de los aerogeneradores en el futuro parque eólico
- Fotomontajes y video-montajes donde sea posible observar el terreno con el proyectado parque eólico instalado en el paisaje.

El grado de intrusión en el paisaje dependerá de diversas características:

- Topografía de la zona, vegetación, edificios o estructura artificiales existentes en el área.
- Características del propio parque eólico: tamaño, tipo, color y número de aerogeneradores; distribución de los molinos en el parque eólico, subestaciones eléctricas asociadas, líneas de transmisión, carreteras de acceso al parque eólico, etc. (SDC, 2005):
- Capacidad del observador en registrar las impresiones visuales.
- El desmantelamiento del parque eólico al finalizar su vida útil, restaura el paisaje prácticamente a las condiciones existentes antes de su realización, por lo el impacto visual generado no tiene carácter permanente. (SDC, 2005; Brusa, 2007).

Aunque el impacto visual es muy dependiente del propio emplazamiento en sí, sin embargo se han identificado preferencias en el diseño y características de los parques eólicos (Hecklau, 2005; Stanton, 2005; Tsoutsos *et al.*, 2006; Brusa y Lanfranconi, 2007):

- Tipo y tamaño de aerogeneradores similares en un parque eólico y en los adyacentes si los hubiera.
- Aerogeneradores de colores claros (gris, beige o blanco)
- Aerogeneradores tripalas
- Palas girando todas en la misma dirección.

- Pocos aerogeneradores y grandes generan menor impacto que muchos y pequeños.
- Paisajes llanos se encuadran mejor con parques eólicos en filas.
- Ajustar el diseño del parque de acuerdo a las peculiaridades del entorno.
- Ubicar el parque a una cierta distancia de las viviendas habitadas.
- Tendido eléctrico subterráneo.
- Colocar luces de señalización nocturna sólo en los aerogeneradores más expuestos que bordean el perímetro del parque eólico.

La evidencia disponible indica que la forma en que se desarrollan y gestionan los parques eólicos, así como el modo en que el público se implica en estos procesos, puede influir en las reacciones públicas ante nuevos proyectos eólicos en mayor medida que las meras características físicas o técnicas de la tecnología. Estos factores afectan de modo significativo a las relaciones entre las comunidades que van a acoger la tecnología, los promotores y las autoridades. No existen reglas fijas para la gestión de la aceptación social en cuestiones tecnológicas, pero la adecuada consideración de este tipo de elementos puede ayudar a promotores y autoridades a aprender de experiencias pasadas y a hallar mecanismos para mantener y ampliar el compromiso público con el desarrollo eólico.

B) Offshore

Los nuevos desarrollos de parques eólicos marinos presentan como principal diferencia, con respecto a los ubicados en tierra, el mayor tamaño de los aerogeneradores, lo que en principio podría suponer un mayor impacto visual. Sin embargo, el hecho de que se encuentren a mayor distancia con respecto a los observadores ubicados en la línea costera hace que en realidad disminuya.

Los factores que influyen en el impacto visual en offshore se resumen, de acuerdo con Wratten *et al*, 2005 en los siguientes:

- El paisaje y el tamaño del área a ocupar.
- El tamaño, materiales y color de los aerogeneradores.
- La distribución de los aerogeneradores y las estructuras asociadas.
- La forma, dimensiones y ubicación de las estructuras auxiliares tanto en tierra (torres de alta tensión, subestaciones, cables eléctricos, etc.) como en el mar (torres anemométricas y subestaciones).
- Barcos de transporte y mantenimiento.
- Embarcaderos y puertos usados por los barcos.
- Señalizaciones y luces de navegación.

La curvatura de la Tierra tiene una gran influencia en la parte del parque eólico que es visto desde tierra. Esto unido a las condiciones climatológicas (niebla o lluvia) hace que a una misma distancia el impacto visual que se genera varíe de un emplazamiento a otro.

La previsible concentración de desarrollos eólicos en los buenos emplazamientos costeros (buenas condiciones de viento y adecuada profundidad de las plataformas conti-

mentales) hará necesario el análisis de los impactos visuales acumulativos que surgirán para una mejor adecuación e integración en el paisaje. No se debe olvidar además que muchas de las zonas costeras con buenas condiciones para el desarrollo eólico offshore, muestran una alta calidad paisajística que es necesario preservar.

