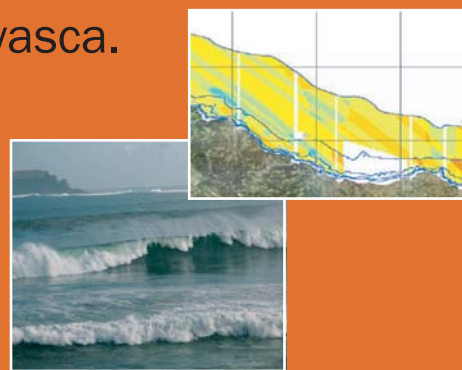




# 8

Atlas de energía del oleaje en la costa vasca.  
La planificación espacial marina como  
herramienta en la selección de zonas  
adecuadas para la instalación de  
captadores



Galparsoro I., P. Liria, I. Legorburu, P. Ruiz-Mínguela, G. Pérez, J. Marqués, Y. Torre-Enciso, M. González, 2008. Atlas de energía del oleaje. La planificación espacial marina como herramienta en la selección de zonas adecuadas para la instalación de captadores. '*Revista de Investigación Marina*'. 1: 9 pp.

La serie '*Revista de Investigación Marina*', editada por la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia, cuenta con el siguiente Comité Editorial:

**Editor:** Dr. Ángel Borja

**Adjunta al Editor:** Dña. Mercedes Fernández Monge e Irantzu Zubiaur (coordinación de las publicaciones)

**Comité Editorial:** Dr. Lorenzo Motos  
Dr. Adolfo Uriarte  
Dr. Michael Collins  
Dr. Javier Franco  
D. Julien Mader  
Dña. Marina Santurtun  
D. Victoriano Valencia  
Dr. Xabier Irigoien  
Dra. Arantza Murillas

La '*Revista de Investigación Marina*' de Tecnalia edita y publica investigaciones y datos originales resultado de la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia. Las propuestas de publicación deben ser enviadas al siguiente correo electrónico [aborja@pas.azti.es](mailto:aborja@pas.azti.es). Un comité de selección revisará las propuestas y sugerirá los cambios pertinentes antes de su aceptación definitiva.



Edición: 1.<sup>a</sup> Octubre 2008

© AZTI-Tecnalia

ISSN: 1988-818X

Unidad de Investigación Marina

Internet: [www.azti.es](http://www.azti.es)

Edita: Unidad de Investigación Marina de Tecnalia

Herrera Kaia, Portualdea

20010 Pasaia

Foto portada: © Alex Iturrate

# Atlas de energía del oleaje en la costa vasca. La planificación espacial marina como herramienta en la selección de zonas adecuadas para la instalación de captadores

Ibon Galparsoro<sup>\*a</sup>, Pedro Liria<sup>a</sup>, Irati Legorburu<sup>a</sup>, Pablo Ruiz-Minguela<sup>b</sup>, Germán Pérez<sup>b</sup>, Javier Marqués<sup>c</sup>, Yago Torre-Enciso<sup>c</sup>, Manuel González<sup>a</sup>

## Resumen

El análisis de la idoneidad de una zona para la captación de energía de las olas debe tener en cuenta una serie de factores, entre los que se encuentran los técnicos, los medioambientales y los socioeconómicos. El primer paso del desarrollo supone la recopilación de toda información susceptible de condicionar o influir en la toma de decisiones; siendo uno de los factores decisivos la evaluación del potencial energético teórico total, el potencial teórico accesible (eliminando las zonas en las que existan incompatibilidades para este tipo de instalaciones) y, por último, estimar de forma precisa cuánta energía sería factible producir con las tecnologías existentes. En este trabajo se presenta la metodología desarrollada con este propósito y basada en un Índice de Idoneidad (II), que representa la adecuación de diferentes emplazamientos para instalaciones de captación de energía del oleaje, su aplicación en la plataforma costera del País Vasco (entre la línea de costa y los 100 m de profundidad) y los resultados obtenidos en la estima de los potenciales energéticos, así como su distribución espacial.

## Introducción

Se estima que para estabilizar el clima de la Tierra y prevenir el calentamiento global se requiere la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 70% para el año 2050 (Flannery, 2005). Esta situación ha provocado la necesidad de diversificar y aumentar las fuentes de energía de carácter renovable (ej. Directiva 2001/77/EC para la promoción de electricidad producida a partir de recursos de energía renovable en el mercado Europeo interno; WEC, 2007a; CE, 2008; Lund and Mathiesen, 2008). Al mismo tiempo, las limitaciones espaciales a las que están sujetas las instalaciones de captadores de energía renovable en tierra (ej. solar y eólica), ha fomentado los estudios orientados al aprovechamiento energético del mar. Éstos se han realizado bien empleando las tecnologías ya maduras, como la eólica, o bien, a más largo plazo, desarrollando nuevas tecnologías como las de captación de la energía del oleaje (Tseng *et al.*, 2000; Pelc and Fujita, 2002; Vantorre *et al.*, 2004; Ivanova *et al.*, 2005; Falnes, 2007; Valério *et al.*, 2007; WEC, 2007b; Agamloh *et al.*, 2008a, b; Marine Coastal Community Network, 2008).

