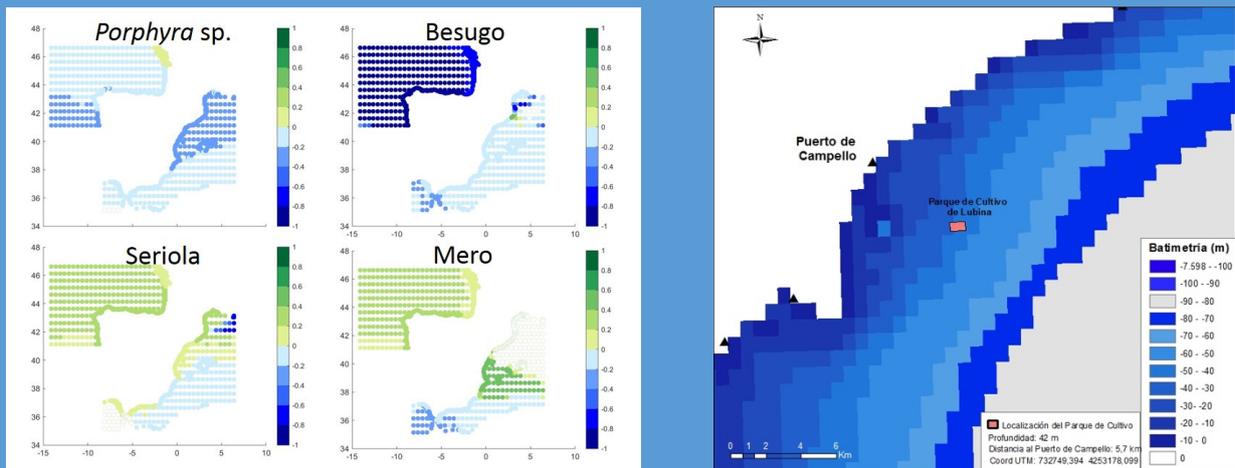


Anexo 1

ACTIVIDAD 1:

ACTIVIDAD 1: ANÁLISIS DE LAS OPORTUNIDADES DE CULTIVO DE MACROALGAS EN LAS AGUAS COSTERAS Y MARINAS ESPAÑOLAS



Este proyecto cuenta con el apoyo de la Vicepresidencia Cuarta y Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Fundación Biodiversidad.

PROyección frente a escenarios de cambio climático y escalado a nivel local del ATLAS de viabilidad de la acuicultura marina en las costas españolas.

Este proyecto cuenta con el apoyo de la Vicepresidencia Cuarta y Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Fundación Biodiversidad.

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.



ÍNDICE



ÍNDICE

1. METODOLOGÍA.....	A1.1
1.1. Zona de estudio.....	A1.1
1.2. Selección de especies y sistemas de cultivo.....	A1.2
1.3. Variables y fuentes de información.....	A1.2
1.4. Generación de mallas.....	A1.6
1.5. Análisis de los datos.....	A1.7
1.6. Evaluación de la oportunidad de cultivo y zonificación.....	A1.7
1.6.1. Idoneidad Biológica.....	A1.7
1.6.2. Idoneidad Estructural.....	A1.9
1.6.3. Idoneidad Operativa.....	A1.10
1.6.4. Cálculo de la oportunidad de cultivo.....	A1.10
1.6.5. Zonificación del espacio marítimo.....	A1.11
2. RESULTADOS Y PRODUCTOS OBTENIDOS.....	A1.11
2.1. Fichas de especies.....	A1.11
2.2.1. <i>Saccharina latissima</i> –Kombu-.....	A1.12
2.2.2. <i>Porphyra sp</i> –Nori-.....	A1.13
2.2.3. <i>Himanthalia elongata</i>	A1.14
2.2.4. <i>Codium tomentosum</i>	A1.15
2.2.5. <i>Chondrus crispus</i>	A1.16
2.2. Revisión de sistemas de cultivo.....	A1.17
2.2.1. Cultivo en aguas costeras y oceánicas.....	A1.17
2.2.2. Técnicas de cultivo.....	A1.17
2.3. Análisis descriptivo de las variables.....	A1.18
2.3.1. Variables de idoneidad biológica.....	A1.18
2.3.2. Variables de idoneidad estructural.....	A1.21
2.3.3. Variables de idoneidad operativa.....	A1.21
2.4. Evaluación de la oportunidad de cultivo.....	A1.24
2.4.1. Idoneidad Biológica.....	A1.24
2.4.2. Idoneidad Estructural.....	A1.30
2.4.3. Idoneidad Operativa.....	A1.30
2.5. Oportunidad de Cultivo y zonificación.....	A1.33
3. CONCLUSIONES DE LA ACTIVIDAD.....	A1.36
4. REFERENCIAS.....	A1.37
APÉNDICE A. ANEJO CARTOGRÁFICO. OPORTUNIDAD DE CULTIVO DE LAS ESPECIES DE INTERÉS.....	A1.A.1

Anexo 1

ACTIVIDAD 1: ANÁLISIS DE LAS OPORTUNIDADES DE CULTIVO DE MACROALGAS EN LAS AGUAS COSTERAS Y MARINAS ESPAÑOLAS

1. METODOLOGÍA

1.1. Zona de estudio

El área de trabajo es la zona económica exclusiva (en adelante ZEE), franja marítima que se extiende desde el límite exterior del mar territorial hasta una distancia de 200 millas náuticas (370.4 km), contadas a partir de la línea de base desde la que se mide la anchura de éste. La ZEE es el territorio marino donde el país ejerce derechos especiales sobre la explotación y uso de los recursos marinos y, como tal, debe asegurar, mediante medidas adecuadas de conservación y administración, que la preservación de los recursos vivos de su zona económica exclusiva no se vea amenazada por un exceso de explotación.

En la ZEE España tiene:

- a) Derechos de soberanía para los fines de exploración y explotación, conservación y administración de los recursos naturales, tanto vivos como no vivos de las aguas suprayacentes al lecho y del lecho y el subsuelo del mar, y con respecto a otras actividades con miras a la exploración y explotación económica de la zona, tal como la producción de energía derivada del agua de las corrientes y de los vientos;
- b) Jurisdicción, con respecto al establecimiento y la utilización de islas artificiales, instalaciones y estructura; la investigación científica marina; y la protección y preservación del medio marino.

La ZEE española está repartida en tres regiones (Figura 1): la región cantábrica y atlántica, la mediterránea junto con la región del Golfo de Cádiz y la zona dependiente de las Islas Canarias. Las tres regiones alcanzan $1.04 \cdot 10^6$ Km², aproximadamente el doble de toda la superficie terrestre española. De este estudio se ha excluido la región de Canarias. Esta región formó parte de un estudio previo también dirigido a identificar oportunidades de cultivo.



Figura 1. Regiones marinas en la Zona Económica Exclusiva española.

1.2. Selección de especies y sistemas de cultivo

La selección de especies, desarrollada con la colaboración de Apromar, ha perseguido reconocer especies que se cultivan comercialmente, consolidadas desde el punto de vista productivo y comercial, y para las que existe una tecnología de cultivo eficiente y rentable. Todas las especies seleccionadas son adecuadas para su cultivo en sistemas flotantes (p. ej. longline) y son especies nativas.

El listado final de especies seleccionadas está compuesto por:

1. *Saccharina latissima*.
2. *Porphyra sp.*
3. *Himanthalia elongata*.
4. *Codium tomentosum*.
5. *Chondrus crispus*.

1.3. Variables y fuentes de información

La oportunidad de cultivo de una especie está determinada por las condiciones físico-químicas del agua (idoneidad biológica) y las condiciones meteo-oceánicas en las que se desarrolla la actividad (idoneidad operativa y estructural). Cuanto más próximas estén estas condiciones a los requerimientos de las especies y de los sistemas de cultivo, mayor será la producción y rentabilidad de las explotaciones. Las variables consideradas para

analizar las condiciones físicoquímicas, meteo-oceánicas, fisiográficas y operativas de la zona de estudio son las siguientes:

Condiciones físicoquímicas del agua:

- Temperatura superficial del agua (°C)
- Salinidad (UPS)
- Radiación fotosintéticamente activa, PAR (mol/m² día)

Condiciones meteo-oceánicas:

- Oleaje (periodo de retorno de 50 años), H_{s50} (m)
- Oleaje, H_s (m)
- Velocidad de viento (m/s)
- Velocidad de las corrientes (periodo de retorno de 50 años), C₅₀ (m/s)

Condiciones fisiográficas:

- Batimetría (m)
- Pendiente (%)

Condiciones operativas:

- Distancia a puerto de los puntos de la malla de estudio

Los datos utilizados proceden, en su mayor parte, de sensores satelitales (p.ej. imágenes de satélite) y modelos de re-análisis. La información de las variables se ha extraído de la base de datos OCLE original (datos brutos diarios; <http://ocle.ihcantabria.com/>), cuyos valores agregados quinquenalmente están disponibles con acceso abierto (de la Hoz et al., 2018). La Tabla 1 resume el origen, características y resolución espacial y temporal de los datos utilizados para cada variable.

VARIABLE	Fecha inicio	Fecha fin	Resolución temporal	Resolución espacial	Método
<u>Idoneidad Biológica</u>					
Temperatura del agua (°C)	01/01/1985	31/12/2015	Diaria	0.05°	Re-análisis
Salinidad (UPS)	01/01/1985	31/12/2015	Diaria	0.25°	Re-análisis
PAR (Einstein/m ² día)	16/09/1997	31/12/2015	Diaria	0.04°	Satélite
<u>Idoneidad Estructural</u>					
Oleaje (m)	01/01/1985	31/12/2015	Horaria	0.5°	Re-análisis
Corrientes (m/s)	01/01/1985	31/12/2013	Horaria	0.25°-0.5°	Re-análisis
Batimetría (m)	-	-	-	0.01°	Satélite e <i>in situ</i>
<u>Idoneidad Operativa</u>					
Viento (m/s)	01/01/1985	31/12/2015	Diaria	0.027°	Re-análisis
Oleaje (m)	01/01/1985	31/12/2015	Horaria	0.5°	Re-análisis

Tabla 1. Fuentes de información, resolución espacial, resolución temporal y período de tiempo disponible para las variables físicoquímicas, meteo-oceánicas y fisiográficas analizadas.

Temperatura superficial del agua

Justificación:

La temperatura es uno de los factores clave en el crecimiento. Su disminución, con el aumento de la latitud, induce cambios en los patrones de crecimiento y fenología de las especies de macroalgas marinas (Peteiro et al., 2016).

Fuentes de información:

Para el estudio de la *temperatura superficial del agua* (°C) se han utilizado datos diarios, con una resolución espacial de 0.05°, correspondientes al período 1985-2015. Los datos se han obtenido del proyecto GHRSSST (grupo de alta resolución de temperatura superficial del mar). Dentro de este proyecto, la base de datos de re-análisis OSTIA agrupa los datos históricos de temperatura superficial obtenida a partir de imágenes de satélite (Donlon et al., 2012; Stark et al., 2007). Esta Base de datos produce análisis de alta resolución de la temperatura superficial del mar para el océano global, combinando imágenes de satélite de infrarrojo y microondas, con observaciones *in situ*. El análisis se realiza utilizando la variante de interpolación óptima (OI) (http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html). Los datos obtenidos se han transformado de grado kelvin a grado centígrado.

Salinidad

Justificación:

La salinidad también tiene un papel determinante en el crecimiento de las especies y su variación respecto el rango óptimo de crecimiento es una de las principales causas de estrés.

Fuentes de información:

Para la *salinidad* (PSU) se han recopilado datos diarios con una resolución espacial de 0.25° a lo largo del período 1985-2015. Los datos se han obtenido del NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFRS) (Saha et al., 2010).

Radiación fotosintéticamente activa, PAR

Justificación:

Las algas tienen la capacidad de transformar energía lumínica en energía química (fotosíntesis). La luz les proporciona la energía para que puedan generar nueva biomasa y es, por tanto, su motor de crecimiento.

Fuentes de información:

Los datos de PAR (Einstein/m²día) proceden del proyecto Copernicus Marine System (ESA). Se corresponden con el período 1998-2015, son diarios y tienen una resolución espacial de 4 Km (0.04°). No obstante, la resolución real de los ficheros utilizados es 0.01° latitud y 0.015° longitud. Según la disponibilidad de imágenes se han combinado distintos satélites: SeaWiFS (16/9/1997-22/6/2002), SeaWiFS + MODIS (23/6/2002-11/12/2010), MODIS (12/12/2010-1/1/2012), MODIS + VIRS (2/1/2012-31/12/2015).

Viento

Justificación:

El viento es una variable que puede condicionar las actividades de operación y mantenimiento (O&M) y el coste de producción. El viento tiene también influencia sobre la integridad estructural de los distintos elementos de un parque o explotación offshore.

Fuentes de información:

Los datos de *viento* proceden de la base de NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), sistema de pronóstico horario de 0.027° de resolución espacial, que proporciona variables relacionadas con el viento (Saha et al., 2010). Dispone de datos para el período 1985-2015 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>).

Oleaje

Justificación:

La dinámica marina, entendida esta por corrientes y oleaje, tiene una incidencia importante en la idoneidad operativa y estructural.

Fuentes de información:

Los datos utilizados se corresponden al período 1985 y 2015 y tienen una resolución horaria. Se utiliza el modelo de oleaje Global Ocean Wave (GOW) con un dominio en el Océano Atlántico de 0.5° × 0.5° (Perez et al., 2017; Reguero et al., 2012).

Corrientes

Justificación:

La velocidad de la corriente es un indicador de los flujos de energía. Se tiene en cuenta la velocidad de las corrientes en los primeros metros del perfil, teniendo en cuenta que es donde mayor afección tiene sobre la estructura.

Fuentes de información:

El GOST de IHCantabria ofrece datos de *corrientes* correspondientes al período 1985-2013 (Cid et al., 2014). Está diseñado y ejecutado como un sistema atmósfera-oceano-tierra-mar-superficie de hielo, de alta resolución mundial para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados. El producto de salida de CFSR son corrientes superficiales de resolución temporal horaria y resolución espacial de 0.25-0.5°.

Batimetría

Justificación:

La batimetría determina las zonas de exclusión donde el estado actual de la técnica no permite a día de hoy instalar parques de cultivo rentables.

Fuentes de información:

La *batimetría* se obtiene a partir del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2014) (Weatherall et al., 2015).

Pendiente

Justificación:

La pendiente, al igual que la batimetría, determina zonas de exclusión donde el estado actual de la técnica no permite la instalación de parques de cultivo.

Fuentes de información:

La *pendiente* está calculada a partir de la batimetría (GEBCO, 2014).

Distancia a puertos

Justificación:

La identificación de áreas adecuadas para la realización de actividades de operación y mantenimiento garantiza el mantenimiento de la jaula y la seguridad del personal. La distancia a puerto, la profundidad y las condiciones de oleaje determinan el coste del transporte, instalación y mantenimiento de las granjas. Las jaulas de cultivo en alta mar están expuestas a condiciones más severas. Una mayor distancia a costa requiere cadenas logísticas y sistemas de O&M más complejos, además de mayores inversiones. Por esta razón, la lejanía de puertos de zonas con alto potencial para el cultivo de especies marinas reduce su idoneidad.

Fuentes de información:

La distancia a puerto se ha obtenido con algoritmos numéricos a partir de la base de datos de Puertos de España.

1.4. Generación de mallas

La Figura 2 muestra la malla generada para las aguas marinas españolas. La malla cuenta con un total de 1039 nodos y la resolución espacial es de 0.1° en la zona más próximas a la costa y de 0.5° en las aguas oceánicas.