La aceptación social de los parques eólicos marinos, al igual que los ubicados en tierra, requiere de estudios específicos para cada emplazamiento concreto. La (limitada) evidencia empírica muestra que las actitudes hacia proyectos off-shore varían de un caso a otro, pero en términos generales oscilan entre neutral y favorable (Devine-Wright and Howes, 2010; Ladenburg, 2010). Un reciente estudio en Dinamarca, el país con mayor tradición en desarrollos off-shore (Kuehn, 2005; Ladenburg, 2008; Ladenburg in press) ha comparado las actitudes locales hacia proyectos on-shore y off-shore constatando que se tiende a preferir el off-shore sobre el on-shore. Los desarrollos en tierra se configuran como una solución aceptable para el público danés (solo un 25% se opone) pero hay mayor apoyo a la off shore (con sólo un 5% abiertamente en contra) Como ya se ha apuntado, la implicación de la población desde la fase de planificación es crucial para ir solventando los problemas que vayan apareciendo.

Como hemos visto, las consideraciones ambientales a las que debe de estar sujeta la energía eólica hacen que esta fuente pueda ser considerada como una alternativa efectiva, desde el punto de vista de la sostenibilidad, para mejorar el modelo energético actual.

A continuación, se analizará el papel de los sistemas de información geográfica en la integración de las energías renovables y sus posibilidades de cara a mejorar los parámetros medioambientales de las mismas.

3. SIG Y ENERGÍAS RENOVABLES

La mayor dispersión de las energías renovables en comparación con las fuentes convencionales y su fuerte vinculación con el territorio en el que se insertan, hace que su análisis, pueda y deba ser tratado a través de varias perspectivas, (económica, social, técnica, ambiental, etc.), todas ellas abordables mediante un Sistema de Información Geográfica, una potente herramienta de análisis geográfico capaz de ordenar y generar información para un conocimiento exhaustivo del territorio gracias a la implementación en él de funcionalidades de captura, consulta, gestión, análisis y salida de datos geográficos.

De todas ellas, las funciones de análisis son las que confieren a un SIG mayor potencialidad. Facilitan el procesado de datos permitiendo generar o extraer información no presente a simple vista, y realizar simulaciones de comportamiento basadas en modelos, lo cual supone una inestimable ayuda para la gestión del territorio.

No es de extrañar por tanto, dadas las características mencionadas, que la planificación se haya valido de esta herramienta en múltiples ocasiones, hecho extensible a la planificación energética, y concretamente, a la dirigida a las energías renovables, objeto del presente artículo, donde los SIG constituyen una importante herramienta que puede ser utilizada en cada una de las fases de implantación de dichas energías, desde su planificación y ubicación de zonas idóneas hasta su clausura.

En la actualidad la utilización de esta herramienta se encuentra principalmente vinculada al establecimiento de emplazamientos óptimos para la ubicación de energías renovables

en el territorio y por ende, a la señalización de las zonas no aptas para la implantación, así como a los estudios de electrificación rural.

En relación a la localización de zonas aptas, el SIG supone una herramienta fundamental, que permite identificar los mejores emplazamientos para una implantación sostenible de las energías renovables. Ello puede ser acometido mediante la elaboración de diferentes metodologías de análisis entre las que destacan aquellas basadas en la generación de modelos locacionales, simples o ponderados, que indican las zonas que más se aproximan al cumplimiento de unos criterios de aptitud previamente establecidos.

Son muchas las experiencias acumuladas en el uso de los SIG para la localización emplazamientos óptimos, (Baban y Parry, 2001; Voivontas *et al.*, 2001), si bien en el marco de la planificación española destaca el *Estudio Estratégico Ambiental del Litoral español para la instalación de parques eólicos marinos* (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2009), aprobado en abril de 2009, que determina las zonas del dominio público marítimo-terrestre que, sólo a efectos ambientales, reúnen condiciones favorables para la instalación de parques eólicos marinos. Constituye un mecanismo preventivo de protección del medio ambiente frente a un futuro despliegue de parques eólicos en el medio marino, diferenciando entre zonas aptas, aptas con condicionantes o zonas no aptas, en base al cumplimiento de una serie de criterios de protección de diferente índole.

Destaca también el *Informe Renovables 2050* (Domínguez Bravo *et al.*, 2005), como el análisis más detallado publicado hasta la fecha en nuestro país de escenarios de desarrollo de las distintas tecnologías renovables.

Proporciona unos techos de potencia y generación de estas tecnologías, reflejando de forma clara las diversas restricciones de disponibilidad de recurso energético, usos del suelo, ambientales (28% del territorio peninsular y en algunas comunidades autónomas llega a suponer el 40% de su territorio) y acoplamiento entre demanda y capacidad de generación y capacidad de transporte de la red eléctrica.