El recurso de energía del oleaje global en aguas profundas (zonas de más de 100 m de profundidad) se estima aproximadamente entre 1 - 10 TW (Panicker, 1976) y según el Consejo Mundial de la Energía (WEC, 2007b) la energía potencial explotable del oleaje es superior a 2 TW. En las zonas más someras, el oleaje pierde parte de su energía pero determinadas formas del fondo marino pueden provocar la concentración de energía del oleaje en las zonas cercanas a costa (Pousa *et al.*, 1995; Thorpe, 1999b). Por esta razón, la instalación de captadores y la transmisión de la energía a tierra en estas zonas es más viable. Además, se considera que, cuando los captadores existentes en la actualidad estén totalmente desarrollados, el recurso explotable oscilará entre 104 y 750 TWh/año (Wavenet, 2003), pudiendo llegar a alcanzar los 2.000 TWh/año (aproximadamente el 10% del consumo eléctrico mundial, con una inversión de 820 millones de € (Thorpe, 1999b)). Según Jones y Rowley (2002), el crecimiento de la industria de energía del oleaje puede alcanzar los 100 millones de dólares por año en 2010. Si se considera que la demanda eléctrica es de 1 TW (IEA, 2004), la energía del oleaje tiene un significativo potencial en la contribución de la demanda de energía global (Prest *et al.*, 2007).

La selección de las zonas más adecuadas para la instalación de captadores de energía del oleaje requiere la realización de una planificación espacial marina, con el objeto de optimizar la gestión de los derechos sobre el espacio marino y mantener una gestión ecosistémica sostenible de los océanos y los mares (Gill, 2005; Maes, 2008). Este tipo de análisis debe tener en cuenta una serie de factores que pueden englobarse en técnicos, medioambientales y socioeconómicos (Johnstone *et al.*, 2006; Nobre *et al.*, en prensa). El primer paso necesario para el estudio es la recopilación de toda información susceptible de condicionar o influir en la decisión de

<sup>a</sup> AZTI-Tecnalia, Itsas Ikerketa Saila - Departamento de Investigación Marina. Herrera kaia portualdea z/g, Pasaia. Tel: +34 943004800; Fax: +34 943004801; Correo electrónico: igalparsoro@pas.azti.es

<sup>b</sup> ROBOTIKER ENERGÍA, Tecnalia. Parque Tecnológico, Edificio 202. E-48170 Zamudio. Tel: +34 94 600 22 66, Fax: +34 94 600 22 99

<sup>c</sup> Energía Berriztagarrien Saila-Departamento de Energías Renovables. Edificio Albia I, San Vicente, 8 - Planta 14. 48001 Bilbao. Tel: +34 944035643; Fax: 944249733

instalar captadores de energía; especialmente en aquellos aspectos que supongan una incompatibilidad de usos, la inviabilidad de los trámites administrativos o la falta de rendimiento económico de la explotación. Los datos señalados anteriormente demandan un tratamiento que contemple su dimensión espacio-temporal y permita analizarlos en base a sus propiedades geográficas (localización, área, características, distancia, etc.). Teniendo esto en consideración, los Sistemas de Información Geográfica (también conocidos como GIS por sus siglas en inglés) son las herramientas más adecuadas para la integración, representación y análisis multicriterio de la información (Jankowski, 1995). Además, mediante el uso combinado de las herramientas GIS se puede facilitar mucho la localización de zonas idóneas para las instalaciones de captadores, ya que al obtener un mejor conocimiento de las características geográficas del entorno se pueden minimizar tanto los impactos ambientales de la zona como los costes de implantación y mantenimiento de las instalaciones (Prest *et al.*, 2007; Nobre *et al.*, en prensa).

Con todo ello, el objetivo de esta contribución es desarrollar un Atlas de Energía de las Olas en el País Vasco teniendo en cuenta todas las restricciones existentes: técnicas, medioambientales y socioeconómicas; de tal forma que se conozca cuál es el potencial energético accesible y cuál es el potencial energético técnicamente aprovechable mediante las tecnologías existentes. Este Atlas puede servir además como una herramienta con la que los promotores de este tipo de aprovechamiento energético puedan preseleccionar las ubicaciones que *a priori*, se consideran más adecuadas y realizar un estudio en detalle de dichas ubicaciones.

## Antecedentes

Los primeros Atlas del Oleaje desarrollados estaban orientados al cálculo del recurso energético. Según estos Atlas las zonas con mayor potencial de oleaje a escala mundial, serían las situadas entre las latitudes 30° y 60° tanto en el hemisferio norte como en el sur. Esto es debido en gran parte a que la acción del viento en estas zonas es mayor por lo que el tamaño y fuerza del oleaje también es elevada (Thorpe, 1999b).

El primer Atlas del Oleaje en Europa se denominó WERATLAS (Pontes *et al.*, 1996; Pontes, 1998). Este Atlas incluye información relativa al clima del oleaje anual y estacional de 85 puntos distribuidos en el Atlántico y el Mediterráneo. Posteriormente, el Atlas de los Recursos de Energías Renovables realizado en Reino Unido (ABPmer, 2004; Cooper *et al.*, 2006), proporcionó información relativa a la plataforma continental del Reino Unido a escala regional. El propósito de este estudio fue el generar una herramienta que pudiera ser empleada estratégicamente para seleccionar una determinada zona que *a priori*, pudiera ser válida y, posteriormente, realizar una serie de mediciones en aquellas zonas preseleccionadas.

Con la financiación de un proyecto europeo (MAST3) se desarrolló EUROWAVES (Barstow *et al.*, 2000); una herramienta prototipo para poder acceder de una forma fácil y fiable a la información relativa al clima del oleaje de la zona costera de Europa. En 2003 se generó el Atlas de la Energía del Oleaje de

Irlanda (ESBI, 2005) para el cual se estimó y mapeó, la media anual de la energía del oleaje teniendo en consideración aspectos teóricos, técnicos, prácticos y de accesibilidad.