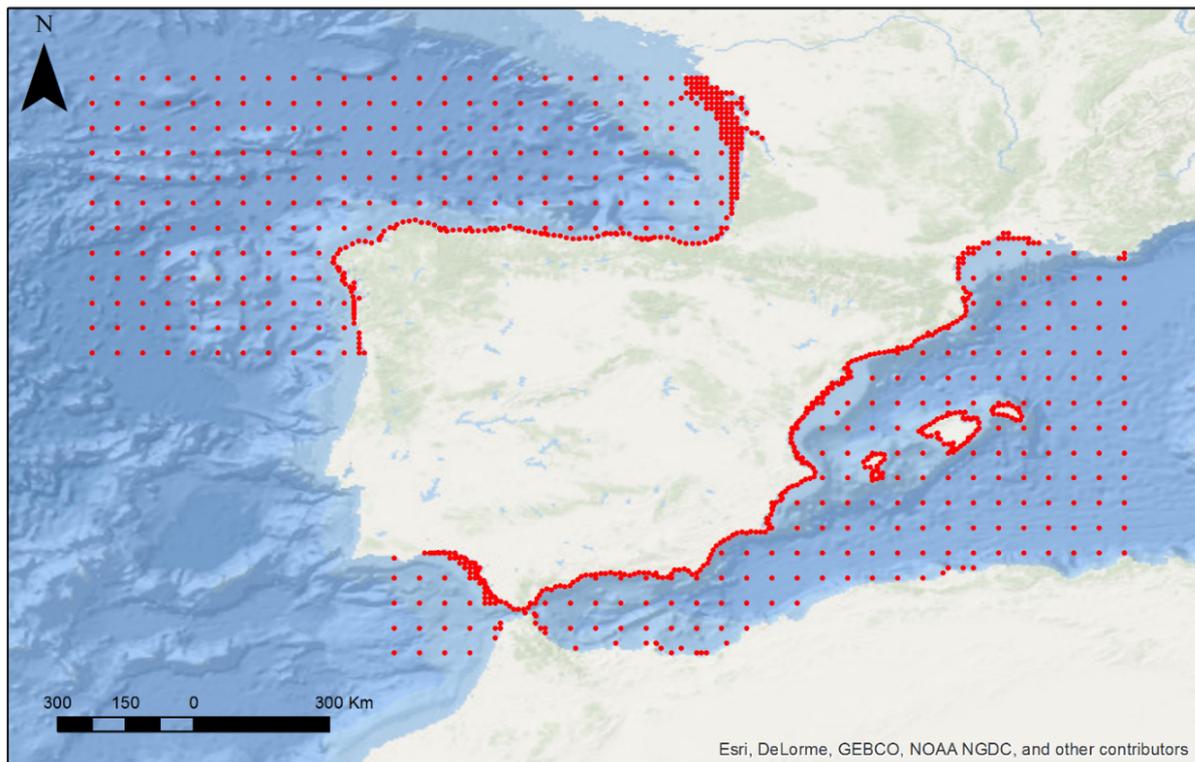


Figura 2. Malla generada para las aguas marinas españolas. Zona Económica Exclusiva (200 mn).

1.5. Análisis de los datos

Con independencia de su origen y tipo (*in situ*, imagen de satélite, reanálisis), los datos meteo-oceánicos y fisicoquímicos se han descargado de su fuente original en formato NetCDF. Los análisis relativos a la dimensión temporal y espacial y la generación de mapas se han efectuado en Matlab (2011b). Todas las variables han sido proyectadas al sistema WGS 84.

1.6. Evaluación de la oportunidad de cultivo y zonificación

La oportunidad de cultivo de la especie es el resultado de considerar conjuntamente tres elementos de análisis: la idoneidad biológica de la especie, la idoneidad estructural de la jaula y la idoneidad operativa para las actividades de operación y mantenimiento. La evaluación de la idoneidad analiza cómo se comporta la zona de estudio y cuánto se parece a las condiciones óptimas en términos biológicos, estructurales y operativos, aplicando la lógica difusa y calculando la probabilidad de que una determinada celda (0.1° en costa y 0.5° en aguas oceánicas) registre las condiciones óptimas para el cultivo de una especie.

1.6.1. Idoneidad Biológica

La idoneidad biológica evalúa cuanto se parecen las condiciones ambientales de la zona de estudio a los requerimientos de la especie (temperatura, salinidad y luz), definidos a través de su rango óptimo de crecimiento.

- Umbrales del rango óptimo de crecimiento

Para la temperatura y salinidad los umbrales se han definido con base en la literatura científica, tomando como referencia estudios realizados en condiciones próximas a las de la zona de estudio. En la Tabla 2 se muestra, para cada especie, los umbrales de las variables que definen su idoneidad biológica.

En el caso de la luz, el rango óptimo de crecimiento se ha establecido con base en la curva de fotosíntesis e irradiancia de cada especie, definiendo como límite superior e inferior los puntos de fotoinhibición y saturación, respectivamente. La fotosíntesis es una medida del crecimiento del individuo. Frente a elevadas intensidades lumínicas, la eficiencia fotosintética se reduce y el contenido de los pigmentos decrece (punto de fotoinhibición). El punto de saturación, por su parte, es el valor de intensidad lumínica en el que la curva de fotosíntesis alcanza la asíntota (Figura 3). Este valor es dependiente de la temperatura del agua y para establecer el rango óptimo de crecimiento se ha utilizado el más bajo referido en la literatura (alcanzado a temperaturas más bajas).

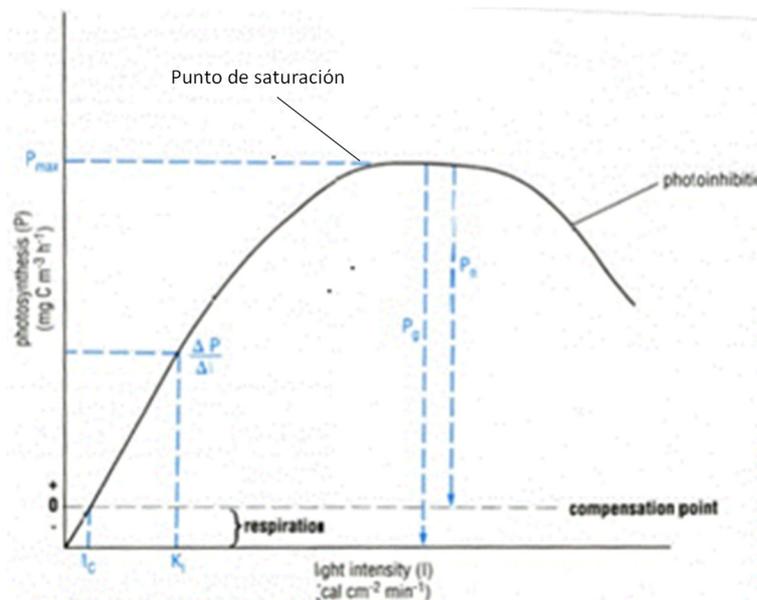


Figura 3. Modelo de curva fotosíntesis vs irradiancia con indicación de los puntos de saturación y de fotoinhibición.

- Cálculos de idoneidad biológica

La idoneidad biológica compara las condiciones del medio con los requerimientos de la especie, y calcula la probabilidad de que se den las condiciones óptimas para su crecimiento. El análisis parte de la serie completa de datos históricos de cada variable y calcula, para cada celda de la malla de estudio y variable, la probabilidad de que se den las condiciones óptimas definidas para la especie. La idoneidad biológica de la especie expresa la probabilidad de que todas las variables con incidencia en el crecimiento cumplan, en concomitancia, las condiciones óptimas para el crecimiento. La escala de probabilidad varía entre 1% (máxima probabilidad de encontrar condiciones óptimas) y 0% (sin probabilidad de encontrar condiciones óptimas para el crecimiento de la especie). Para una mejor interpretación de los resultados, la idoneidad biológica se clasifica en cuatro categorías: nula (0), baja (<0.4), moderada (0.4-0.7) y alta (>0.7).

Nombre científico	Temperatura (°C)	Salinidad (UPS)	PAR (mol/m ² día)
<i>Saccharina latissima</i>	10,0-15,0 (1,2)	30,0-40,0 (5)	8,64-43,2 (3,4,2)
<i>Porphyra sp</i>	10,0-15 (5)	30,0-40,0 (5)	6,048-43,2 (2,4)
<i>Himanthalia elongata</i>	10-17 (6,7)	30,0-40,0 (5)	6,048-43,2 (10,4)
<i>Codium tomentosum</i>	10-16 (8,9)	30,0-40,0 (5)	6,048-17,28 (10,15,16,10,17)
<i>Chondrus crispus</i>	10.0-15.0 (13,14)	28-40,0 (5)	5,616-34,56 (11,12,13,17)

Tabla 2. Variables y umbrales para establecer la idoneidad biológica del medio para el crecimiento de las especies de macroalgas. Fuentes de información utilizadas: 1) Sogn, 2013; 2) Peteiro et al., 2016; 3) Fortes and Luning, 1980; Borum et al., 2002; 4) Hanelt et al 1997; 5) Katz, 2000; 6) Stagnol, 2016; 7) Stengel, 1999; 8) Wilson et al., 2015; 9) Gonzalez, 2014; 10) Yang, 1997; 11) Serodio, 2014; 12) Cabello, 2000; 13) Bird, 1979; 14) LI, 2010; 15) Kim-Garbary, 2007; 16) Luning, 1990; 17) Silva, 2018.

1.6.2. Idoneidad Estructural

La idoneidad estructural de los sistemas de cultivo valora la severidad de los fenómenos oceanográficos y meteorológicos de un emplazamiento y su influencia sobre la integridad estructural y el tiempo de vida de los sistemas de cultivo. El objetivo es identificar zonas costeras y oceánicas con valores de oleaje y corrientes dentro de los límites de resistencia y funcionamiento óptimos para las estructuras de cultivo.

El primer nivel de discriminación lo determinan la batimetría y la pendiente del lecho marino. Estas variables geomorfológicas marcan los límites espaciales en los que pueden ser emplazadas las estructuras de cultivo. Se descartan las localizaciones con profundidades por encima de 300m o pendientes superiores al 25% dado que la instalación de parques en emplazamientos en estos rangos de profundidad/pendiente, si bien es técnicamente viable, es económicamente desaconsejable.

La idoneidad estructural se evalúa con base en la altura de ola significativa con período de retorno de 50 años (H_{s50}) y en la velocidad de las corrientes con período de retorno de 50 años (C_{50}). En la Tabla 3 se muestran los umbrales establecidos. Para la selección de estos umbrales se ha considerado una estructura tipo debido a lo limitado de experiencias en aguas expuestas. Se ha optado por considerar el estado de la técnica resumido en las normativas más habituales (Standard Norge, 2009), asumiendo que por debajo de 5 metros de altura de ola significativa de periodo de retorno de 50 años existen soluciones tecnológicamente viables.

A diferencia de la idoneidad biológica, la idoneidad estructural adopta valores de 1 ó 0. Los valores de H_{s50} y C_{50} son discretos (1 ó 0) y su integración para el cálculo de la idoneidad se hace aplicando el principio de valor crítico (condición más desfavorable). En consecuencia, el mapa de idoneidad estructural obtenido es booleano, con celdas que cumplen/incumplen con los umbrales establecidos.

Idoneidad Estructural	Sistemas de cultivo
Oleaje (H_{s50} ,m)	< 5 (1)
Corrientes (C_{50} ,m/s)	< 1 (1)

Tabla 3. Variables y criterios para definir la idoneidad estructural. (1) Standard Norge, 2009.

1.6.3. Idoneidad Operativa

La idoneidad operativa evalúa la posibilidad de llevar a cabo las actividades operativas propias de la actividad (alimentación, pesca, limpieza, mantenimiento, etc.) y viene determinada tanto por las condiciones de oleaje y viento, como por la distancia a los puertos más cercanos.

Para determinar la operatividad se evalúa el número de ventanas de 8 horas de duración media anual en las que el oleaje y el viento están dentro de los umbrales óptimos para trabajar. Se considera que un emplazamiento tiene accesibilidad total cuando dispone de 1095 ventanas de acceso (Tabla 4). Para calcular el valor de distancia a puerto, se delimita el área que está a una distancia máxima de 40 km de cada puerto. Al puerto (km 0) se le otorga un valor 1 y a las zonas a una distancia ≥ 40 km valor 0. Para asignar valores a los puntos intermedios se calcula la distancia euclídea entre cada punto de esa área y el puerto más próximo.

La restricción ejercida por cada uno de estos factores no es la misma, por tanto, la valoración de la idoneidad operativa se hace de forma ponderada, asignando un mayor peso al oleaje, un peso intermedio al viento y un menor peso a la distancia a puerto. La ponderación se realiza mediante el criterio de valoración mostrado en la Ecuación 1.

$$I_{op} = \frac{(3xHs+2xV+1xD)}{6} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, I_{op} es el valor de Idoneidad Operativa (estimado entre 0 y 1), Hs es el valor de oleaje (entre 0 y 1), V es el valor de viento (entre 0 y 1) y D es el valor de distancia a puerto (entre 0 y 1).

Idoneidad Operativa	Sistemas de cultivo
Distancia a Puerto (D, km)	<40
Oleaje (Hs, m)	< 1
Viento (V, m/s)	< 15

Tabla 4. Variables y criterios para definir la idoneidad operativa.

1.6.4. Cálculo de la oportunidad de cultivo

La oportunidad de cultivo de una especie en una zona se calcula integrando los resultados de idoneidad biológica, estructural y operativa. La oportunidad de cultivo se expresa como la probabilidad, en tanto por uno (1, máxima probabilidad; 0, mínima probabilidad), de que una celda cumpla con los criterios definidos para las tres idoneidades (rangos óptimos).

La valoración de la oportunidad de cultivo sigue una secuencia de trabajo que se inicia con el cálculo de la probabilidad de cumplimiento a nivel de variable, continua con el cálculo de la idoneidad biológica, estructural y operativa y finaliza con la valoración de la oportunidad de cultivo, obtenida aplicando el criterio del valor crítico a los resultados de las tres idoneidades. La Figura 4 resume el procedimiento metodológico.

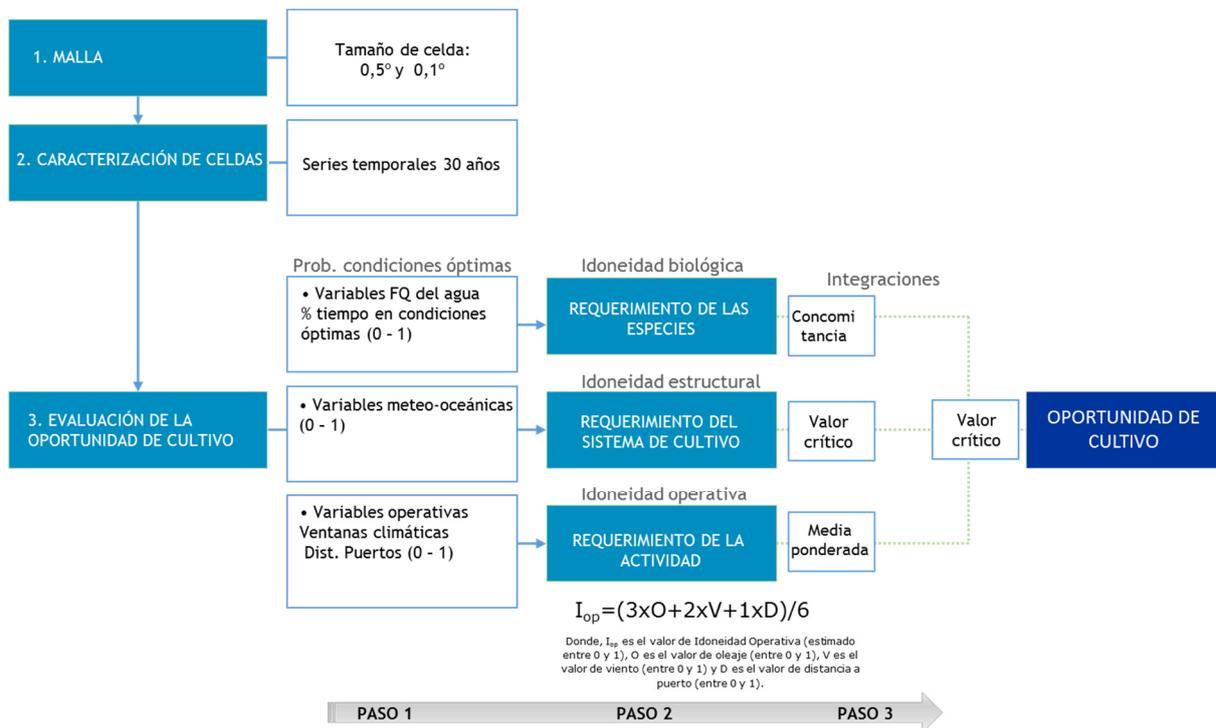


Figura 4. Esquema del procedimiento metodológico para el análisis de la oportunidad de cultivo de macroalgas.