Mención especial debe realizarse respecto a la importancia de los SIG para la generación y análisis de la información relativa de dos de los criterios más importantes a tener en cuenta en la señalización de emplazamientos aptos: el recurso en sí (eólico, solar, biomasa, etc.) y la valoración del impacto en el paisaje.

En relación al análisis de los recursos, existen numerosas experiencias que valoran la disponibilidad de éstos en determinados territorios. Así por ejemplo, para el caso de la energía solar, el uso de los SIG ha resultado de gran utilidad para la estimación de la radiación solar potencial (en ausencia de nubosidad) mediante datos de topografía y latitud, a través de la construcción de modelos sensibles a las condiciones de exposición en cada punto del territorio y al ocultamiento topográfico. En este sentido destacan autores como Dubayah y Rich (1995), Becker (2001) o Gastli (2010).

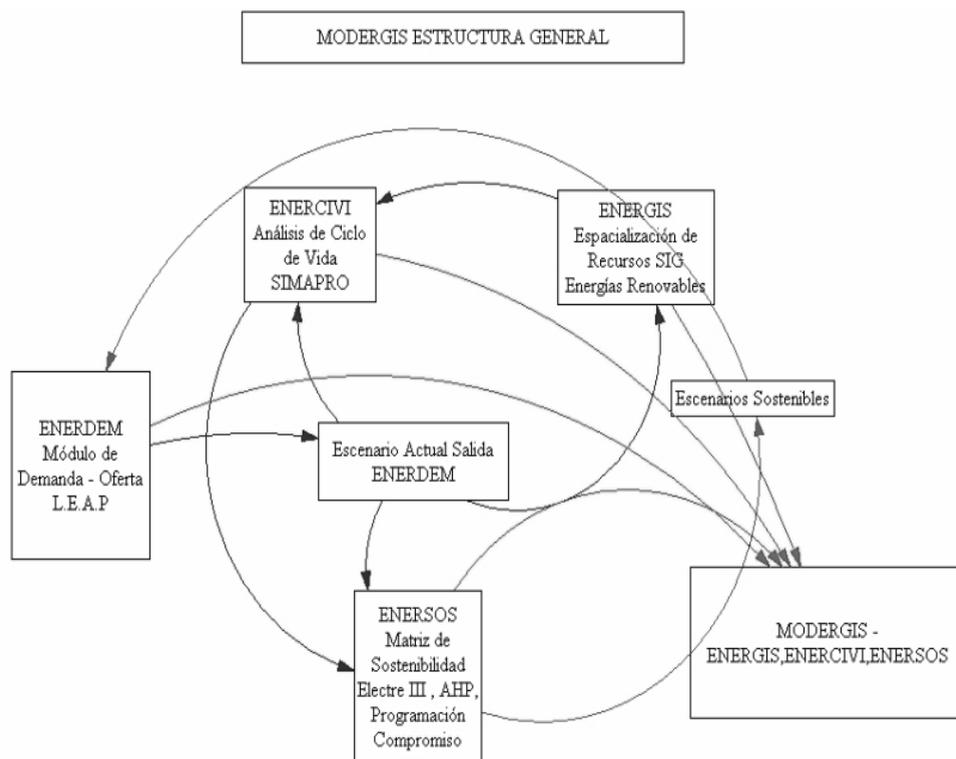
En el caso del paisaje, una correcta valoración del impacto paisajístico presumible de estas instalaciones requiere un conocimiento profundo del mismo y llegar a establecer el grado de afección que la actividad en cuestión supondría en ese sistema (Molina y Tudela, 2008). Los SIG, constituyen una magnífica herramienta para la realización de los análisis vinculados al paisaje, siendo capaces de realizar el cálculo de la fragilidad visual de cualquier punto del territorio, identificar las zonas visibles por un mayor número de observadores potenciales desde determinados lugares y realizar simulaciones y vistas en 3D de la futura

instalación en su entorno. Ello permite seleccionar aquellos lugares aptos para la implantación con menos porcentaje del territorio afectado por el impacto visual, donde la fragilidad visual es menor (tal y como se planteó en el apartado precedente).

Son muchas las experiencias existentes en el uso de los SIG en el marco de la planificación energética, si bien, entre dichas experiencias han predominando estudios sectoriales que se ajustan más a una visión técnica y económica, donde la evaluación del recurso constituye el objetivo principal que a una situación más ambiental y territorial, lo cual puede generar conflictos en el territorio y en las relaciones energía-medioambiente.