Este trabajo se basó en el conocimiento previo de los factores que influyen en la escala y en la distribución de este recurso. Contextualiza la captación de la energía con otros usos del mar para facilitar la toma de decisiones y minimizar, en la medida de lo posible, las incompatibilidades con la explotación de otros recursos. Finalmente en Portugal, se desarrolló el ONDATLAS (Pontes *et al.*, 2005) con el objeto de calcular el recurso energético cerca de las costas.

La generación de toda esta información, además de aumentar el conocimiento a cerca de las ventajas de este tipo de extracción de energía, ha propiciado que en lugares con aparentemente menor potencial de energía de oleaje, como pueden ser el mar Báltico o el Mediterráneo, también se estén llevando a cabo investigaciones para la implantación de captadores (Ozdamar *et al.*, 2004; Bernhoff *et al.*, 2006).

En el País Vasco, el Ente Vasco de la Energía (EVE) está estudiando la viabilidad de la utilización de la energía de las olas. Para conocer el potencial del País Vasco en esta energía, el EVE encargó un atlas a la Universidad de Cantabria (UCA) (Mera, 2005). Este Atlas fue realizado en base a la propagación desde aguas profundas de los datos disponibles de la base de datos de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) hacia la costa del País Vasco. En este Atlas no se contempló ningún tipo de restricción, usos, u otra información adicional, por lo que se limitó a la estimación del recurso bruto sin entrar a valorar el potencial energético accesible. En la actualidad, existen varios proyectos en colaboración entre EVE y Comisión Europea para la captación de energía maremotriz en Mutriku: NEREIDA MOWC y WAVEPLAM (IEA-OES, 2007; Villate, 2008). Esta planta está situada en la costa, por lo que a medida de que se vayan desarrollando los sistemas captadores, se intentará realizar la instalación en zonas más profundas donde la energía de las olas es mayor y lograr así, un mayor aprovechamiento energético.

## Localización y características generales del oleaje

La zona de estudio comprende la plataforma continental vasca desde la isóbata de 10 m hasta los 100 m de profundidad y cubre una superficie de 936 km<sup>2</sup> (Figura 1). Está limitada por Francia en su vertiente oriental (1° 46' 50" W) y la comunidad autónoma de Cantabria en su vertiente occidental (3° 9' 13" W). La longitud total de la costa es aproximadamente de 150 km.

El clima del oleaje en la costa cantábrica está directamente relacionado con su posición geográfica en el contexto del golfo de Vizcaya y del Atlántico nordeste. Por su orientación y posición respecto a los centros de las borrascas que se forman en la zona de transición entre las altas presiones del anticiclón de las Azores y las bajas presiones subárticas, la costa vasca está expuesta a grandes "fetches" (recorrido, sin obstáculos, del viento en el mar) que alcanzan distancias del orden de 1.500 km desde el centro de las borrascas que se sitúan frecuentemente entre el noroeste de las Islas Británicas e Islandia (González *et al.*, 2004)

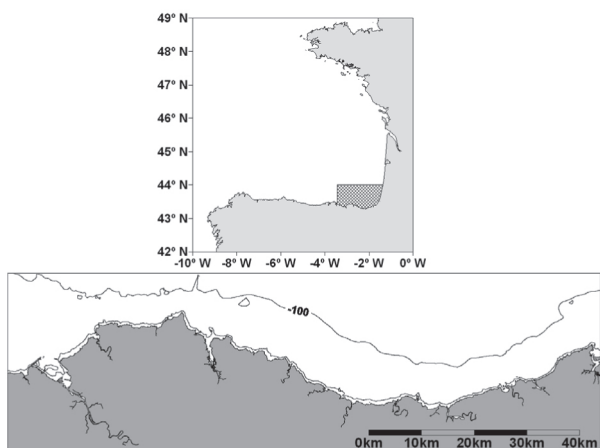


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

La plataforma continental vasca está expuesta a un amplio rango de estados de la mar posibles, tanto referido a altura de la ola ( $H_s$ , altura de ola significativa, media del tercio de olas más altas dentro de un registro), como de período de pico ( $T_p$ , período para el cual la función de densidad espectral alcanza su máximo valor). La altura significativa media anual, en mar abierto, según los datos de la boya exterior de Bilbao-Vizcaya, de la red de Puertos de Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)), se sitúa en torno a los 2 m, pero durante eventos extremos puede llegar a superar los 10 m, con un período de retorno de 50 años. Los períodos de ola del régimen medio registrados en la zona comprenden desde 4 hasta 22 s, siendo los más frecuentes entre 8 y 12 s (Castaing *et al.*, 1995). El estudio estadístico de direcciones de ola pone de manifiesto una predominancia de olas tipo *swell* (oleaje de largo período) del sector noroeste (25%), coincidiendo éstas con las olas de mayor tamaño en la zona. El 77% de las olas proviene del cuarto cuadrante (González *et al.*, 2004).

Estos valores del régimen medio de oleaje en términos de flujo de energía en mar abierto, representan un valor medio de 24 kW por metro lineal de frente de ola, o lo que es lo mismo, aproximadamente 210 MWh anuales.

## Cálculo del Índice de Idoneidad (II)

Con el objeto de establecer las zonas más adecuadas para la instalación de captadores de energía de las olas, se establecieron unos criterios con los que se determinó un Índice de Idoneidad (II). Este Índice fluctúa entre el valor 0 para las zonas no aptas (áreas coincidentes con factores excluyentes), y un máximo de 100 (zona de mayor potencia del oleaje incidente y sin conflictos con otros factores).