1.6.5. Zonificación del espacio marítimo

Los resultados de la oportunidad de cultivo obtenidos para cada especie se agregan en cuatro categorías para discretizar las condiciones para el cultivo en: zona muy óptima ($X > 0.70$); zona moderadamente óptima ($0.70 < X < 0.4$); zona poco óptima ($X \leq 0.4$) y zona no óptima ($X = 0$).

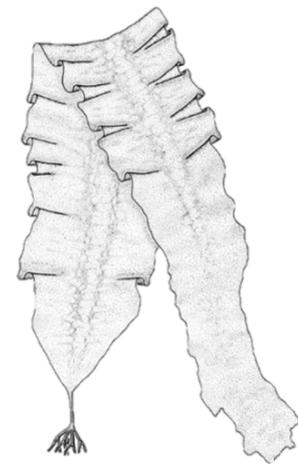
2. RESULTADOS Y PRODUCTOS OBTENIDOS

2.1. Fichas de especies

Las especies seleccionadas para llevar a cabo el análisis de oportunidad de cultivo en las aguas españolas son *Saccharina latissima*, *Porphyra sp*, *Himanthalia elongata*, *Codium tomentosum* y *Chondrus crispus*. Para cada una de ellas, se ha elaborado una ficha descriptiva con información relativa a su biología y hábitat, distribución y sistemas de cultivo.

2.2.1. *Saccharina latissima* –Kombu-

Biología y Hábitat: *Saccharina latissima*, conocida como “kombu de azúcar”. Tallo de hasta 4 m de largo, sujeto al sustrato por el estipe y el rizoma. Hojas largas y coriáceas, planas, arrugadas y con márgenes ondulados. Sin ramificaciones, ni nervio central, y de anchura en torno a los 15 cm. Común y abundante en pozas rocosas del intermareal bajo y en el sublitoral, hasta más de 20 m. Vive a una profundidad media de 12 m. Estipe flexible capaz de reorientarse y alinearse en la dirección de la corriente. Debido a su altura proporciona protección para numerosas especies en mar abierto.



Distribución: Crece en aguas frías, hasta regiones árticas. Presente a lo largo de las costas de las Islas Británicas desde las Shetlands hasta las Islas del Canal, Portugal, costas atlánticas de España y Francia, Países Bajos, Mar Báltico, Noruega, Suecia, Islas Feroe, Islandia, Groenlandia, Costa atlántica de Norteamérica, costa del Pacífico de Norteamérica desde Alaska hasta California. La Península Ibérica (norte de España y Portugal) representa el límite de distribución del sur de muchas especies en Europa. En la última década distintas especies de laminariales han desplazado su área de distribución hacia el extremo más occidental del Cantábrico. Este proceso coincide con la tendencia de incremento en la temperatura superficial del agua cantábrica (0.44 °C en 30 años) y aunque es probable que en este cambio actúen otros factores, el incremento de la temperatura está afectando al hábitat de un número considerable de especies de macroalgas y, como tal, debe tenerse en cuenta a la hora de seleccionar las especies que deben cultivarse.

Sistema de Cultivo: La especie *Saccharina latissima* (nativa) es valiosa en el norte de España debido a su alta demanda y valor económico. El cultivo en mar se realiza a escala comercial en Galicia. El cultivo se divide en dos fases diferenciadas: la primera es el cultivo en laboratorio para la obtención de plántulas y la segunda el cultivo en mar hasta la talla comercial. Se cultiva generalmente usando el método de balsa flotante (Raft) integrado por cuerdas horizontales en forma de longline y cuerdas verticales. El sistema está anclado al fondo (p.ej. bloques de hormigón). Los esporófitos de *laminaria* jóvenes se atan a cuerdas sumergidas y estas cuerdas se unen a las cuerdas de la balsa. En Galicia la producción óptima de biomasa se alcanza en cultivos de entre 0-2 m de profundidad. Tanto los sitios protegidos como expuestos son aptos para el cultivo de *S. latissima*. Para minimizar el efecto de la corriente sobre las plantas, en zonas expuestas se recomienda instalar el cultivo en zonas profundas donde la superficie libre bajo la plantación sea mayor que la superficie ocupada por las algas. La talla comercial es de aproximadamente 1,5 metros y, en Galicia, supone una biomasa de hasta 16 kg de peso fresco por metro lineal de cabo después de 5 meses de cultivo. Las mejores fechas de siembra para la maricultura de *S. latissima* en la costa sur de Europa son de noviembre a diciembre y la cosecha se realiza de abril a mayo. La temperatura del agua y la concentración de nitrógeno en el agua son los principales determinantes del inicio y final del cultivo en el mar.

Fuentes de información:

<http://www.habitas.org.uk/marinelifespecies.asp?item=ZR6360>; Peteiro et al., 2016.

2.2.2. *Porphyra* sp –Nori-

Biología y Hábitat: Aparece en costas rocosas, en los trópicos y en los polos. La mayor parte de las especies se dan anualmente en verano, o invierno. Soporta la desecación, por lo que puede vivir en la zona más alta del intermareal. Los talos de *Porphyra* aparecen en su estado natural como organismos libres y sus filamentos microscópicos se adhieren a sustratos de carbonato cálcico (p.ej. conchas). Las láminas de *Porphyra* pueden ser circulares o lineales y medir de centímetros o más de un metro.



Distribución: Especie cosmopolita. Se distribuye en todos los continentes, desde aguas polares a tropicales, incluyendo las regiones templadas. La mayor diversidad se encuentra en las regiones boreales, o en zonas con clima frío a templado.

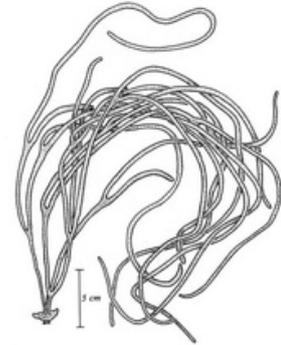
Sistema de cultivo: Las algas son obtenidas del medio natural por recolección o recogida de arribazones y se cultivan. Existen tres métodos principales de cultivo: en redes (a) flotantes, (b) semi-flotantes; y (c) fijas. Hay una cuarta técnica conocida como "redes de congelación". El cultivo de macroalgas puede realizarse directamente en el mar, o puede ser mixto, con fases en laboratorio y fases en el mar. En el mar solo pueden cultivarse especies que se desarrollan mediante propagación vegetativa, realizándose una fragmentación manual o mecánica y una resiembra de los fragmentos. En el cultivo mixto el desarrollo y la recolección se realiza en el mar, pero la semilla y sembrado se hace en laboratorio. En todos los casos, la técnica de cultivo tiene que adecuarse a la biología y características de la especie. Las fases de cultivo incluyen las siguientes etapas: Siembra (obtención de esporas), producción de plántulas, pre-cultivo y cultivo.

Factores de Cultivo: La luz (fotoperíodo), temperatura y salinidad juegan un papel decisivo para el desarrollo de las macroalgas. Otros factores son la hidrodinámica, desecación, disponibilidad de nutrientes y contaminación. Uno de los más decisivos para el cultivo de macroalgas es la temperatura superficial del mar.

Fuentes de información: <http://blogueiros.axena.org/2010/03/04/acuicultura-iv-cultivo-de-algas-macroalgas/>; FAO, Perspectivas para la producción de algas marinas en los países en desarrollo; <https://acuiculturamarina.com/2013/12/30/el-cultivo-de-algas-marinas-macroalgas/>, <http://www.monografias.com/trabajos/macroalgas/macroalgas.shtml>; <http://www.algolesko.com/english-version/our-products/>; <https://www.algamar.com/productos/secas.php?id=1>
<https://acuiculturamarina.com/2016/08/25/el-cultivo-de-laminarias-para-biocombustibles-en-la-costa-atlantica-espanola/>

2.2.3. *Himanthalia elongata*

Biología y Hábitat: Alga formada por un pedúnculo basal de fijación verde pardusco, primero con forma de vesícula y luego de seta (parte vegetativa) hundida en el centro, de hasta 4 cm de diámetro y 3 cm de altura, de cuyo centro salen entre 1 y 4 receptáculos con forma de correas (parte fértil) que se dividen dicotómicamente hasta los 3 m; éstos son aplanados y están cubiertos por conceptáculos, los masculinos pequeños y los femeninos más grandes, cada uno con una única ovocélula. Talos bianuales y dioicos. Las especies pertenecientes al orden fucales se caracterizan por tener en el talo unos abultamientos generalmente terminales (receptáculos) de superficie rugosa por contener pequeñas y numerosas estructuras huecas (conceptáculos) que en su interior desarrollan las células encargadas de la reproducción sexual. Inician el crecimiento en otoño con forma de vesículas, y al año siguiente desarrollan los conceptáculos. Generalmente se encuentra sobre rocas intermareales en ambientes medianamente batidos por el oleaje en donde forma grandes extensiones que llegan a cubrir por completo a otras algas. Esto resulta muy evidente durante los períodos de marea baja cuando las largas cintas reposan sobre el sustrato debido a la ausencia de tejidos duros. Sin embargo, durante la pleamar se mantienen erguidas por flotación formando "bosques" submarinos de gran belleza. Suele aparecer en las playas tras los primeros temporales de otoño.



Talos bianuales y dioicos. Las especies pertenecientes al orden fucales se caracterizan por tener en el talo unos abultamientos generalmente terminales (receptáculos) de superficie rugosa por contener pequeñas y numerosas estructuras huecas (conceptáculos) que en su interior desarrollan las células encargadas de la reproducción sexual. Inician el crecimiento en otoño con forma de vesículas, y al año siguiente desarrollan los conceptáculos. Generalmente se encuentra sobre rocas intermareales en ambientes medianamente batidos por el oleaje en donde forma grandes extensiones que llegan a cubrir por completo a otras algas. Esto resulta muy evidente durante los períodos de marea baja cuando las largas cintas reposan sobre el sustrato debido a la ausencia de tejidos duros. Sin embargo, durante la pleamar se mantienen erguidas por flotación formando "bosques" submarinos de gran belleza. Suele aparecer en las playas tras los primeros temporales de otoño.

Distribución: Atlántica; desde Noruega hasta el norte de Portugal. En el Cantábrico en la zona occidental, hasta Cudillero.

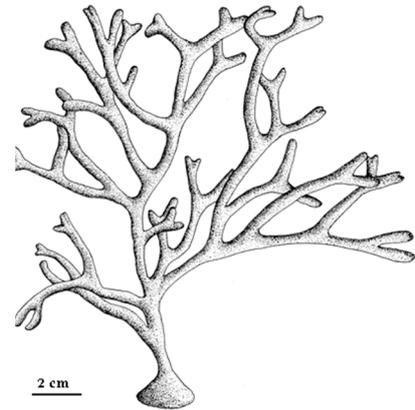
Sistema de Cultivo: Existen iniciativas en las que los primeros estadios de crecimiento de desarrollo se llevan a cabo en laboratorio, con condiciones controladas, y sobre un sustrato tipo vieira, ostra, etc. y el segundo estadio de crecimiento se lleva a cabo en el mar, sujeto al sustrato seleccionado (Proyecto integrate. Interreg Atlantic Area).

Fuentes de información:

http://www.portomuinos.com/especies_especies.php?idcat=1&idespecie=3;
Asturnatura.com "*Himanthalia elongata*

2.2.4. *Codium tomentosum*

Biología y Hábitat: Fronde de color de verde claro a verde oscuro, ramificada dicotómicamente y que está fijada al sustrato por un disco esponjoso; alcanza hasta 25 cm, tiene textura aterciopelada y esponjosa, y está formada por muchos filamentos anastomosados, que en conjunto pueden tener un diámetro de hasta 1 cm. Cada rama tiene sección redondeada, pero es plana en las dicotomías. Los utrículos, que son las células de la parte externa, son lisos, de clavados a piriformes y con el ápice redondeado. El gametangio, de oblongo a fusiforme, se forma sobre pequeños pedúnculos que surgen en la mitad del utrículo. Fijada al sustrato por un disco esponjoso.



Intermareal, en charcas, rocas, arena y fango, y en sublitoral hasta los 20 m.

Distribución: Género ampliamente distribuido por los mares cálidos y templados. Desde las Islas Británicas a Cabo Verde, Mediterráneo, este de África, sur de Asia, California.

Sistema de Cultivo: *Codium tomentosum* es una especie con potencial para la acuicultura, aunque todavía existe la necesidad de continuar estudiando estas algas para obtener una mejor comprensión de las mejores condiciones para realizar el cultivo. Para *Codium tomentosum* en los ensayos de optimización, los mejores resultados se han obtenido a 16°C y 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidad de luz.

Fuentes de información:

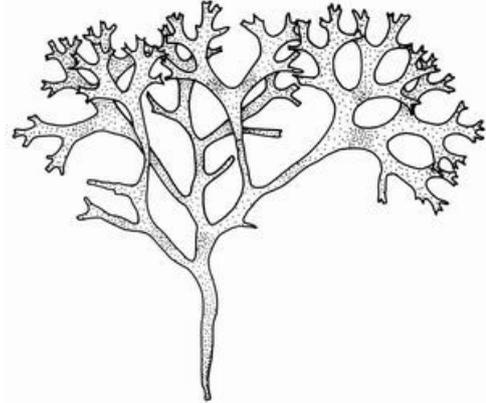
Asturnatura.com "*Codium tomentosum*". *Asturnatura.com* [en línea]. Num. [1](#), 23/12/04 [consultado el: 23/08/2019]. Disponible en Asturnatura.com/especie/codium-tomentosum.html. ISSN 1887-5068.

Hwang, E.K., Baek, J.M. & Park, C.S. (2009). Cultivation of the green alga, *Codium fragile* (Suringar) Hariot, by artificial seed production in Korea. *Proceedings of the International Seaweed Symposium 19*: 19-25, 4 figs, 2 tables

Yotsui, T. & Migita, S. (1989). Cultivation of a green alga *Codium fragile* by regeneration of medullary threads. *Nippon Suisan Gakkaishi* 55: 41-44.

2.2.5. *Chondrus crispus*

Biología y Hábitat: Alga muy polimórfica, cartilaginosa, erecta, de 10 - 15 cm de longitud, fijada por un disco. La parte basal del eje principal es cilíndrica, y se va aplanando y haciéndose más ancha en las partes superiores. El eje no es acanalado. La ramificación es irregular, dicótoma, y se ramifica hasta 6 - 8 veces. La forma varía mucho, existiendo grados intermedios entre formas muy estrechas y formas muy anchas. El gametofito femenino tiene cistocarpos que forman abultamientos en una cara y una concavidad en la otra; el tetrasporofito es de apariencia similar, pero cuando está fértil se forma en el un punteado rojo oscuro. Color rojo oscuro, púrpura, a menudo iridiscente. Presente en piedras y rocas en la zona sublitoral y en charcas de marea. Forma céspedes densos en zonas protegidas de la luz. Soporta salinidades bajas, por lo que es posible encontrarlo en estuarios. Se usa en la alimentación humana.



Distribución: Desde Islandia hasta las islas Cabo Verde. En el Mediterráneo en Grecia. Estrecho de Bering y Alaska, Japón y costa NO de América.

Sistema de Cultivo: El alga roja *Chondrus crispus* se ha cosechado comercialmente en distintos países (p.ej. Canadá) durante más o menos 60 años. La acuicultura en tanques terrestres se inició en la década de 1970. En la década de 1990, quedó claro que los costes de producción de estos sistemas intensivos eran todavía demasiado altos para el mercado de carragenatos. No hay muchas experiencias de acuicultura en mar abierto de especies de agua fría, y en particular de *C. crispus*, pero los resultados preliminares han demostrado que las técnicas de trasplante y crecimiento son biológicamente exitosas.

Fuentes de información:

Asturnatura.com "*Chondrus crispus* Stackhouse". *Asturnatura.com* [en línea]. Num. [6](#), 13/11/05 [consultado el: 23/08/2019]. Disponible en <<https://www.asturnatura.com/especie/chondrus-crispus.html>>. ISSN 1887-5068. Chopin, 1999.