Entre las investigaciones que tratan de desarrollar mediante SIG procedimientos metodológicos de planificación energética y ambiental integral, que involucre entre otros elementos, los costos ambientales en los proyectos de energía renovable, destaca la planteada por Quijano (2009), donde se presenta el modelo MODERGIS desarrollado conjuntamente por la Universidad Nacional de Colombia y el CIEMAT de España. El modelo se conforma por tres bloques: ENERDEM modelo de oferta-demanda de energía, ENERSIG: espacialización e integración de energías renovables mediante los Sistemas de Información Geográfica y ENERSOS basado en métodos de análisis multiobjetivo tendentes a optimizar las dimensiones de la sostenibilidad de las fuentes energéticas (figura 7)

Figura 8. Flujos del modelo.



Fuente: Quijano 2009.

Por tanto, se deduce de lo anterior como la planificación energética focalizada a las renovables necesita incorporar información de naturaleza heterogénea, procedente de proyectos y administraciones de diversa índole: infraestructuras (eléctricas, viarias...), relacionados con el recurso (solar, eólico, biomasa, etc.), ambientales (presencia de espacios naturales protegidos, usos del suelo...), sociales, etc., ya sea de carácter administrativo, procedente de las imágenes satélite, fotografías aéreas o algunos de sus productos derivados.

Como hemos apuntado, las múltiples experiencias de desarrollo de SIG y energías renovables avalan la continuación de esta línea y la incorporación de enfoques más integrales que abarquen la mayoría de las variables implícitas en la planificación de las instalaciones renovables.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha tratado de esbozar una visión del impacto de las energías renovables en la promoción de un nuevo modelo energético más sostenible. En ese sentido, se ha abordado como ejemplo, la problemática ambiental de la energía eólica, tanto en sus características globales, en base a los estudios de su ciclo de vida (ACV), como en las peculiaridades locales, con especial atención a su evaluación de impacto ambiental e incidencia paisajística.

Para alcanzar una mayor y mejor integración (cuantitativa y cualitativa) de las energías renovables en general y de la eólica en particular, en orden a alcanzar un nuevo modelo energético, se ha analizado también el papel actual y futuro de los sistemas de información geográfica como herramienta holística que permite una visión integral del espacio y una toma de decisiones más objetiva.

Desde la perspectiva que nos ocupa, la combinación de herramientas SIG, con las consideraciones y estudios habituales en las diferentes disciplinas implicadas (ingeniería, economía, geografía, ambiente...), ayudará notablemente a la protección de nuestro patrimonio paisajístico minimizando las interrelaciones negativas con el imprescindible desarrollo de las energías renovables. Motor este último, no sólo de una mejora general de la calidad del medio ambiente, si no de nuestro tejido industrial y tecnológico, independencia energética, proyección al exterior y, no con menos importancia, del desarrollo local y regional de amplias extensiones de nuestro país hasta ahora muy deprimidas.

Para concluir, nos gustaría remarcar nuevamente dos cuestiones:

El SIG es una herramienta fundamental para la gestión del territorio focalizado a las energías renovables, implica numerosas ventajas que derivan en el perfeccionamiento de escenarios y en la localización de zonas aptas y por tanto, en la reducción de costes (tiempo y dinero), garantizando una mejor planificación y una mayor productividad para el sector.

A pesar de las numerosas experiencias encontradas en el manejo de SIG en este campo, queda patente la necesidad de desarrollar metodologías que integren todas las perspectivas de las energías renovables (social, económica, técnica y ambiental...) para que éstas puedan ser realmente una alternativa en un modelo energético sostenible.

Finalmente, y a modo de conclusión, nos gustaría remarcar que los SIG pueden actuar como herramienta integradora de ACV, estudios de paisaje y conseguir con ello una integración más efectiva y sostenible de las energías renovables.