Las herramientas GIS empleadas fueron ArcView 3.2 con extensión Spatial Analyst y ArcGIS 8.1 con extensión 3D Analyst; ambas versiones pertenecientes a la compañía ESRI. La hipótesis de partida fue que toda la zona submareal de la costa del País Vasco desde 10 m hasta los 100 m de profundidad respecto a la bajamar viva equinoccial, era susceptible de poder acoger cualquier tipo de captador de energía de las olas. Por el contrario, los estuarios

fueron descartados como lugares aptos para la instalación de este tipo de infraestructuras (Figura 1).

El valor del Índice se calculó a partir del análisis espacial de todos los factores considerados en el proyecto. Los factores, agrupados en medioambientales, técnicos y socioeconómicos, fueron clasificados a su vez, en limitantes o excluyentes. Se integraron todos los factores excluyentes en una única capa booleana, de 0 ó 1, es decir, excluyentes (capa excl., en la fórmula) o no excluyentes, y se generaron el resto de capas, una por factor limitante (capas lim., en la fórmula), con un rango de valores variables espacialmente entre 0 y 1, relativo a la influencia de dicho factor. Así, el valor del II final se obtiene operando con las capas en las que se había dado valor a las distintas áreas afectadas. La operación final se podría representar del siguiente modo:

$$II = \left( \frac{\sum(\text{capas lim.})}{n^\circ \text{ capas lim.}} \right) \times \text{capa excl.} \times 100$$

## Aspectos técnicos

A continuación se describen los criterios de valoración de las capas de información relativas a los aspectos técnicos que fueron considerados.

- Zonas de fondeo y canal de acceso al puerto de Bilbao. Zona excluyente.
- Zona de fondeo y canal de acceso al puerto de Pasajes. Excluyente.
- El resto de puertos de la costa vasca son de menor entidad que los citados anteriormente y no tienen ninguna regulación marítima en plataforma. Por todo ello se consideró un canal de acceso de 500 m de ancho que se clasificó como excluyente.
- Cables submarinos en el lecho marino. Excluyente el trazado de los cables submarinos con una anchura de 500 m.
- Conducciones submarinas. Se consideraron 250 m a cada lado de la construcción como zona excluyente. Las conducciones que fueron identificadas son:
  - o Cables submarinos en Bilbao
  - o Conducción a la plataforma Gaviota
  - o Toma de agua de la piscifactoría de Zumaia
  - o Emisario submarino de Zarautz
  - o Emisario submarino de San Sebastián
  - o Emisario submarino de Atalerreka
- Zonas de vertido de material de dragado. Excluyentes.
- Zonas de extracción de áridos. Solamente el arenal situado en la cala Asabaratz (Pasajes) está definida para tal uso. Fue considerada excluyente.
- Flujo de energía del oleaje. Se trata de una malla que cubre toda la zona de estudio. La distribución del flujo fue calculada a partir de los datos puntuales del Atlas realizado por la Universidad de Cantabria (Mera, 2005) y se calculó la malla del módulo y dirección del flujo medio anual. Los valores fueron transformados en un índice

fluctuante entre 0 y 1. El flujo medio de energía por metro de anchura de frente de ola en la zona de estudio varía entre 8,24 y 27,09 kW. El Índice fue calculado dividiendo directamente el valor del flujo en cada punto de la malla por el máximo, por lo que varía entre 0,3 (menor energía) y 1 (mayor energía).

- Tipo de fondo. La información existente cubre toda la plataforma continental entre los 5 m y 50 m de profundidad (Iberinsa, 1990, 1992). Se distinguen los tipos de fondo de arena y roca. A los fondos sedimentarios se les asignó un valor de Índice de 1 mientras que los fondos rocosos fueron considerados como limitantes asignándoles un valor de Índice de 0,5. En cuanto a la superficie de la zona de estudio en la que no existía información de tipos de fondo se le asignó un valor de 0,5 con el objeto de penalizar significativamente la falta de información.
- Distancia a los puertos de Pasajes y Bilbao. Se generó una única capa con valores ponderados entre 0 y 1 que representa la distancia mínima de cada punto de la zona de estudio respecto al puerto más cercano. La distancia máxima es de 49 km, y la mínima es 0 (en las bocanas). El Índice se estimó con la fórmula  $(50 - \text{distancia})/50$  por lo que el Índice de distancia varía linealmente entre 1 (bocanas) y 0,02 (punto distante 49 km).

### Aspectos medioambientales

En cuanto a los aspectos medioambientales, fueron considerados, entre otros, aquellas zonas o figuras amparadas por la legislación o algún tipo de normativa. Son los siguientes:

- Espacios Naturales Protegidos: Sólo se tuvo en cuenta el biotopo protegido de Gaztelugatxe (Decreto 229/1998, de 15 de septiembre, por el que se declara Biotopo protegido el área de Gaztelugatxe). Abarca zona submareal hasta los 6,7 m de profundidad. Fue considerada como zona excluyente.
- Afección de los captadores de energía a la dinámica sedimentaria y morfología de las playas. Para establecer el área de influencia, se consideraron todas las playas costeras y la zona de afección fue delimitada considerando la malla de módulo y dirección del flujo de oleaje en la plataforma continental. Fue asignado un Índice de 0,5.
- Plan Territorial Sectorial del Litoral. Aunque en la fecha en la que se realizó el estudio no estaba oficialmente aprobado, se tuvo en consideración, dado que su publicación era, previsiblemente, inminente.
- Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del tramo litoral Deba-Zumaia (ORDEN de 14 de junio de 2006). Fue considerado como zona excluyente.
- ZEP (Zonas de Especial Protección). Si bien su aprobación definitiva no estaba realizada, se consideró como un factor excluyente. Fue tomada la extensión definida en la última actualización realizada en 2003 y que comprendía el tramo costero entre el Cabo Ogoño y Gaztelugatxe (Código ZEP: ES0000144).