2.2. Revisión de sistemas de cultivo

2.2.1. Cultivo en aguas costeras y oceánicas

Cultivo en aguas costeras

Las ventajas que ofrece el cultivo en aguas costeras han favorecido la proliferación de este tipo de instalaciones en costas como la mediterránea. Las zonas costeras son más protegidas y reducen el riesgo humano, técnico y económico. La pérdida de individuos es menor que en zonas expuestas y las inversiones requeridas en los barcos de trabajo pueden ser menores ya que están expuestos a menores corrientes y alturas de ola. Por el contrario, presenta inconvenientes relacionados con una creciente limitación del espacio. Esta actividad compite con otros usos y actividades como la pesca tradicional y la navegación y en algunas regiones se ha llegado a una situación de colapso en la que ya no se pueden colocar más unidades productivas.

Cultivo en aguas oceánicas

Las aguas oceánicas, con una mayor capacidad de dispersión, ofrecen ventajas para la acuicultura relacionadas con una mejor calidad del agua y una mejor mezcla de la columna de agua. Por el contrario, en esta zona las condiciones hidrodinámicas son más severas y por lo tanto se requieren especies e infraestructuras capaces de resistirlo. En consecuencia, la inversión en embarcaciones y estructuras (de cultivo, de fondeo, anclas) es más alta. Además, las condiciones más severas entrañan un mayor riesgo para los trabajadores y limitan el número de días laborables y los periodos de accesibilidad.

2.2.2. Técnicas de cultivo

Las técnicas de cultivo más habituales para el cultivo de macroalgas en aguas costeras y oceánicas es el longline.

El longline es una técnica que consiste en un cabo horizontal fijado al fondo por unos pesos, y que se mantiene a flote mediante flotadores. Del cabo horizontal cuelgan las cuerdas, a las cuales se adhiere la especie cultivada. Dependiendo de la profundidad puede ser un longline flotante, subsuperficial, o de fondo.

En aguas oceánicas este método presenta algunas dificultades. Las cuerdas se enredan con facilidad y se producen numerosas roturas. Para solucionarlo se han diseñado sistemas en los que las cuerdas cuelgan del cabo horizontal por sus dos extremos, formando una U. Las labores de limpieza, extracción y mantenimiento del longline son complicadas, por lo que, aunque más adecuada que las bateas tradicionales, no se puede considerar como la opción más óptima para el cultivo en aguas oceánicas. Otro inconveniente de este método es el difícil manejo, ya que hay que regular constantemente la flotabilidad del sistema a medida que las cuerdas van ganando peso, para lo que se requiere bastante mano de obra y tiempo de dedicación.

La empresa noruega SmartFarm ha diseñado y desarrollado un sistema especial de longlines a base de SmartLines, que consiste en tubos de polietileno (PE) para la flotabilidad, con redes colectoras de mejillones que cuelgan a lo largo de los tubos, en lugar de cuerdas. La red es asegurada al tubo con cuerdas UV-resistentes. Las redes colectoras están permanentemente sumergidas; el cultivo y la cosecha se hacen íntegramente bajo el agua sin desmontar o volver a montar la red colectora o tener que regular la flotabilidad.

Este sistema es fácil de montar y transportar, además de soportar fuertes olas y corrientes en sitios abiertos, como las costas irlandesas, donde ha probado no sufrir daños y producirse un mínimo desprendimiento. Este sistema se complementa con la utilización de una máquina de cepillos que realiza las funciones de controlar la densidad del cultivo, limpieza de depredadores, maneja cuidadosamente los mejillones, cosecha y limpia totalmente la red colectora. Esta máquina se puede incorporar en el diseño del barco, situándola entre los dos cascos de un catamarán. La eficiencia de este método es muy alta permitiendo tasas de recogida muy superiores a las de los demás sistemas (Fuente de información: <http://www.gestenaval.com/?p=142>).

2.3. Análisis descriptivo de las variables

2.3.1. Variables de idoneidad biológica

En el Cantábrico, la temperatura varía entre máximos de 6.12°C y mínimos de 25.95°C. El valor medio en las zonas más oceánicas es de 14.25°C y de 18.85°C en zonas costeras. La mayor dispersión de valores se produce en la costa francesa (Figuras 5 y 6). La salinidad se caracteriza por un reducido rango de variación, con valores medios mínimos de 35.07 UPS y máximos de 36.49 UPS. El PAR se caracteriza por una marcada uniformidad espacial. En el Cantábrico tiene valores medios en torno a 30 mol/m²/día, picos máximos de 64.3 mol/m²/día y mínimos de 0.1 mol/m²/día. Los valores de PAR en el cantábrico están dentro de los umbrales de crecimiento de todas las especies, excepto de *Codium* (6.048-17.28 mol/m²/día), especie que encuentra su óptimo de crecimiento con valores de PAR bajos.

En el Golfo de Cádiz la temperatura media oscila entre 18°C y 19°C, con picos máximos de 25.9°C. El valor medio de la salinidad es de 36 UPS, situándose dentro del rango de cultivo de todas las especies y el PAR medio se caracteriza por una importante homogeneidad espacial, con valores en torno a 40 mol/m²/día. Los máximos alcanzan los 64.7 mol/m²/día y los mínimos 0.2 mol/m²/día. Al igual que en el Cantábrico estos valores están por encima del rango de cultivo definido para *Codium* y superan el límite superior del umbral de crecimiento de todas las especies de macroalgas.

En el Mediterráneo, los valores medios de temperatura están entre 16.61°C y 19.6°C con picos de 9.14°C (costa oeste de Mallorca) y 29.73°C (Mar Balear a la altura de Peñíscola), registrados en la zona NO. La salinidad, por su parte, varía entre un mínimo de 36.31 UPS (en las proximidades del estrecho) y un máximo de 38.11 UPS (Golfo de León). Los valores medios varían entre 36.46 UPS en la zona del estrecho y 37.91 UPS en el Golfo de León. El valor medio del PAR en la zona NO está en torno a 35 mol/m²/día y de 39 mol/m²/día en la zona SO. Los valores de PAR por encima de 43 mol/m²/día incumplen los requerimientos de crecimiento de todas las especies.

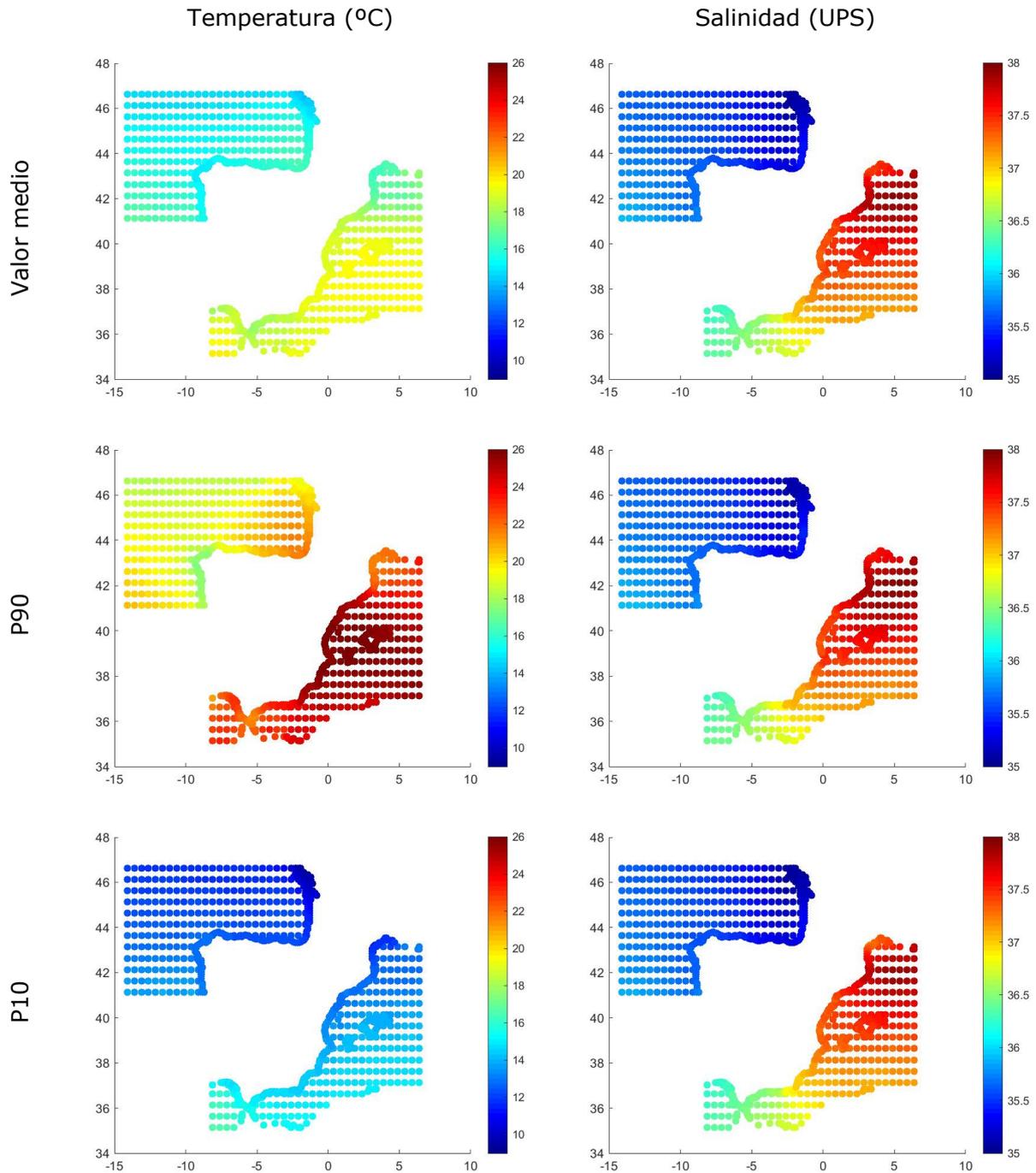


Figura 5. Valor medio, Percentil 90 y Percentil 10 de Temperatura y Salinidad (cálculos para el período de tiempo indicado en la Tabla 1).

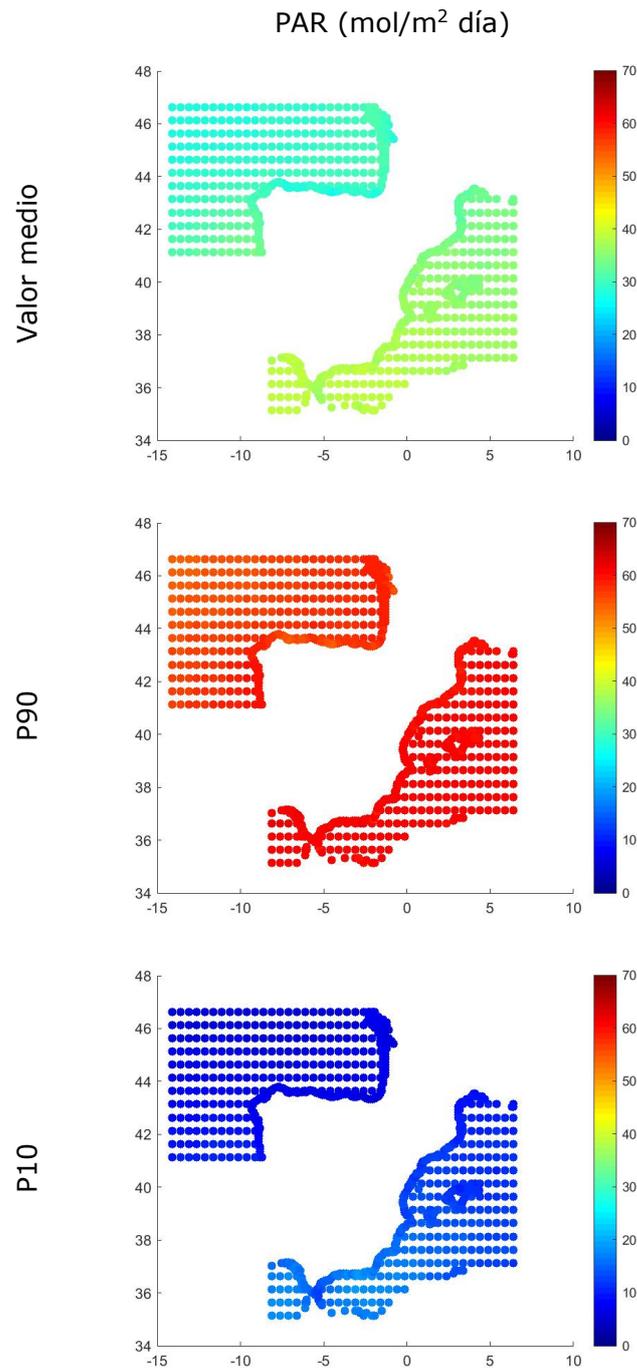


Figura 6. Valor medio, Percentil 90 y Percentil 10 de Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (cálculos para el período de tiempo indicado en la Tabla 1).

2.3.2. Variables de idoneidad estructural

La idoneidad estructural en el Cantábrico está condicionada por la batimetría y por la altura de ola significativa con período de retorno de 50 años (HS50). La altura de ola en el Cantábrico varía entre 0.97 m en la vertiente más interna del Golfo de Vizcaya y 13.18 m en el extremo noroeste (Figura 7). Estos valores están muy por encima de los 5 m soportados por los sistemas de cultivo. La velocidad de la corriente (C50) no limita en ningún caso las condiciones estructurales (1m/s). Los valores medios de velocidad son bajos y los picos máximos (0.93 m/s) se registran en zonas próximas a la costa. En la región cantábrica no se encuentran pendientes superiores al umbral para la ubicación de los sistemas de cultivo (25%).

En el Golfo de Cádiz el oleaje constituye la principal limitación estructural. HS50 varía entre máximos de 8.25 m y mínimos de 1.61 m. Los registros de C50 están permanentemente por debajo de 1m.

En el Mediterráneo, el oleaje varía entre mínimos de 1.9 m en la costa del Mar de Alborán y máximos de 7.24 m en la costa este de Menorca (Mediterráneo SO). Las máximas corrientes se alcanzan en zonas puntuales de la costa (0.83 m/s) de Castellón y de Murcia.

2.3.3. Variables de idoneidad operativa

En el Cantábrico la operatividad está limitada por el oleaje y, puntualmente, por el viento. La altura de ola significativa (Hs) oscila entre mínimos de 0.0 m y máximos de 13.9 m (Figura 8). Son frecuentes los valores superiores al umbral de idoneidad operativa (<1m), lo cual supondría una limitación temporal de las labores operativas. El viento alcanza valores máximos en el extremo noroccidental (en torno a los 28.58 m/s) y mínimos en el norte de Portugal (0.57 m/s). Los valores medios están dentro de los rangos óptimos establecidos como criterios operativos, si bien los picos máximos de viento limitarían temporalmente las labores operativas, cuyo umbral de idoneidad se sitúa en 15 m/s.

En el Golfo de Cádiz Hs oscila entre máximos de 8.6 m y mínimos de 0.1 m. Por tanto, existen numerosas zonas que se verían limitadas operativamente por el oleaje (<1m). Si embargo, el viento en esta zona no supone una limitación para la operatividad.

En el Mediterráneo la operatividad se vería limitada por el oleaje, pero no por el viento. La altura de ola significativa alcanza mínimos de 0 m y máximos próximos a 7.1 m en la zona NO, donde hay zonas con valores medios y puntuales muy por encima del umbral de 1m. La velocidad media del viento varía entre 4 y 8 m/s, con picos máximos de 29.9 m/s en la costa de Cataluña y que en ningún caso superan el umbral operativo de 15 m/s.