BIBLIOGRAFÍA

- BABAN, S. M. J. y PARRY, T. (2001): "Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK". *Renewable Energy*, 24, Pp. 59-71.
- BECKER, S. (2001): "Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel". *International Journal of Climatology*, 21, Pp. 1561-1576.
- BRUSA, A. y LANFRANCONI, C. (2007): "Guidelines for realization of wind plants and their integration in the territory". *Proceedings of EWEC 2006*. Athens, Greece. 27th February to 2 March 2006. http://www.ewec2006proceedings.info/allfiles2/501_Ewec2006fullpaper.pdf.
- CASES (2008): "Cost assessment for sustainable energy systems" <http://www.feem-project.net/cases>
- DEVINE-WRIGHT, P. y HOWES, Y. (2010) "Disruption to place attachment and the protection of restorative environments: A wind energy case study". *Journal of Environmental Psychology*. 30, Pp. 271-280
- DOMINGUEZ, J., CASALS, X., LINARES, P. y LÓPEZ, O. (2005): "Renovables 2050. Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular". <http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/renovables-2050.pdf>
- DUBAYAH, R. y RICH P.M. (1995): "Topographic solar radiation models for GIS". *International Journal of Geographical Information Systems*. 9, Pp. 405-419.
- CHATAIGNERE, A y LE BOULCH, D. (2003): "Environmental and ecological life cycle inventories for present and future power systems in Europe" (ECLIPSE). EDF R&D. http://88.149.192.110/eclipse_eu/index.html.
- GASTLI, A. y CHARABI, A. (2010): "Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, Pp.790-797.
- HECKLAU, J. (2005): "Visual Characteristics of Wind Turbines. Proceedings of NWCC Technical Considerations in Siting Wind Developments". <http://www.nationalwind.org/events/siting/proceedings.pdf>.
- KUEHN, S. (2005): "Sociological investigation of the reception of Horns Rev and Nysted Offshore wind farms in the local communities". *ECON Analyse*, March 2005 <http://www.hornsrev.dk/Engelsk/Miljoeforhold/uk-rapporter.htm>.

- LADENBURG, J. (2008): "Attitudes towards on-land and offshore wind power development in Denmark; choice of development strategy". *Renewable Energy*. 33, Pp 111–118.
- LADENBURG, J. (2010): "Attitudes towards off shore wind farms—The role of beach visits on attitude and demographic and attitude relations". *Energy Policy*, 38, Pp 1297- 1304.
- LADENBURG, J. (in press): "Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience". *Applied Energy*.
- LAGO, C., PRADES, A. LECHÓN, Y., OLTRA, C., PULLEN, A. y AUER, H. (2009): "Part V. Environmental issues". *Wind Energy – The Facts*. Earthscan.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO (2009): "Estudio Estratégico Ambiental del Litoral español para la instalación de parques eólicos marinos". http://www.mityc.es/energia/electricidad/RegimenEspecial/eolicas_marinas/Paginas/estudioEstrategico.aspx.
- MOLINA, J. y TUDELA, M.L. (2008): "Elección de criterios y valoración de impactos ambientales para la implantación de energía eólica". *Papeles de Geografía*. 47-48, Pp. 171-183.
- NEEDS (2008): "RS 1a: Life cycle approaches to assess emerging energy technologies. Final report on onshore wind technology". <http://www.needs-project.org/>
- QUIJANO, R., DOMÍNGUEZ, J. y BOTERO, S. (2009): "Integración de las energías renovables en la generación distribuida, mediante la aplicación del Modelo de Planificación energética sostenible MODERGIS, basado el uso del SIG y análisis multicriterio de decisión". Aplicación - Colombia. *I Congreso de Generación Distribuida*. GENEDIS, Madrid, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- SDC (2005): "Wind power in the UK. A guide to the key issues surrounding onshore wind power development in the UK". Sustainable Development Commission (SDC). http://www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/Wind_Energy-NovRev2005.pdf.
- STANTON, C. (2005): "Visual Impacts. UK and European Perspectives. Proceedings of NWCC Technical Considerations in Siting Wind Developments". www.nationalwind.org/events/siting/proceedings.pdf.
- TSOUTSOS, T., GOUSKOS, Z., *et al.* (2006): "Aesthetic impact from wind parks". *European Wind Energy Conference EWEC*. Athens. http://www.ewec2006proceedings.info/allfiles2/805_Ewec2006fullpaper.pdf.
- WRATTEN, A. y MARTIN, S. (2005): "The Seascape and Visual Impact Assessment Guidance for Offshore Wind Farm Developers". Enviro Consulting and Department of Trade and Industry (DTI). <http://www.berr.gov.uk/files/file22852.pdf>.
- VESTAS (2005): "Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0MW turbines". <http://www.vestas.com/>.

VESTAS (2006): “Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines”. <http://www.vestas.com/>.

VOIVONTAS, D., ASSIMACOPOULOS, D y KOUKIOS, EG. (2001): “Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method”. *Biomass and Bioenergy*. 20, Pp.101-112.