- LIC (Lugares de Interés Comunitario). Son espacios propuestos para su asignación como ZEP. Se consideró la zona de Moilarrri en Zarautz (código LIC: ES2120009) además de el tramo costero comprendido entre Punta Mompás (en San Sebastián) y el Cabo de Higer (Hondarribia), cuyo nombre LIC es Jaizkibel (código LIC: ES2120017). En ambos casos, comprenden la zona terrestre a partir de la línea de costa por lo que la zona submarina no estaría afectada. La instalación de captadores se consideró viable a partir de los 10 m de profundidad por lo que existiría una zona de amortiguación entre el límite del LIC y la zona apta para la instalación. Por tanto, no se trataban de aspectos excluyentes para el propósito de este proyecto.

### Aspectos socioeconómicos

Ninguna de las capas relativas a los aspectos socioeconómicos fue considerada como excluyente.

- Pesca: Si bien toda la costa vasca puede ser considerada como zona de pesca, existen algunas zonas en las que esta actividad se ejerce de forma tradicional. Principalmente se refieren a la pesca artesanal: palangre, "pintxo" y nasas. Les fue asignado un valor 0,5.
- Zonas de *Gelidium sesquipedale*. Se trata de un alga roja de interés económico. Se localiza sobre fondos rocosos hasta una profundidad máxima de aproximadamente 20 m (Borja, 1987, 1988). El valor de Índice asignado fue de 0,5.
- Zonas de baño. Coinciden principalmente con las playas y por tanto, la afección a este uso fue contemplada en la capa de afección de los captadores de energía a la dinámica sedimentaria y morfología de la costa. Valor de Índice: 0,5.

### Resultados

Los mayores valores medios de energía del oleaje accesible y normal a las batimétricas de 30, 60 y 100 m se localizan en los tramos orientados hacia el oeste (dirección de procedencia del *swell*), donde la potencia anual llega a alcanzar un valor máximo de 220 MWh/ml (Figura 2).

La distribución del II en la costa vasca indica que las zonas más adecuadas para la instalación de captadores de energía del oleaje se encuentran en los tramos costeros entre Bilbao y el cabo Matxitxako y entre Orio y el cabo Higer. La presencia de valores de II más altos en estas zonas es debido principalmente a que se trata de las zonas que reciben mayor cantidad de energía del oleaje. Se observa que las áreas con un mismo valor de II están muy fraccionadas. La existencia de mayores zonas excluyentes en las zonas someras es debida principalmente, a restricciones de navegación y acceso a los puertos, así como a zonas amparadas por la legislación ambiental (Figura 3 y Tabla 1).

**Tabla 1** Potencia total teórica distribuida por profundidades (potencia normal a la batimétrica) y valor de II.

Índice	30 m		60 m		100 m	
	Potencia anual TWh	% respecto al total	Potencia anual TWh	% respecto al total	Potencia anual TWh	% respecto al total
0	3,73	28,18	1,43	10,66	0,66	5,56
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
40	0,05	0,38	0,11	0,78	0	0
45	0	0	0	0	0	0
50	0,19	1,42	0,38	2,86	0	0
55	0,04	0,27	0,15	1,12	0,49	4,12
60	1,39	10,50	1,49	11,13	0,78	6,53
65	0,25	1,86	1,99	14,86	1,07	8,95
70	1,69	12,75	2,14	16,01	3,47	29,08
75	1,93	14,55	3,22	24,05	2,18	18,30
80	2,83	21,40	2,18	16,31	3,28	27,46
85	0,61	4,57	0,30	2,23	0	0
90	0,55	4,13	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>13,24</b>	<b>100</b>	<b>13,39</b>	<b>100</b>	<b>11,94</b>	<b>100</b>
<b>Accesible</b>	<b>9,48</b>	<b>72</b>	<b>11,95</b>	<b>89</b>	<b>11,28</b>	<b>94</b>

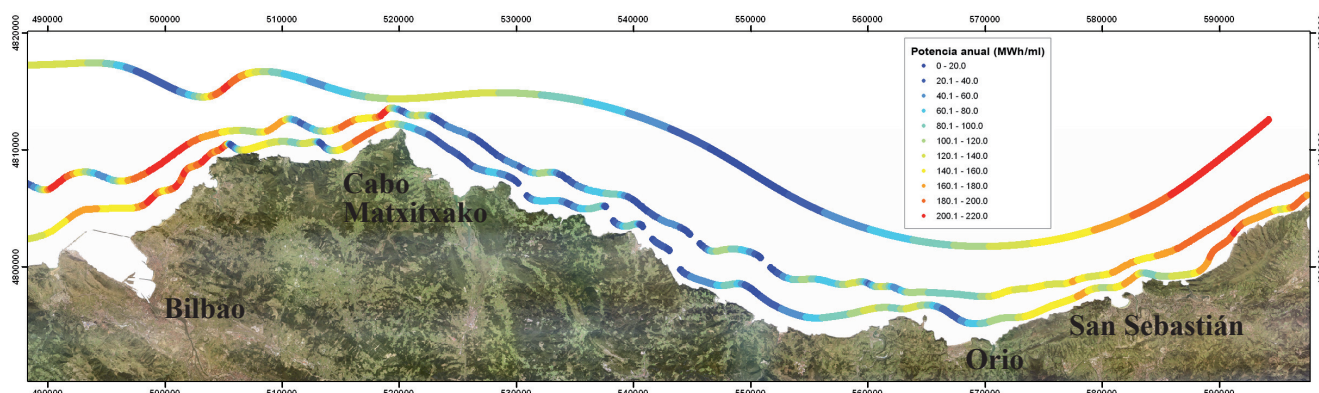
Sin embargo, los valores de II más altos se encuentran en mayor medida en las zonas someras. Esto se debe a que las zonas más profundas, en general, son menos accesibles y menos conocidas,

por lo que la instalación de una infraestructura de captación requerirá un esfuerzo mayor. Por todo ello, las zonas más idóneas se encuentran mayoritariamente en los tramos de costa más expuestos y en profundidades medias de 60 m.