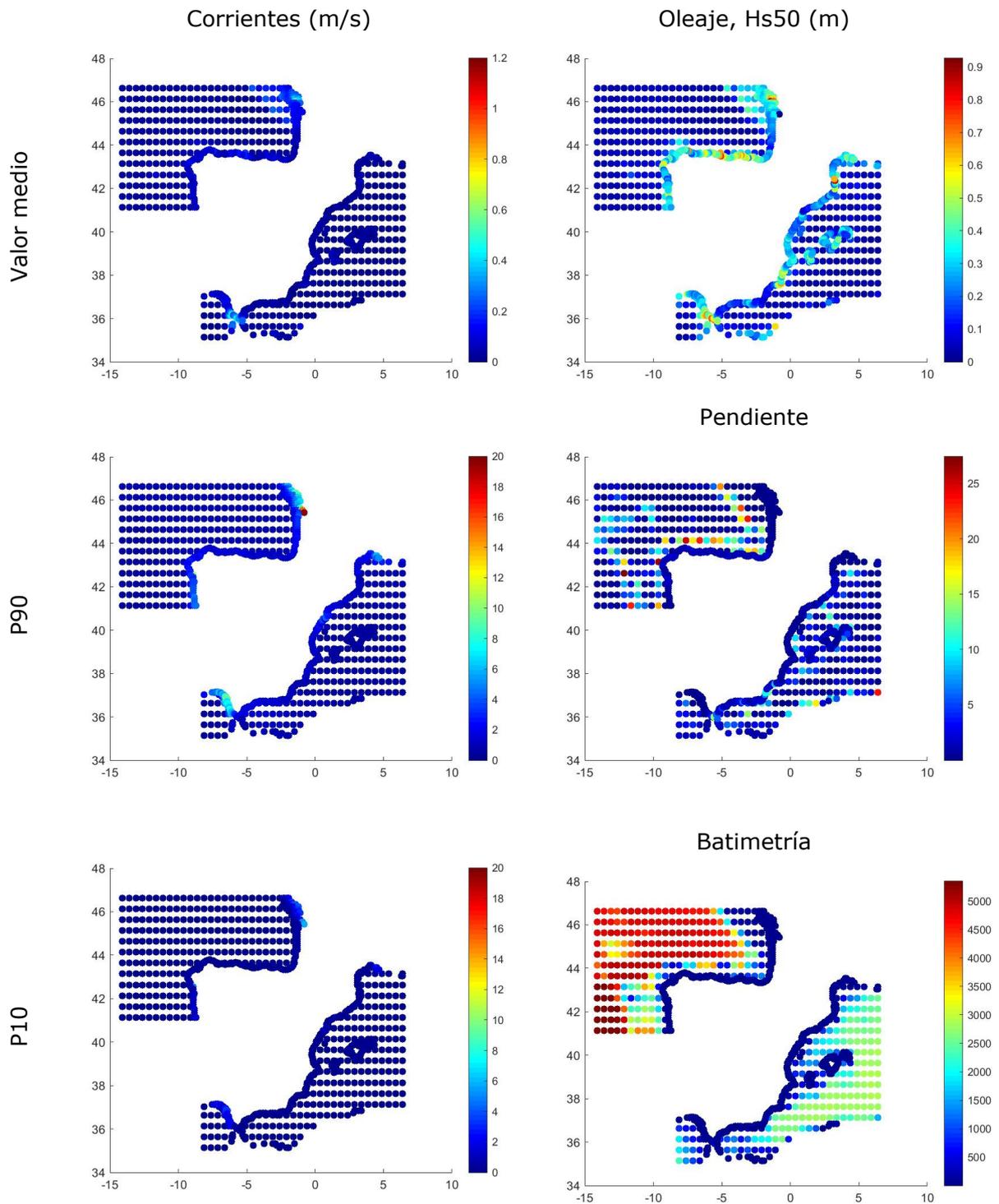


Figura 7. Valor medio, Percentil 90 y Percentil 10 de Corrientes. Se indica también el valor de Hs50, pendiente y batimetría (cálculos para el período de tiempo indicado en la Tabla 1).

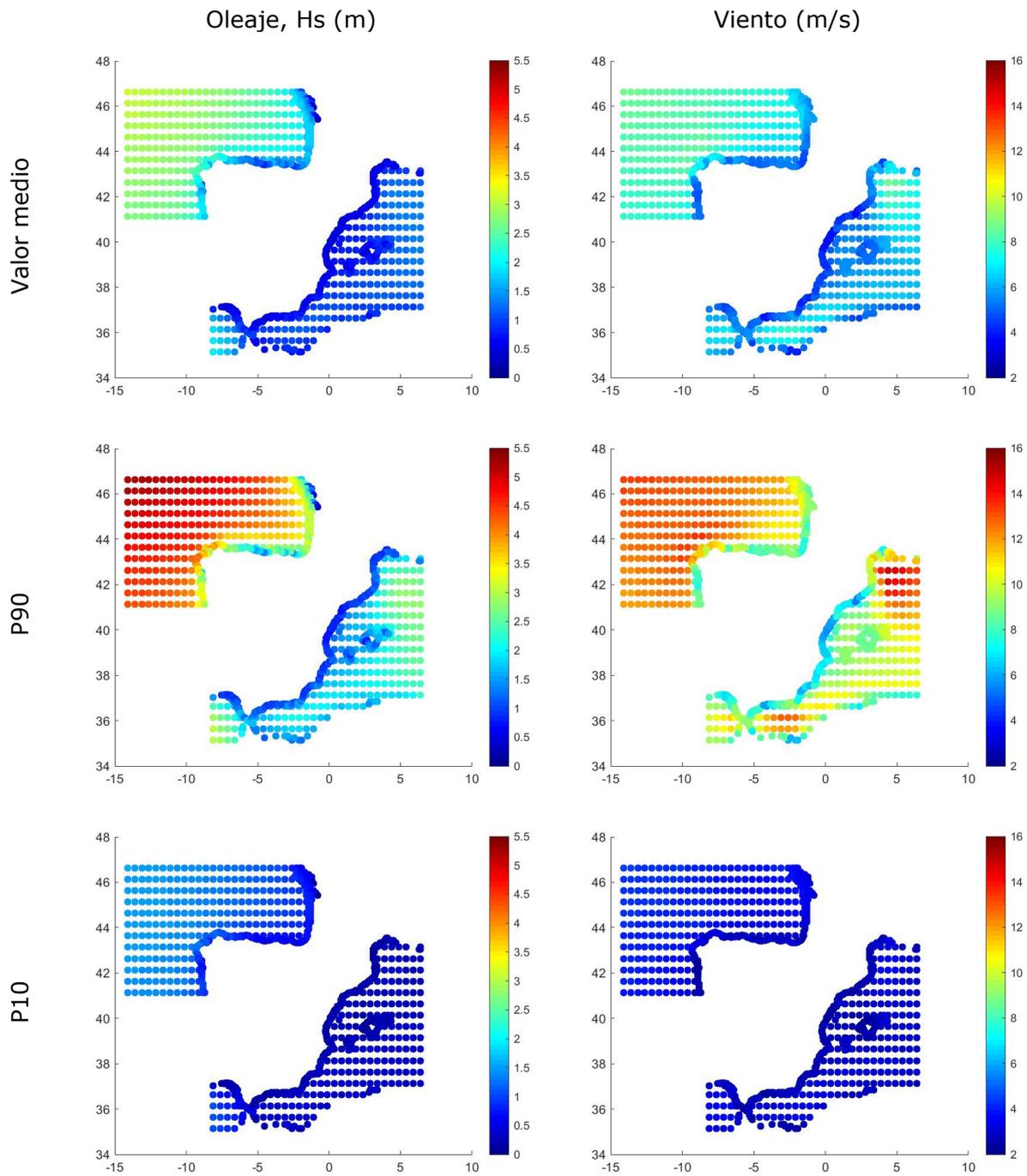


Figura 8. Valor medio, Percentil 90 y Percentil 10 de Oleaje, Hs y Viento (cálculos para el período de tiempo indicado en la Tabla 1).

2.4. Evaluación de la oportunidad de cultivo

Este apartado presenta la oportunidad de cultivo en aguas costeras y marinas españolas de *Saccharina latissima*, *Porphyra sp*, *Himanthalia elongata*, *Codium tomentosum* y *Chondrus crispus*.

2.4.1. Idoneidad Biológica

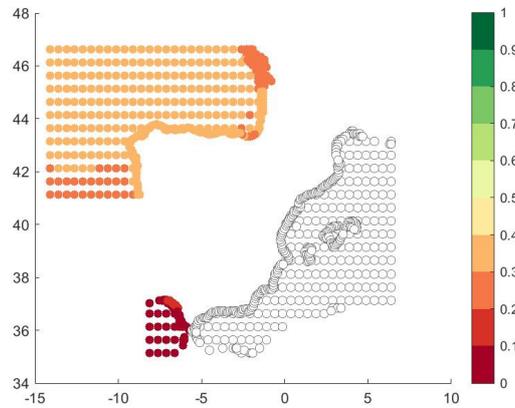
Las Figuras 9-13 muestran los mapas espaciales de Idoneidad Biológica (en adelante IB) en las aguas de soberanía y jurisdicción española de las 5 especies de macroalgas. Las cinco especies de interés presentan gradientes espaciales de IB en las distintas regiones marinas. La idoneidad biológica está fuertemente condicionada por la temperatura superficial del agua. En general, las especies tienen preferencia por aguas frías y rangos de crecimiento estrechos (10-15 °C). La excepción son *H. Elongata* y *C. tomentosum* con una mayor tolerancia a las condiciones térmicas del agua y, por tanto, menos limitadas por esta variable. La luz, por su parte, solo es limitante para *C. tomentosum*, especie que necesita poca luz y que tolera un rango muy estrecho de variabilidad. La salinidad es una variable relevante en el crecimiento, pero la tolerancia de las macroalgas a los cambios de esta variable es amplia y en el análisis efectuado la probabilidad de que sus valores estén dentro del rango de crecimiento ha sido del 100% para todas las especies. Por esta razón, los resultados de la salinidad no se han incluido. La idoneidad biológica se clasifica en cuatro categorías: nula (0), baja (<0.4), moderada (0.4-0.7) y alta (>0.7).

Las condiciones del Cantábrico (14.2 °C -18.8 °C y 35 mol/m²/día) se ajustan bien a los requerimientos de crecimiento de *Himanthalia elongata* que alcanza idoneidades moderadas, de 0.4-0.6. El resto de especies, tienen idoneidades moderadas (*Chondrus crispus*, *Porphyra sp*, *Saccharina latissima*) o bajas (*Codium tomentosum*). *H. elongata*, especie que mejor tolera las condiciones de temperatura, presenta un marcado gradiente espacial en la IB que se incrementa hacia Galicia, donde se registran las temperaturas del agua más bajas.

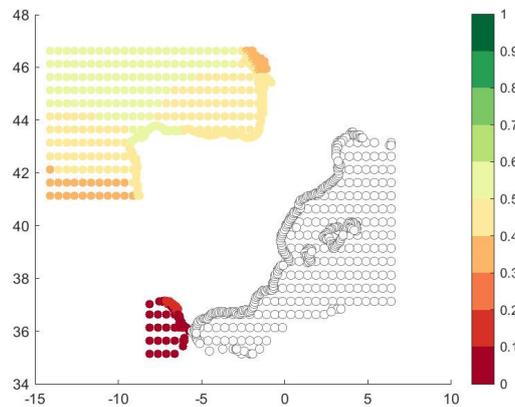
El Golfo de Cádiz reúne peores condiciones para el cultivo de macroalgas que el Cantábrico. *C. tomentosum* y *C. crispus* tienen idoneidades nulas tanto en costa, como en aguas oceánicas. Para *S. latissima* y *Porphyra sp* la idoneidad es aguas oceánicas es nula y baja en la zona costera (<0.4). *H. elongata* nuevamente registra las mejores condiciones para el cultivo, con un gradiente espacial que se incrementa hacia la costa, donde se alcanzan idoneidades moderadas (0.4).

En el Mediterráneo la temperatura y el PAR delimitan dos zonas con comportamientos marcadamente diferentes (Mediterráneo NO y SO) y cuyo límite se sitúa en el Cabo de la Nao (Alicante). En términos generales, la oportunidad de cultivo de macroalgas en el Mediterráneo es baja. En el Mediterráneo NO, *Porphyra sp* alcanza valores moderados de idoneidad y *C. tomentosum* y *C. crispus*, especies propias de ambientes más fríos, no encuentran en el Mediterráneo condiciones óptimas para su crecimiento.

a) **Idoneidad Biológica de *Saccharina latissima***



b) Probabilidad de condiciones óptimas de SST



c) Probabilidad de condiciones óptimas de PAR

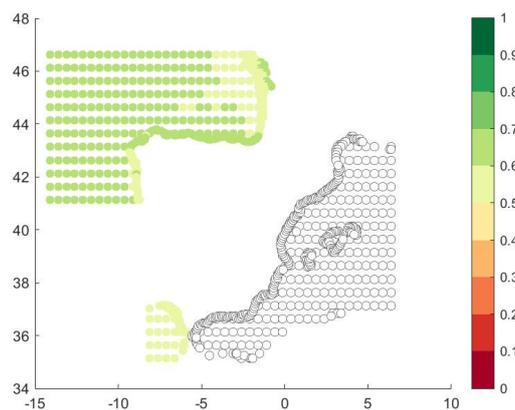
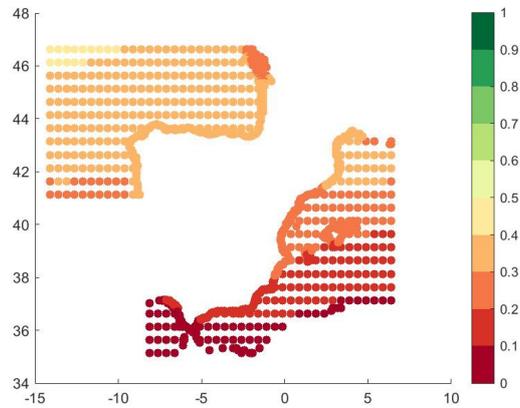
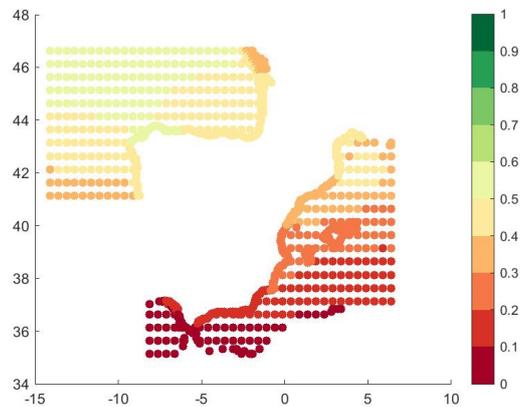


Figura 9. Mapas de probabilidad espacial: a) Idoneidad Biológica de *Saccharina latissima*; b) Temperatura, SST (10 -15°C) y c) Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (8,64-43,2 mol/m² día).

a) **Idoneidad Biológica de *Porphyra***



b) Probabilidad de condiciones óptimas de SST



c) Probabilidad de condiciones óptimas de PAR

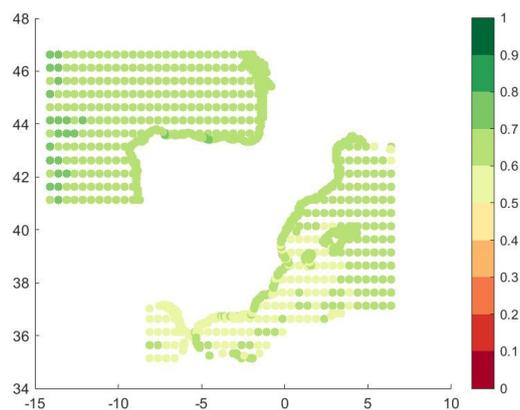
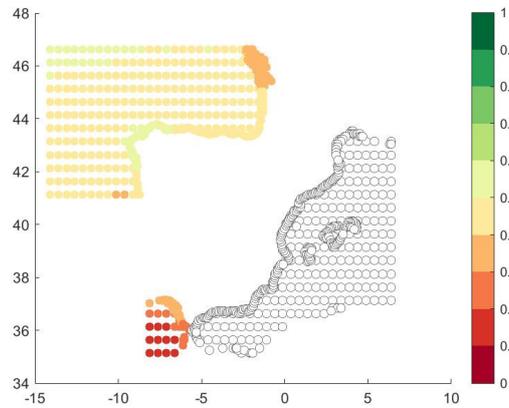
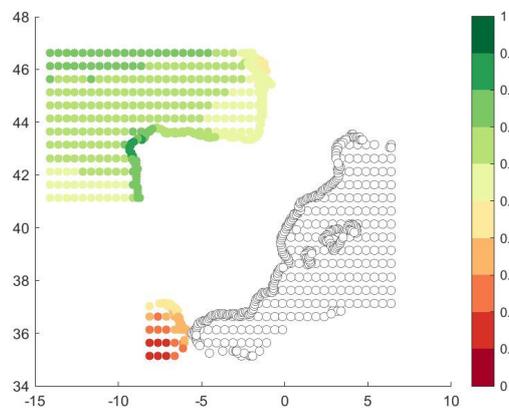


Figura 10. Mapas de probabilidad espacial: a) Idoneidad Biológica de *Porphyra sp* obtenida a partir de b) la Temperatura, SST (10-15°C) y c) la Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (6,048-43,2 mol/m² día).

a) **Idoneidad Biológica** de *Himanthalia elongata*



b) Probabilidad de condiciones óptimas de SST



c) Probabilidad de condiciones óptimas de PAR

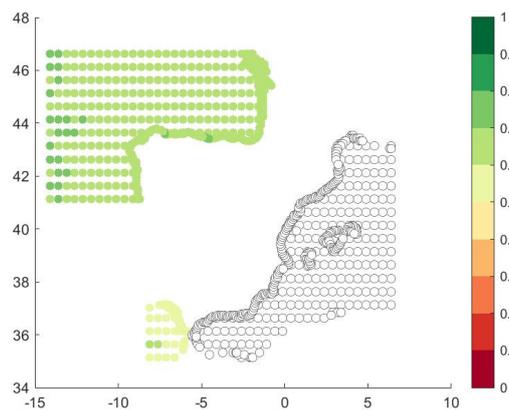
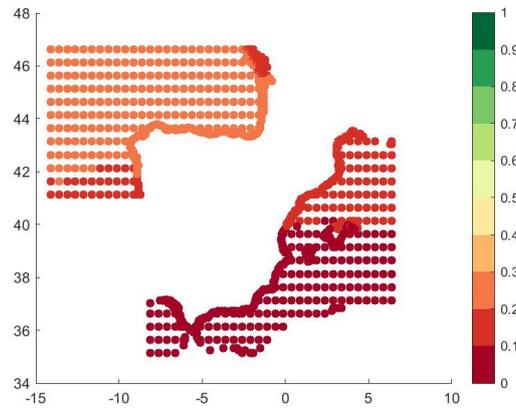
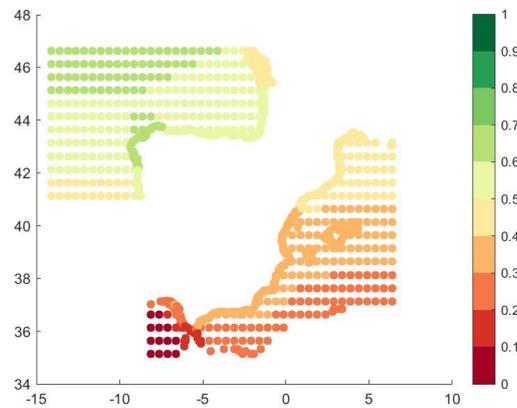


Figura 11. Mapas de probabilidad espacial: a) Idoneidad Biológica de *Himanthalia elongata* obtenida a partir de b) la Temperatura, SST (10 -17°C) y c) la Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (6,048-43,2 mol/m² día).

a) **Idoneidad Biológica** de *Codium tomentosum*



b) Probabilidad de condiciones óptimas de SST



c) Probabilidad de condiciones óptimas de PAR

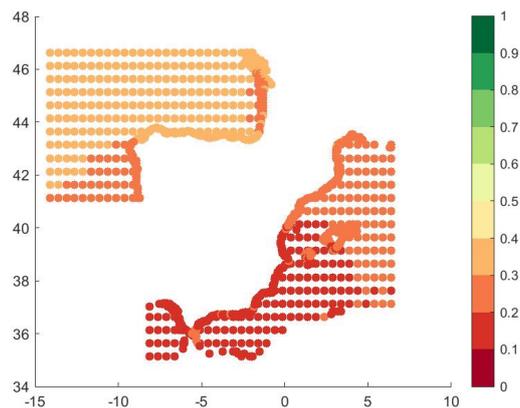
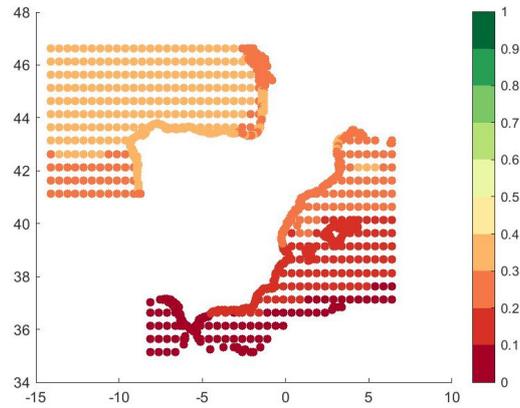
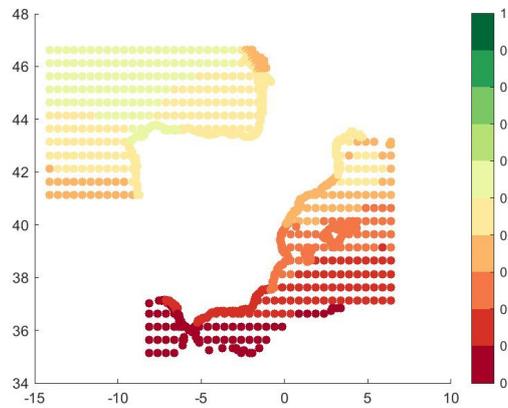


Figura 12. Mapas de probabilidad espacial: a) Idoneidad Biológica de *Codium tomentosum* obtenida a partir de b) la Temperatura, SST (10 -16°C) y c) la Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (6,048-17,28 mol/m² día).

a) **Idoneidad Biológica** de *Chondrus crispus*



b) Probabilidad de condiciones óptimas de SST



a) Probabilidad de condiciones óptimas de PAR

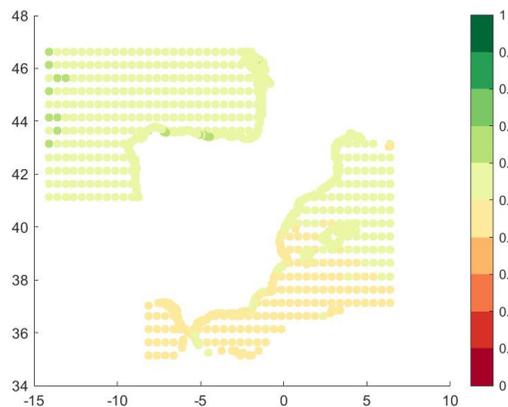


Figura 13. Mapas de probabilidad espacial: a) Idoneidad Biológica de *Chondrus crispus* obtenida a partir de b) la Temperatura, SST (10 -15°C) y c) la Radiación Fotosintéticamente Activa, PAR (5,616-34,56 mol/m² día).

2.4.2. Idoneidad Estructural

Las restricciones de batimetría y oleaje son determinantes en la elección de posibles zonas de cultivo a la franja costera (Figura 14) y son determinantes en la exclusión de la práctica totalidad de la ZEE para la instalación de dispositivos de cultivo. La batimetría restringe las zonas estructuralmente idóneas a las zonas de la plataforma más próximas a costa (<300m). Respecto al oleaje, las condiciones más favorables se ciñen a emplazamientos costeros de la costa Mediterránea, del sur de las Islas Baleares y del Golfo de Cádiz. Las corrientes registradas están por debajo de 1 m/s y la pendiente no supera el 25%. Atendiendo a la misma clasificación utilizada para la idoneidad biológica, la idoneidad estructural media es baja en el Cantábrico (0.1) y moderada en el Golfo de Cádiz (0.53) y Mediterráneo (0.53). Sólo la costa Mediterránea, el sur de las Islas Baleares y el Golfo de Cádiz presentan condiciones idóneas (idoneidad>0.66) para la instalación de dispositivos de Cultivo. En el Cantábrico localizaciones específicas de la costa, al abrigo de los oleajes del Noroeste, son idóneas.

2.4.3. Idoneidad Operativa

Los mapas de idoneidad operativa (Figura 15) se establecen con base en las condiciones de oleaje (n° ventanas de 8 h, $H_s < 1$ m), viento (n° ventanas de 8 h, $V < 15$ m/s) y distancia al puerto más próximo (<40 km). Los valores más elevados de idoneidad operativa se alcanzan en el Mediterráneo (0.73) y Golfo de Cádiz (0.7) y los mínimos en el Cantábrico (0.42), donde nuevamente las condiciones meteo-oceánicas son altamente limitantes. Las idoneidades máximas en términos operativos se registran en las zonas más próximas a costa y al abrigo de las Islas Baleares, entre el Delta del Ebro y Cabo de la Nao.

La distancia a Puerto y el oleaje son los factores que más restringen la operatividad. La zona de estudio es extensa y el límite definido para esta variable es de 40 km. Este valor limita la operatividad a las zonas más próximas a costa. Respecto al viento, aunque la mayor parte de la zona de estudio presenta un número muy elevado de ventanas de acceso (accesibilidad total 1095 ventanas), en las aguas oceánicas cantábricas se alcanzan valores moderados. Sucede lo mismo para las ventanas de oleaje, con zonas de acceso casi total en la costa mediterránea, y Golfo de Cádiz, y zonas con accesibilidad nula en el cantábrico.

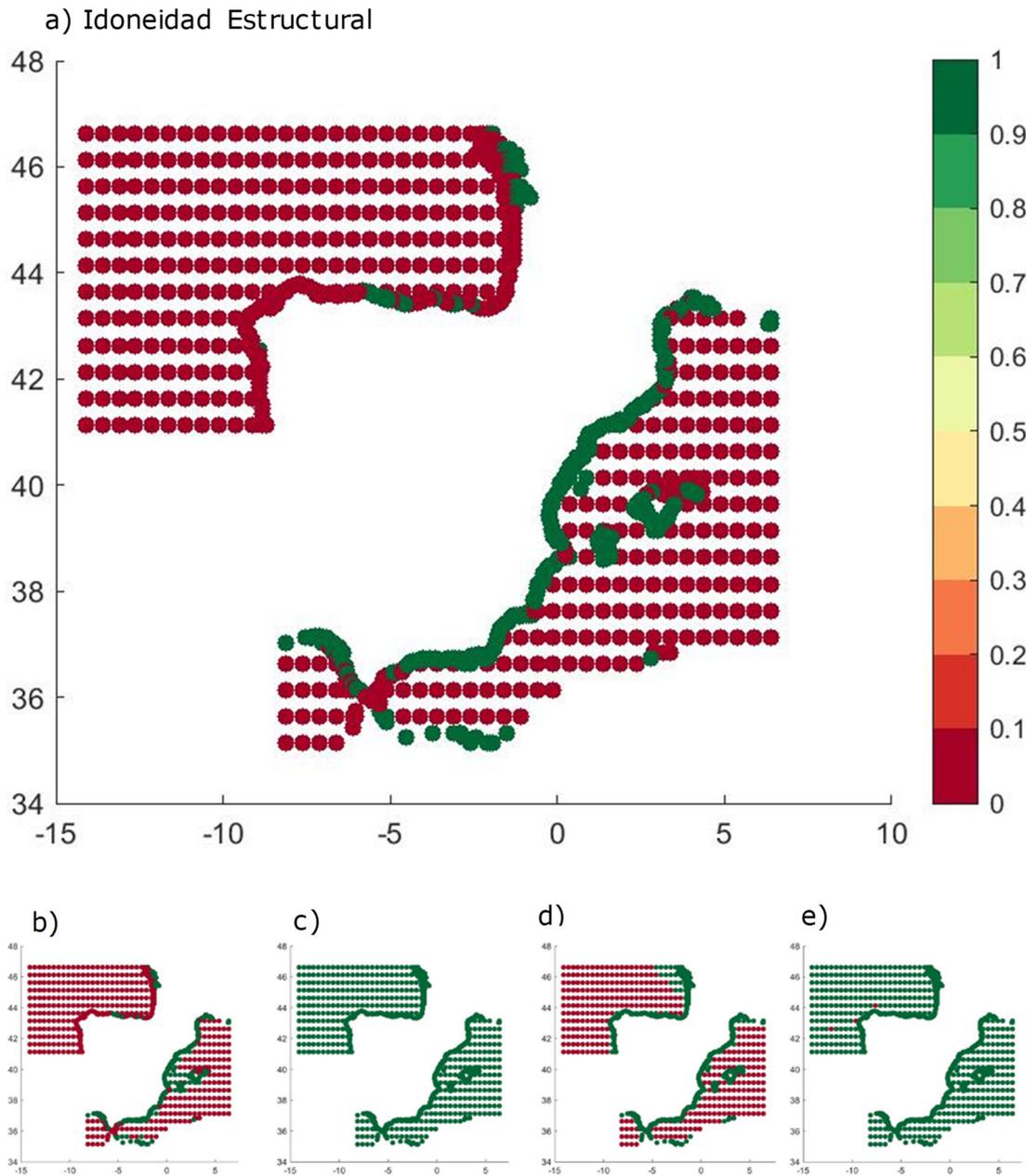


Figura 14. a) Idoneidad estructural del dispositivo de cultivo en las aguas españolas, con indicación de los valores de: b) probabilidad de condiciones óptimas para oleaje, $H_{s50} (<5m)$, c) probabilidad de condiciones óptimas para corrientes, $C_{50} (<1m/s)$; d) batimetría (<300m); y e) pendiente (<25%).

a) Idoneidad Operativa

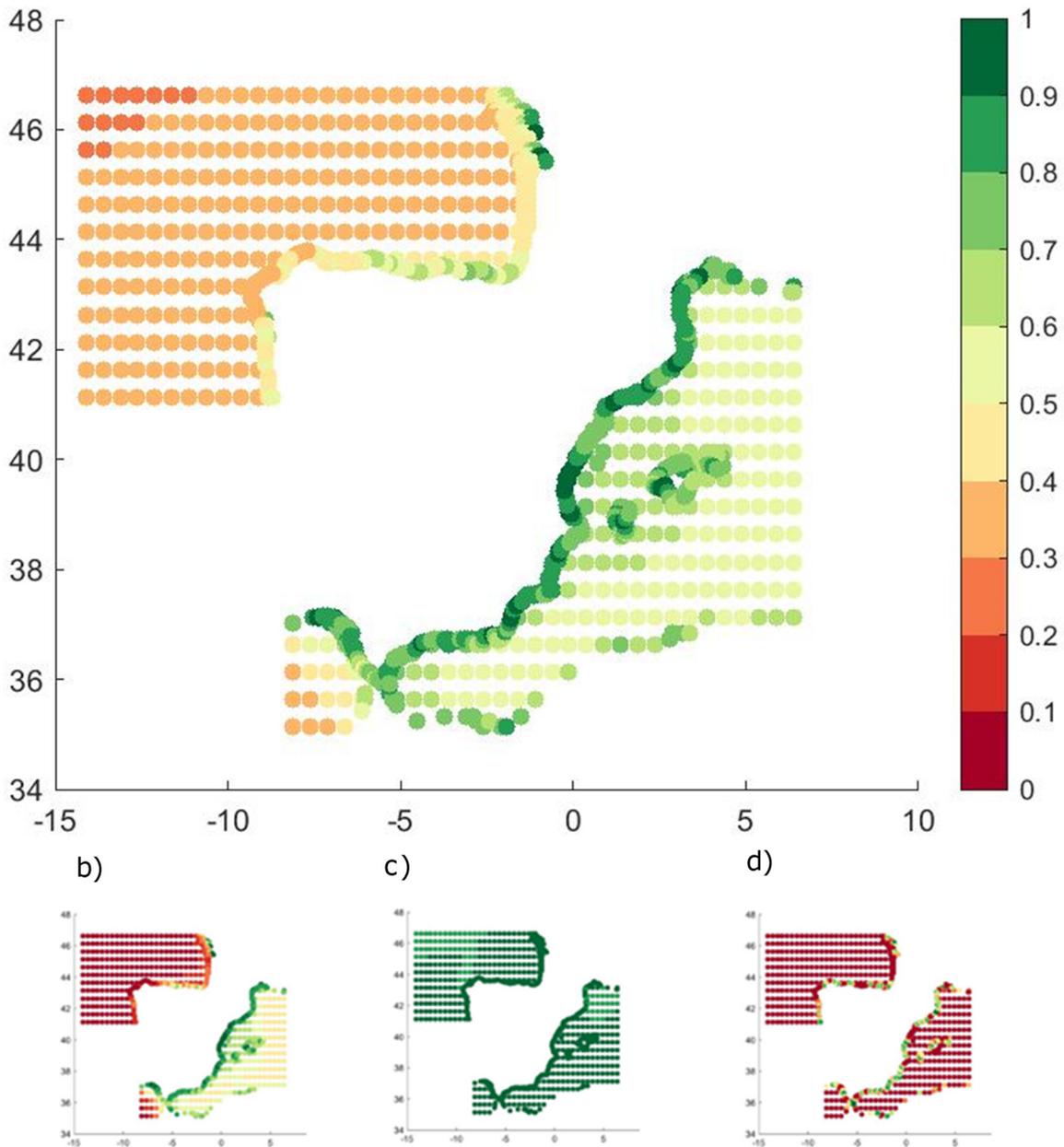


Figura 15. a) Idoneidad Operativa para las actividades de operación y mantenimiento en las aguas españolas, con indicación de los valores de: b) condiciones óptimas para oleaje ($H_s < 1\text{m}$); b) condiciones óptimas para viento ($< 15\text{m/s}$); y c) distancia a puerto ($< 40\text{km}$).