**Tabla 2.** Superficie ocupada por cada uno de los valores de Índice y porcentaje respecto a la superficie total de la zona de estudio.

Valor del Índice	Área (km2)	% respecto al total de la zona de estudio
0	161	16
40	3	0
45	1	0
50	32	3
55	56	5
60	99	10
65	142	14
70	186	18
75	120	12
80	169	16
85	46	5
90	6	1
95	2	0
<b>TOTAL</b>	<b>1.025</b>	<b>100</b>

El II estimado indica que el 16% de la superficie de la costa vasca corresponde a zonas incompatibles mientras que, el 75% tiene valores del Índice entre 60 y 85. En la Tabla 2 puede verse el área correspondiente a diferentes valores del II. Con todo ello, el potencial energético anual a lo largo de toda la costa vasca, en profundidades medias de 30, 60 y 100 m equivale a 13,24; 13,39 y 11,94 TWh respectivamente; mientras que el potencial accesible para las mismas isóbatas equivale a 9,48; 11,95 y 11,28 TWh (ver Tabla 3).



**Figura 2.** Potencia anual por metro accesible que atraviesa perpendicularmente las batimétricas de 30, 60 y 100 metros.

**Tabla 3.** Potencial energético anual del oleaje en la costa vasca a 30, 60 y 100 metros de profundidad.

Profundidad	Energía teórica total (TWh)	Energía teórica accesible (TWh)
30 m	13,24	9,48
60 m	13,39	11,95
100 m	11,94	11,28

La potencia anual total por cada uno de los valores de Índice y su intersección con las batimétricas de 30 m, 60 m y 100 m, indica que las zonas excluyentes (valor de Índice 0) representan aproximadamente un 28%, 11% y 6% respecto a la longitud total de dichas batimétricas, respectivamente. Estos valores ponen de manifiesto, como era de esperar, una mayor presencia de actividades no compatibles con instalaciones (*offshore*) en zonas más someras. Estas actividades están relacionadas principalmente con la navegación, acceso a puertos y fondeaderos.

Suponiendo que se ocupara la totalidad de la costa vasca no afectada por incompatibilidades y para el rendimiento estimado de las tecnologías de captación más avanzadas actualmente, en cuanto a su estado de desarrollo, se podría generar una energía equivalente entre el 7% y el 10% de la demanda eléctrica total de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), o entre un 37% y un 50% del consumo eléctrico de los hogares de la CAPV; lo que podría evitar la emisión de 0,96 a 1,54 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## Discusión

Los resultados obtenidos dan una idea aproximada del potencial energético de la costa vasca y las ubicaciones más adecuadas para instalación de captadores. Debe tenerse en consideración que la naturaleza de cierto tipo de información ha requerido realizar una serie de suposiciones, lo que da lugar a cierta incertidumbre en los cálculos. Por tanto, no se deben tomar los resultados numéricos

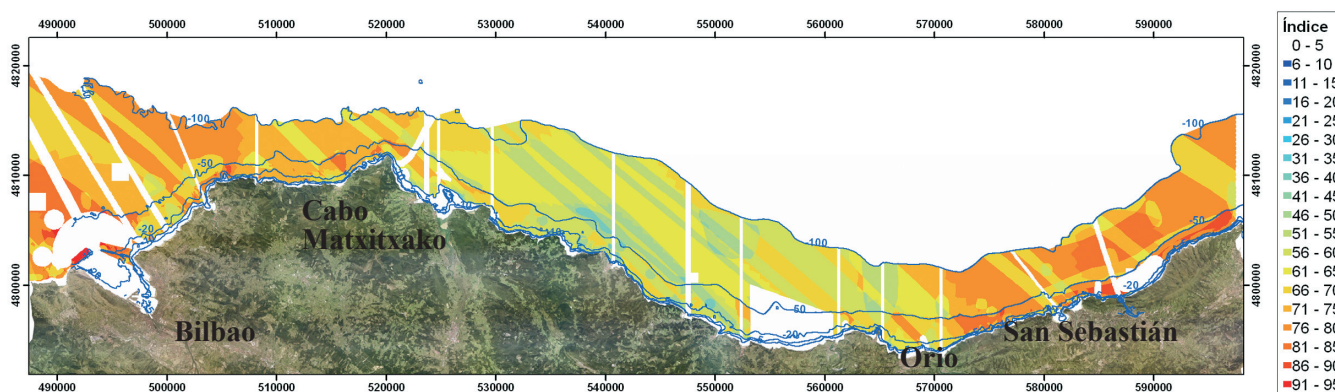
como exactos, sino más bien considerarlos como una aproximación adecuada a la escala geográfica del estudio (entre 5 y 15 km de resolución).

La selección final de una zona apta para la instalación de captadores de energía del oleaje—requiere realizar un estudio integral en el que se realice un cálculo preciso de la energía extraíble mediante estudios del oleaje y meteorológicos, selección de los captadores más adecuados y sus rendimientos; además de estudios que determinen la posibilidad técnica de su instalación: batimetría, tipos de fondo, litología, geomorfología, geofísica, etc.