2.5. Oportunidad de Cultivo y zonificación

La oportunidad de cultivo para la instalación de parques de acuicultura oceánica se determina con base en la idoneidad biológica (para la especie), la idoneidad estructural (para la jaula) y la idoneidad operativa (para la actividad). El elemento más crítico en el cálculo de la oportunidad de cultivo es la idoneidad estructural. Sus resultados restringen las oportunidades de cultivo a la franja costera, descartando para tal fin las aguas oceánicas donde las condiciones de batimetría y oleaje están fuera de los rangos de idoneidad (Figura 16).

La principal conclusión que se alcanza a partir de los resultados obtenidos es que las aguas costeras españolas no ofrecen buenas oportunidades para el cultivo de macroalgas. La explotación del recurso macroalgas en las costas españolas iría acompañado de una gran incertidumbre. La especie con mejores oportunidades es *Himanthalia elongata*. En zonas puntuales del Cantábrico esta especie registra valores de oportunidad de cultivo entre 0.4 y 0.5. El resto de especies, por su parte, registra probabilidades de encontrar condiciones óptimas para el crecimiento por debajo de 0.4.

La zonificación del espacio marítimo para el cultivo muestra que las aguas españolas disponen de 2200 km² de superficie moderadamente apta para el cultivo de *Himanthalia elongata*, en la región cantábrica (2200 km²). Para el resto de especies, las condiciones de cultivo en aguas de jurisdicción española son poco aptas (franja costera) o no aptas (aguas oceánicas) (Figura 17).

El Apéndice I presenta, para cada especie, la información espacial sobre la Oportunidad de Cultivo, Idoneidad Biológica, Idoneidad Estructural, e Idoneidad Operativa en la Zona Económica Exclusiva Española.

Ficha 1. *Saccharina Latissima*.

Ficha 2. *Porphyra sp.*

Ficha 3. *Himanthalia elongata*.

Ficha 4. *Codium tomentosum*.

Ficha 5. *Chondrus crispus*.

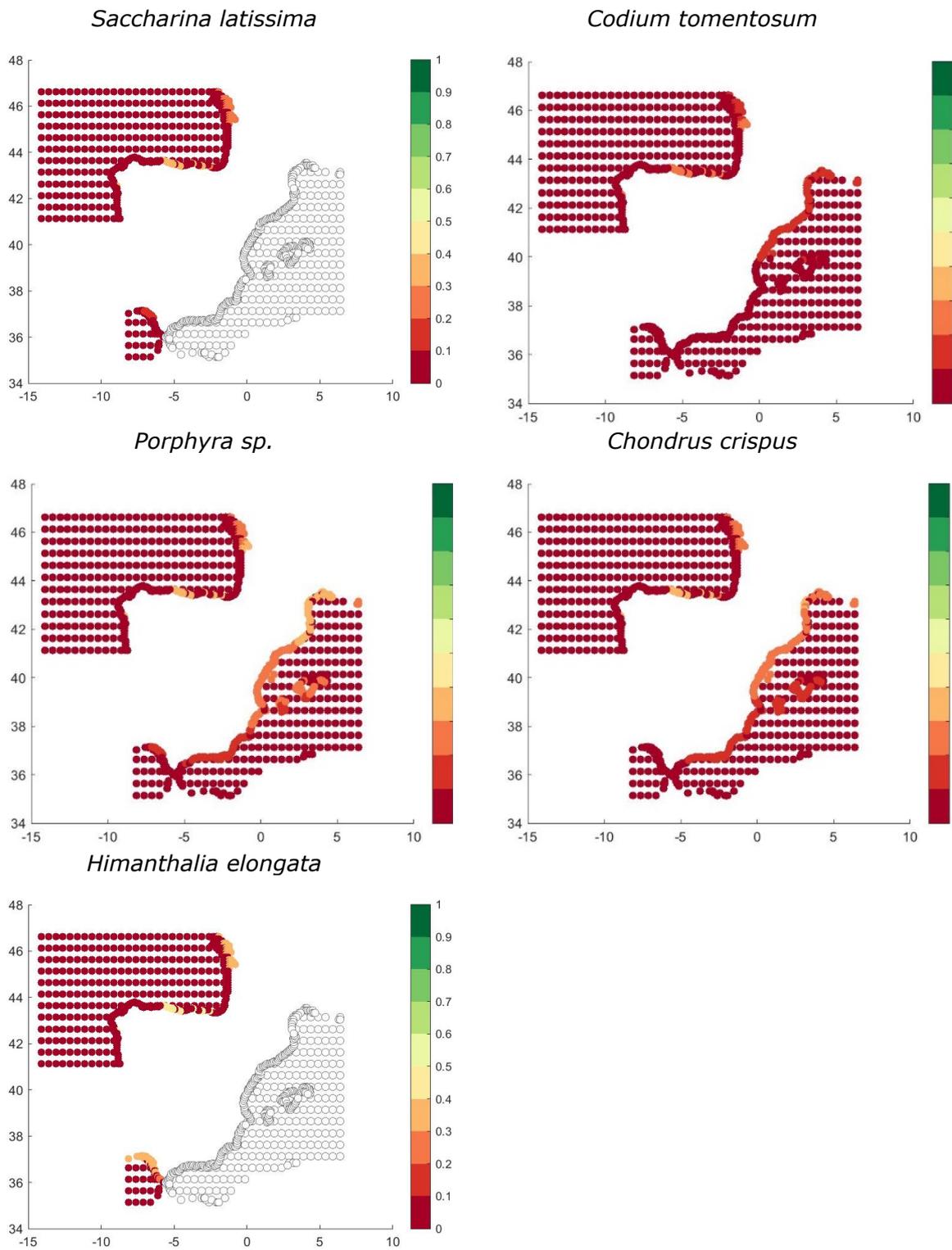


Figura 16. Oportunidad de Cultivo de *Saccharina latissima*, *Porphyra sp.*, *Himanthalia elongata*, *Codium tomentosum* y *Chondrus crispus*.

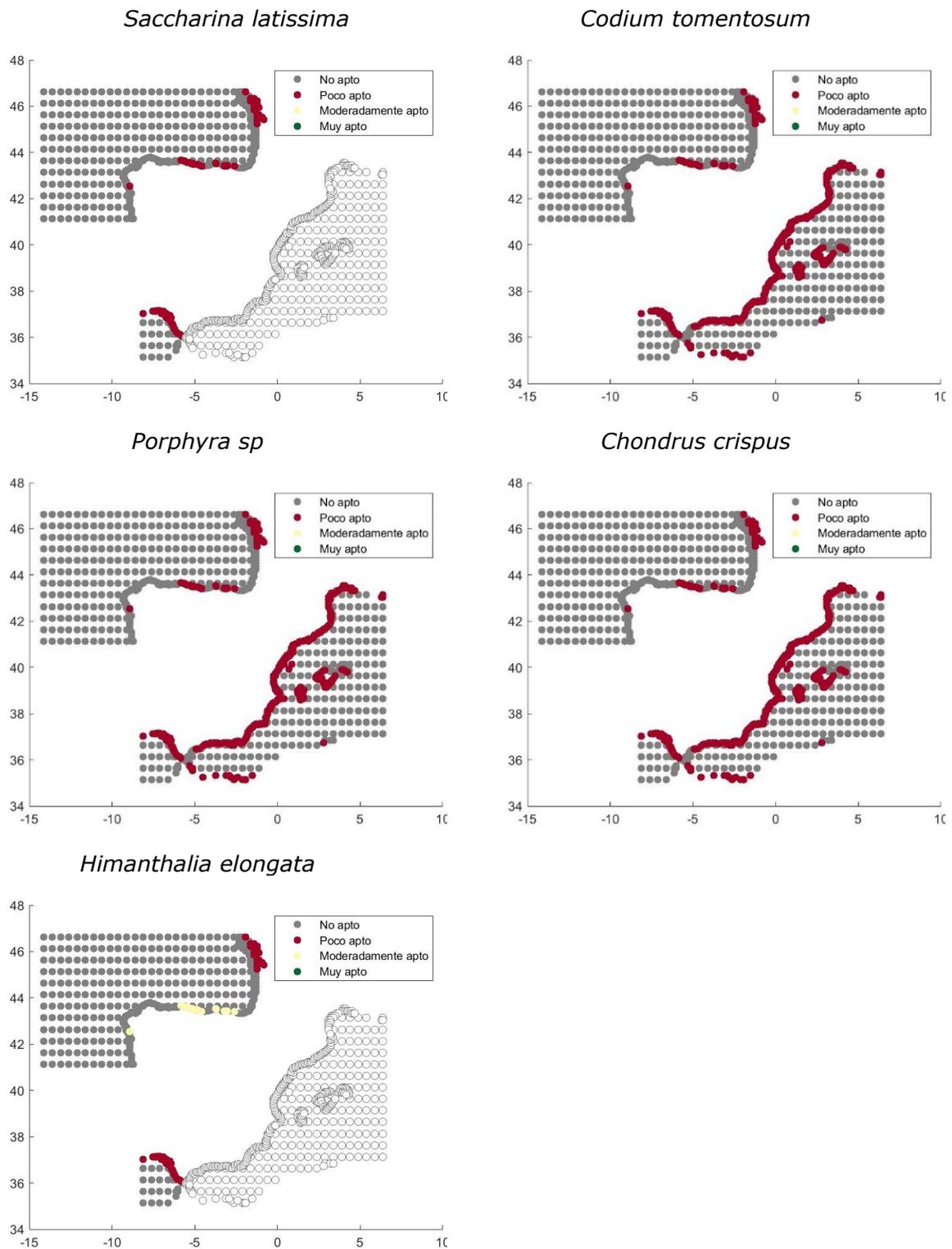


Figura 17. Zonificación de las condiciones para el cultivo de *Saccharina latissima*, *Porphyra sp*, *Himanthalia elongata*, *Codium tomentosum* y *Chondrus crispus*.

3. CONCLUSIONES DE LA ACTIVIDAD

La principal conclusión que se alcanza es que las aguas costeras españolas no ofrecen buenas oportunidades para el cultivo de macroalgas. La explotación del recurso macroalgas en las costas españolas iría acompañado de una gran incertidumbre. La especie con mejores condiciones para su cultivo es *Himanthalia elongata*. En el mediterráneo NO (Golfo de León) y zonas puntuales del Cantábrico esta especie encuentra condiciones moderadamente aptas para el cultivo, en una superficie de 2000 km² y 2200 km², respectivamente.

Los estudios efectuados muestran que la idoneidad biológica de las especies está muy condicionada por la temperatura superficial del agua. En general, las especies de macroalgas estudiadas tienen preferencia por aguas frías y rangos de crecimiento estrechos (10-15 °C). La excepción son *H. Elongata* y *C. tomentosum* con una mayor tolerancia a las condiciones térmicas del agua y, por tanto, menos limitadas por esta variable. La salinidad es una variable relevante en el crecimiento, pero que no es limitante en las aguas españolas y las condiciones lumínicas solo restringen el crecimiento de *C. tomentosum*, especie que para crecer necesita poca intensidad de la luz.

Las zonas idóneas para la instalación de dispositivos de cultivo (idoneidad estructural) están muy determinadas por el oleaje y la batimetría. Las restricciones de la batimetría restringen las zonas estructuralmente idóneas a la plataforma continental más próxima a la costa y las restricciones del oleaje a emplazamientos costeros de la costa Mediterránea, del sur de las Islas Baleares y del Golfo de Cádiz.

La operatividad está muy condicionada por la distancia a puerto y el oleaje. Las mejores condiciones en términos de operatividad se registran en las zonas más próximas a costa y al abrigo de las Islas Baleares, entre el Delta del Ebro y Cabo de la Nao.

4. REFERENCIAS

- Asturnatura.com "*Himanthalia elongata*". Asturnatura.com [en línea]. Num. 3, 07/03/05 [consultado el: 23/08/2019]. Disponible en <<https://www.asturnatura.com/especie/himanthalia-elongata.html>>. ISSN 1887-5068.
- Asturnatura.com "*Codium tomentosum*". Asturnatura.com [en línea]. Num. 1, 23/12/04 [consultado el: 23/08/2019]. Disponible en <[Asturnatura.com/especie/codium-tomentosum.html](https://www.asturnatura.com/especie/codium-tomentosum.html)>. ISSN 1887-5068.
- Asturnatura.com "*Chondrus crispus* Stackhouse". Asturnatura.com [en línea]. Num. 6, 13/11/05 [consultado el: 23/08/2019]. Disponible en <<https://www.asturnatura.com/especie/chondrus-crispus.html>>. ISSN 1887-5068. Chopin, 1999.
- Bird, N. L., L. C.-M. Chen · J. McLachlan. 1979. Effects of Temperature, Light and Salinity on Growth in Culture of *Chondrus crispus*, *Furcellaria lumbricalis*, *Gracilaria tikvahiae* (Gigartinales, Rhodophyta), and *Fucus serratus* (Fucales, Phaeophyta). *Botanica Marina* 22(8):521-528.
- Borum, J., Pedersen, M.F., Krause-Jensen, D., Christensen, P.B., Nielsen, K. 2002. Biomass, photosynthesis and growth of *Laminaria saccharina* in a high-arctic fjord, NE Greenland. *Marine Biology*, 141(1), pp. 11-19.
- de la Hoz, C.F., Ramos, E., Acevedo, A., (...), Losada, J., Juanes, J.A. 2018. OCLE: A European open access database on climate change effects on littoral and oceanic ecosystems. *Progress in Oceanography*, 168, pp. 222-231.
- Cabello-Pasini, C., Eneas Aguirre-von-Wobeser, Felix L. Figueroa. 2000. Photoinhibition of photosynthesis in *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae), *Chondrus crispus* (Rhodophyceae) and *Ulva lactuca* (Chlorophyceae) in outdoor culture systems. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 57 (2000) 169–178.
- Cid, A., Castanedo, S., Abascal, A.J., Menéndez, M., Medina, R., 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Clim. Dyn.*, 43: 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2041-0>.
- Díaz, J., Figueroa, A., 2014. Sistema Acuicola, Acuicultura. Monografías.com (<http://www.monografias.com/trabajos102/sistema-acuicola-acuicultura-tipos/sistema-acuicola-acuicultura-tipos.shtml#ixzz5ATsRQEsp>).
- Donlon, C.J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., Wimmer, W., 2012. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of the Environment*, 116: 140–158.
- Fortes, M. D., Lüning, K. 1980. Growth Rates of North Sea Macroalgae in Relation to Temperature, Irradiance and Photoperiod. *Helgoland Marine Research* 34(1):15-29.
- Gonzalez, A., Jessica Beltran and Bernabe Santelices. 2014. Colonisation and growth strategies in two *Codium* species (Bryopsidales, Chlorophyta) with different thallus forms. *Phycologia* Volume 53 (4), 353-358.