También deben tenerse en consideración la compatibilidad entre otros usos tales como la pesca o usos lúdicos. Por otra parte, a pesar de que este tipo de captación de energía no emita ningún gas de efecto invernadero, puede provocar una serie de impactos ambientales (cambios en el régimen hidrodinámico de la zona o ruidos que afecten a la fauna presente), económicos (estas instalaciones necesitan de grandes inversiones económicas además de que pueden suponer un peligro para la navegación) o paisajísticos (Thorpe, 1999a).

Dado el estado actual de la tecnología de los captadores, la estrategia inicial debería ser hacia la selección de las zonas de mayor potencial energético, ya que el rendimiento de estos dispositivos todavía no es el óptimo. Con el futuro desarrollo de los convertidores, su rendimiento aumentará y se podrán aprovechar mejor los recursos energéticos en zonas de menor incidencia del oleaje. Así, se recomienda un desarrollo por fases, que a grandes rasgos sería como sigue:

- Primera fase: zonas con gran exposición al oleaje, idóneas también para la instalación de captadores de energía de las olas en función del resto de factores. El potencial energético accesible de estas zonas representa un 34,6% del potencial energético técnico total de la batimétrica de 60 m. Esto se traduce en una generación de energía (rendimiento estimado de las tecnologías de captación más avanzadas actualmente) equivalente a un valor entre un 13% y un 17% del consumo doméstico del País Vasco (entre 127.000 y 169.000 familias).



**Figura 3.** Distribución espacial del Índice de Idoneidad.



- Segunda fase: zonas con la misma orientación geográfica y en las proximidades de las anteriores, pero a profundidades mayores y por lo tanto, menos accesibles (cercanas a los 100 m). En este caso, el potencial energético accesible representa un 15,2% del potencial energético técnico total. Esto se traduce en una generación de energía (rendimiento estimado de las tecnologías de captación más avanzadas actualmente) equivalente a entre un 5,6% y un 7,6% del consumo doméstico de la CAPV (entre 57.500 y 75.500 familias).
- Tercera fase: ubicaciones en las que la exposición al oleaje no es muy elevada, pero que tienen la ventaja de estar en zonas en las que apenas hay restricciones por otros usos, por lo que la facilidad para instalar los captadores sería importante. El potencial energético accesible de estas zonas representa un 3,9% del potencial energético técnico total de la batimétrica de 60 m. Esto se traduce en una generación de energía (rendimiento estimado de las tecnologías de captación más avanzadas actualmente) equivalente a entre un 1,4% y un 2% del consumo doméstico de la CAPV (entre 15.000 y 18.000 familias).

## Conclusiones

La estimación de la distribución del flujo de la energía del oleaje y la aplicación de un análisis espacial multicriterio mediante la asignación de criterios objetivos a cada uno de los factores analizados, ha permitido obtener como resultado un Índice de Idoneidad. Este Índice representa la distribución espacial de la adecuación de cada zona para la instalación de captadores de energía del oleaje. Gracias a esto se ha podido estimar que el potencial energético anual máximo accesible equivale a 2 TWh en profundidades próximas a 60 m.

El resultado obtenido puede considerarse de gran interés como herramienta en la toma de decisiones por parte de las administraciones; si bien la instalación de captadores requerirá estudios específicos de las zonas preseleccionadas con el objeto de optimizar los aspectos técnicos y minimizar el impacto sobre los ecosistemas y el medio marino en general.

## Agradecimientos

El presente estudio ha podido ser llevado a cabo gracias a la financiación del Ente Vasco de la Energía.

Esta es la contribución nº 428 de la Unidad de Investigación Marina de AZTI-Tecnalia.

## Referencias

- ABPmer, 2004. Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources: Technical Report. Department of Trade and Industry. 38 pp.
- Agamloh, E. B., A. K. Wallace and A. von Jouanne, 2008a. Application of fluid-structure interaction simulation of an ocean wave energy extraction device. *Renewable Energy*. 33, (4), 748-757.
- Agamloh, E. B., A. K. Wallace and A. von Jouanne, 2008b. A novel direct-drive ocean wave energy extraction concept with contact-less force transmission system. *Renewable Energy*. 33, (3), 520-529.
- Barstow, S., G. A. Athanassoulis and L. Cavaleri, 2000. EUROWAVES; Integration of data from many sources in a user-friendly software package for calculation of wave statistics in European coastal waters. *OCEANOLOGY International* 2000, Brighton, UK. 269-277.
- Bernhoff, H., E. Sjöstedt and M. Leijon, 2006. Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the Baltic Sea. *Renewable Energy*. 31, (13), 2164-2170.
- Borja, Á. 1987. Cartografía, evaluación de la biomasa y arribazones del alga *Gelidium sesquipedale* (Clem.) Born. et Thur. en la costa guipuzcoana (N España). *Investigación Pesquera*. 51, 199-224.
- Borja, Á. 1988. Cartografía y evaluación de la biomasa del alga *Gelidium sesquipedale* (Clem.) Born. et Thur. 1876 en la costa vizcaína (N. de España). *Investigación Pesquera*. 52, 85-107.
- Castaing, P., J. Carbonne, M. Cremer, J. M. Froidefond, S. Heussner, J. M. Jouanneau, O. Miller, B. Thomas, V. Valencia and O. Weber, 1995. Variaciones de las corrientes en el cañón del Cap-Ferret (Golfo de Vizcaya) entre 1989-1991, *Actas del IV Coloquio Internacional sobre Oceanografía del Golfo de Vizcaya*. 73-82.
- CE, 2008. La lucha contra el cambio climático: La Unión Europea lidera el camino. Comisión Europea. 24 pp.
- Cooper, B. S., C. L. Hinton, N. Ashton, A. Saulter, C. Morgan, R. Proctor, C. Bell and Q. Huggett, 2006. An introduction to the UK marine renewable atlas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*. 159, (1), 1-7.
- ESBI, 2005. Accessible Wave Energy Resource Atlas : Ireland: 2005. 33 pp.
- Falnes, J., 2007. A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*. 20, (4), 185-201.
- Flannery, T., 2005. *The Weather Makers*. Text Publishing, Melbourne, Australia.
- Gill, A. B., 2005. Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology*. 42, (4), 605-615.
- González, M., A. Uriarte, A. Fontán, J. Mader and P. Gyssels, 2004. Marine Dynamics. *Oceanography and Marine Environment of The Basque Country*. A. Borja and M. Collins, Elsevier Oceanography Series. *Marine Pollution Bulletin*. 50, 133-158.
- Iberinsa, 1990. Estudio geofísico marino entre la frontera Francesa y Ondárroa. Realizado para el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Iberinsa, 1992. Estudio geofísico de la costa de Bizkaia. Realizado para el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. Dirección General de Costas.
- IEA, 2004. Key World Energy Statistics. OECD/IEA. Paris. 82 pp.
- IEA-OES, 2007. IEA-OES Annual report 2007. 80 pp.
- Ivanova, I. A., H. Bernhoff, O. Ågren and M. Leijon, 2005. Simulated generator for wave energy extraction in deep water. *Ocean Engineering*. 32, (14-15), 1664-1678.
- Jankowski, P., 1995. Integrating Geographical Information-Systems and Multiple Criteria Decision-Making Methods. *International Journal of Geographical Information Systems*. 9, (3), 251-273.
- Johnstone, C. M., K. Nielsen, T. Lewis, A. Sarmiento and G. Lemonis, 2006. EC FPVI co-ordinated action on ocean energy: A European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems. *Renewable Energy*. 31, (2), 191-196.
- Jones, A. T. and W. Rowley, 2002. Economic forecast for renewable ocean energy technologies. *Marine Technology Society Journal*. 36, (4), 85-90.
- Lund, H. and B. V. Mathiesen, 2008. Energy system analysis of 100% renewable energy systems--The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy*. In Press, Corrected Proof, 8.
- Maes, F., 2008. The international legal framework for marine spatial planning. *Marine Policy*. 32, (5), 797-810.
- Marine Coastal Community Network, M., 2008. WAVES 14(1). Australian Government., 32 pp.
- Mera, F. L., 2005. Análisis del oleaje como recurso energético en la costa Vasca. pp.

- Nobre, A., M. Pacheco, R. Jorge, M. F. P. Lopes and L. M. C. Gato, In press. Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment. *Renewable Energy*. In Press, Corrected Proof,
- Nobre, A., M. Pacheco, R. Jorge, M. F. P. Lopes and L. M. C. Gato, In Press. Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment. *Renewable Energy*.
- Ozdamar, A., K. T. Gursel, G. Orer and Y. Pekbey, 2004. Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: by the example of Cesme-Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 8, (6), 581-592.
- Panicker, N. N., 1976. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves. *Proceedings of Wave and Salinity Gradient Workshop*, Newark, Delaware, USA. 1-48.
- Pelc, R. and R. M. Fujita, 2002. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*. 26, (6), 471-479.
- Pontes, M. T., 1998. Assessing the European wave energy resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the Asme*. 120, (4), 226-231.
- Pontes, M. T., R. Aguiar and H. O. Pires, 2005. A nearshore wave energy atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 127, (3), 249-255.
- Pontes, M. T., G. A. Athanassoulis, S. Barstow, L. Cavaleri, B. Holmes, D. Mollison and H. Oliveira-Pires, 1996. An atlas of the wave-energy resource in Europe. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 118, (4), 307-311.
- Pousa, J. L., W. C. Dragani, C. A. Mazio and N. W. Lanfredi, 1995. La energía oceánica en el Atlántico sudoccidental posibilidades e impacto ambiental. *Thalassas*. 11, 59-72.
- Prest, R., T. Daniell and B. Ostendorf, 2007. Using GIS to evaluate the impact of exclusion zones on the connection cost of wave energy to the electricity grid. *Energy Policy*. 35, (9), 4516-4528.
- Thorpe, T. W., 1999a. A Brief Review of Wave Energy. The UK Department of Trade and Industry. 187 pp.
- Thorpe, T. W., 1999b. An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs, Wave Power - Moving Towards Commercial Viability. IMECHE Seminar, London, UK. 16.
- Tseng, R.-S., R.-H. Wu and C.-C. Huang, 2000. Model study of a shoreline wave-power system. *Ocean Engineering*. 27, (8), 801-821.
- Valério, D., P. Beirão and J. Sá da Costa, 2007. Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing. *Ocean Engineering*. 34, (17-18), 2330-2344.
- Vantorre, M., R. Banasiak and R. Verhoeven, 2004. Modelling of hydraulic performance and wave energy extraction by a point absorber in heave. *Applied Ocean Research*. 26, (1-2), 61-72.
- Villate, L., 2008. NEREIDA MOWC. IEA-OES Newsletter. (10),
- Wavenet, 2003. Final report of the European Thematic Network on Wave Energy. pp.
- WEC, 2007a. Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050. 87 pp.
- WEC, 2007b. Survey of Energy Resources. 600 pp.