- Hanelt, D., Wiencke, C., Karsten, U., Nultsch, W. 1997. Photoinhibition and recovery after high light stress in different developmental and life-history stages of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta). *Journal of Phycology* 33(3), pp. 387-395.
- Hwang, E.K., Baek, J.M. & Park, C.S. (2009). Cultivation of the green alga, *Codium fragile* (Suringar) Hariot, by artificial seed production in Korea. *Proceedings of the International Seaweed Symposium 19*: 19-25, 4 figs, 2 tables
- Yotsui, T. & Migita, S. (1989). Cultivation of a green alga *Codium fragile* by regeneration of medullary threads. *Nippon Suisan Gakkaishi* 55: 41-44.
- Katz, S., Kizner, Z., Dubinsky, Z., Friedlander, M. 2000. Responses of *Porphyra linearis* (Rhodophyta) to environmental factors under controlled culture conditions. *Journal of Applied Phycology*, 12(3-5), pp. 535-542.
- Kim, K. Y., Garbary, d.j. 2007. Photosynthesis in *Codium fragile* (Chlorophyta) from a Nova Scotia estuary: responses to desiccation and hyposalinity. *Mar Biol* (2007) 151:99–107.
- Li Xiao, Peng Zhao, Wang Gaoge, Li Dapeng, Wang Jicheng, Duan Delin. 2010. Effects of temperature and irradiance on early development of *Chondrus ocellatus* Holm (Gigartinales, Rhodophyta). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* 28(3):508-513.
- Luning, K. 1990. *Seweed. Their Environment, Biogeography, and Ecophysiology*. John Wiley & Sons- 544 pp.
- Perez, J., Menendez, M., Losada, I.J., 2017. GOW2: A global wave hindcast for coastal applications, *Coastal Engineering*, 124: 1-11.
- Peteiro, C., Sánchez, N., Martínez, B. 2016. Mariculture of the Asian kelp *Undaria pinnatifida* and the native kelp *Saccharina latissima* along the Atlantic coast of Southern Europe: An overview. *Algal Research*, 15, pp. 9-23.
- Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R., Losada, I.J., 2012. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coast. Eng.*, 65: 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.T., Chuang, H.Y., Juang, H.M.H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91: 1015–1057. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- Serodio J, Cruz S, Cartaxana P, Calado R. 2014 Photophysiology of kleptoplasts: photosynthetic use of light by chloroplasts living in animal cells. *Phil. Trans. R. Soc. B* 369: 20130242. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0242>.
- Silva, M. 2018. Cultivation of *Osmundea pinnatifida* and *Codium tomentosum*, native seaweed species with commercial potential. PhD. Universidade Do Porto. 71pp.

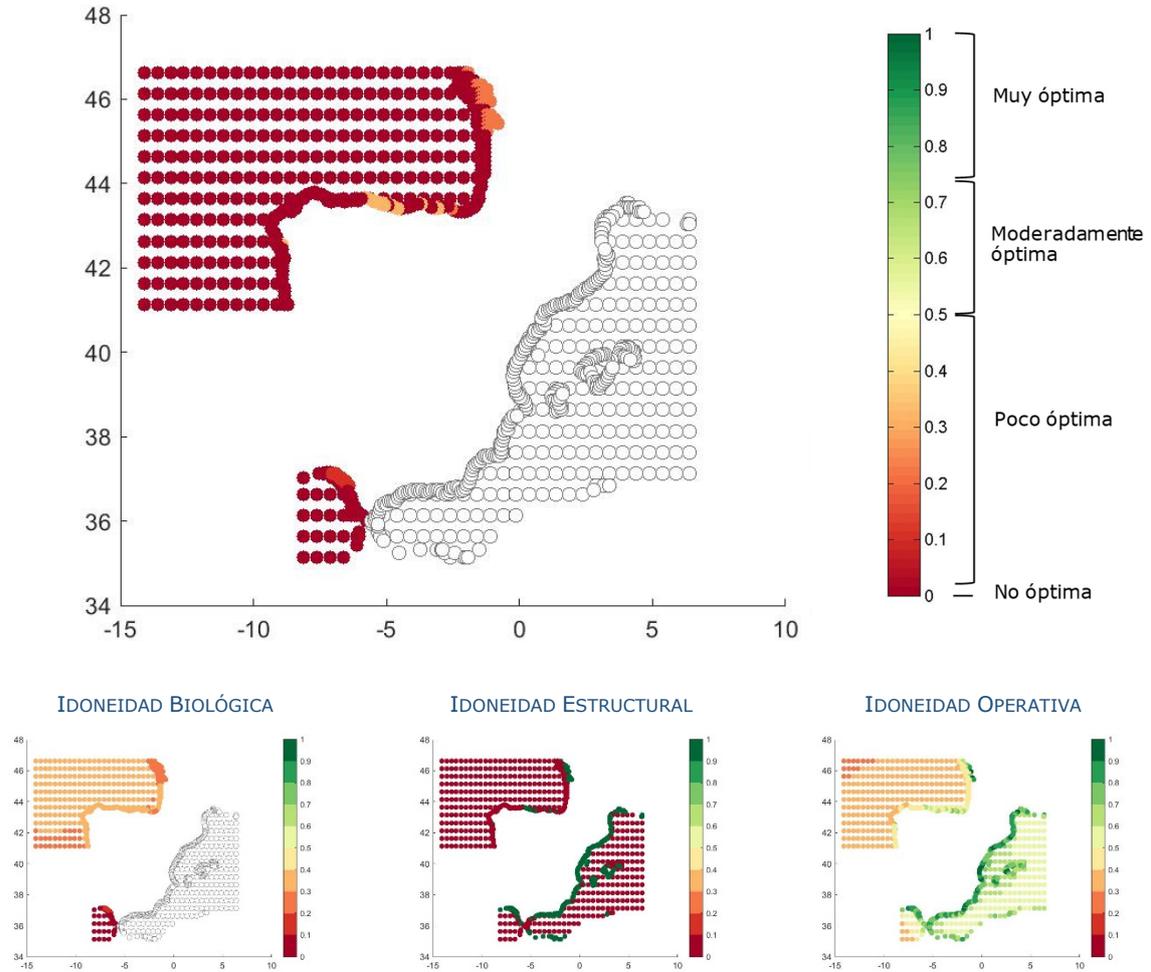
- Schuckmann, K. Von, Traon, P. Le, Alvarez-fanjul, E., Axell, L., Balmaseda, M., Breivik, L.-A., Brewin, R.J.W., Bricaud, C., Drevillon, M., Drillet, Y., Dubois, C., Embury, O., Etienne, H., Sotillo, M.G., Garric, G., Gasparin, F., Gutknecht, E., Guinehut, S., Hernandez, F., Juza, M., Karlson, B., Korres, G., Legeais, J.-F., Levier, B., Lien, V.S., Morrow, R., Notarstefano, G., Parent, L., Pascual, Á., Pérez-Gómez, B., Perruche, C., Pinardi, N., Pisano, A., Poulain, P.-M., Pujol, I.M., Raj, R.P., Raudsepp, U., Roquet, H., Samuelsen, A., Sathyendranath, S., She, J., Simoncelli, S., Solidoro, C., Tinker, J., Tintoré, J., Viktorsson, L., Ablain, M., Almroth-Rosell, E., Bonaduce, A., Clementi, E., Cossarini, G., Dagneaux, Q., Desportes, C., Dye, S., Fratianni, C., Good, S., Greiner, E., Gourrion, J., Hamon, M., Holt, J., Hyder, P., Kennedy, J., Manzano-Muñoz, F., Melet, A., Meyssignac, B., Mulet, S., Nardelli, B.B., O'Dea, E., Olason, E., Paulmier, A., Pérez-González, I., Reid, R., Racault, M.-F., Raitsos, D.E., Ramos, A., Sykes, P., Szekely, T., Verbrugge, N., 2016. The copernicus marine environment monitoring service ocean state report. *J. Oper. Oceanogr.*, 9: 235–320. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1273446>.
- Stagnol, D., Michel, R., Davoult, D. 2016. Population dynamics of the brown alga *Himantalia elongata* under harvesting pressure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 174, pp. 65-70.
- Standard Norge. 2009. Norwegian Standard NS 9415.E:2009. Marine fish farms: Requirements for site survey, risk analyses, design, dimensioning, production, installation and operation.
- Stark, J.D., Donlon, C.J., Martin, M.J., McCulloch, M.E., 2007. OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. In: *OCEANS 2007. Marine Challenges: Coastline to Deep Sea*. Aberdeen, Scotland, pp. 1–4. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302251.
- Stengel, D.B., Wilkes, R.J., Guiry, M.D. 1999. Seasonal growth and recruitment of *Himantalia elongata* (Fucales, Phaeophycota) in different habitats on the Irish west coast. *European Journal of Phycology*, 34(3), pp. 213-221.
- Sogn, G. 2013. PhD-thesis: Growth, survival and reproduction in the kelp *Saccharina latissima* – Seasonal patterns and the impact of epibionts. University of Oslo.
- Weatherall, P., Marks, K.M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J.E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V., Wigley, R., 2015. A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth Sp. Sci.*, 2: 331–345. <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>. Received.
- Wilson, Kristen L. · Lauren M. Kay · Allison L. Schmidt · Heike K. Lotze. 2015. Effects of increasing water temperatures on survival and growth of ecologically and economically important seaweeds in Atlantic Canada: implications for climate change. *Mar Biol* (2015) 162:2431–2444.
- Yang, MH., Blunden, G., Huang, FL. et al. *Journal of Applied Phycology* (1997) 9: 1. <https://doi.org/10.1023/A:1007996207924>.

APÉNDICE A

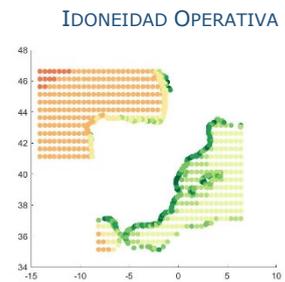
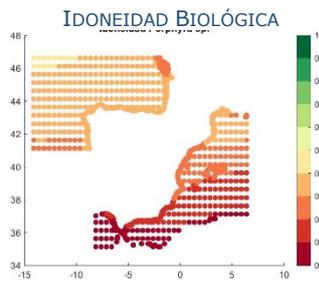
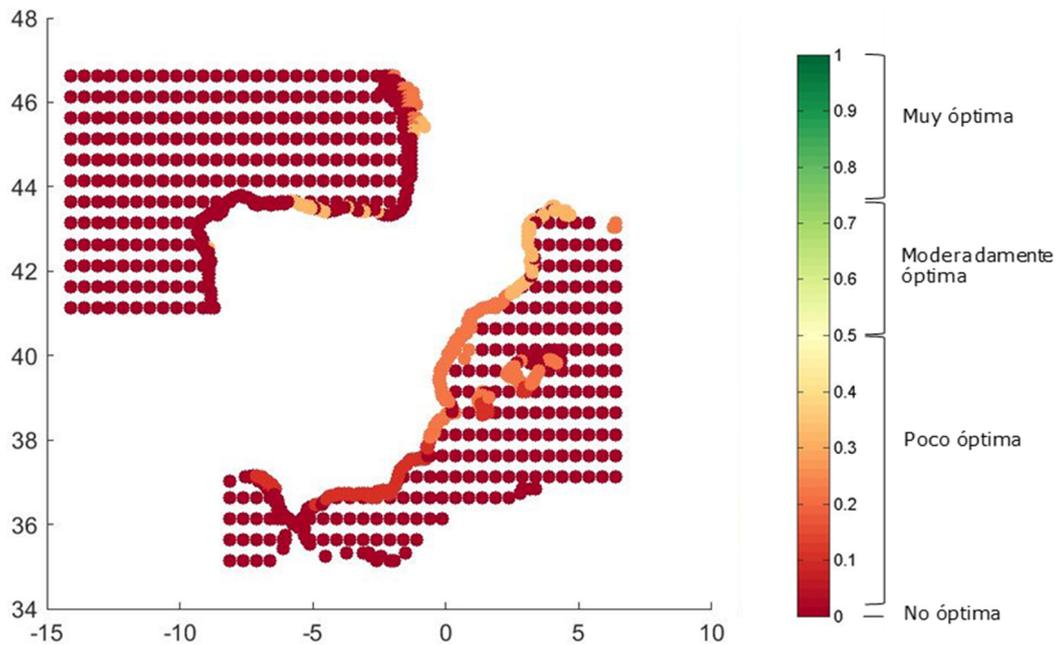


APÉNDICE A. ANEJO CARTOGRÁFICO. OPORTUNIDAD DE CULTIVO DE LAS ESPECIES DE INTERÉS

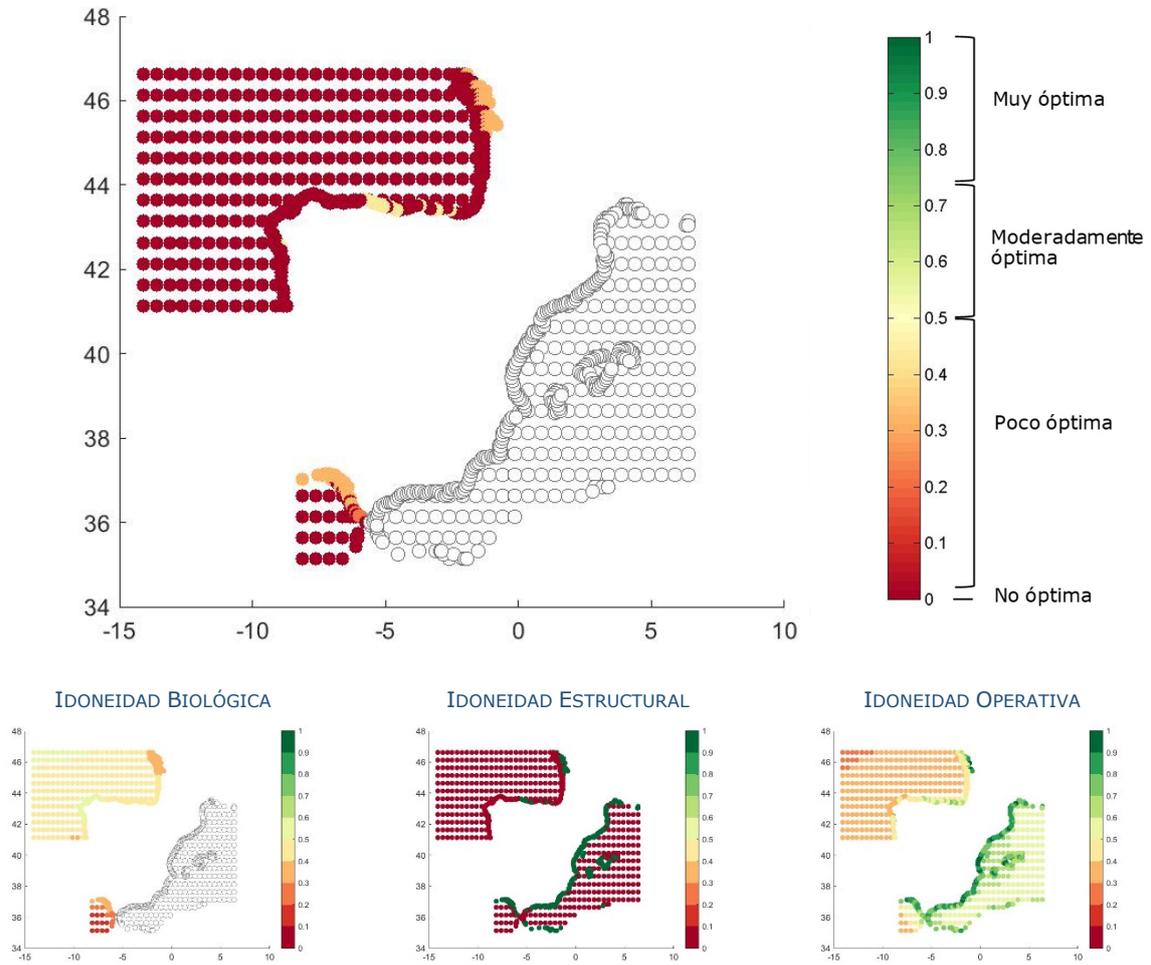
1. SACCHARINA LATISSIMA (KOMBU)



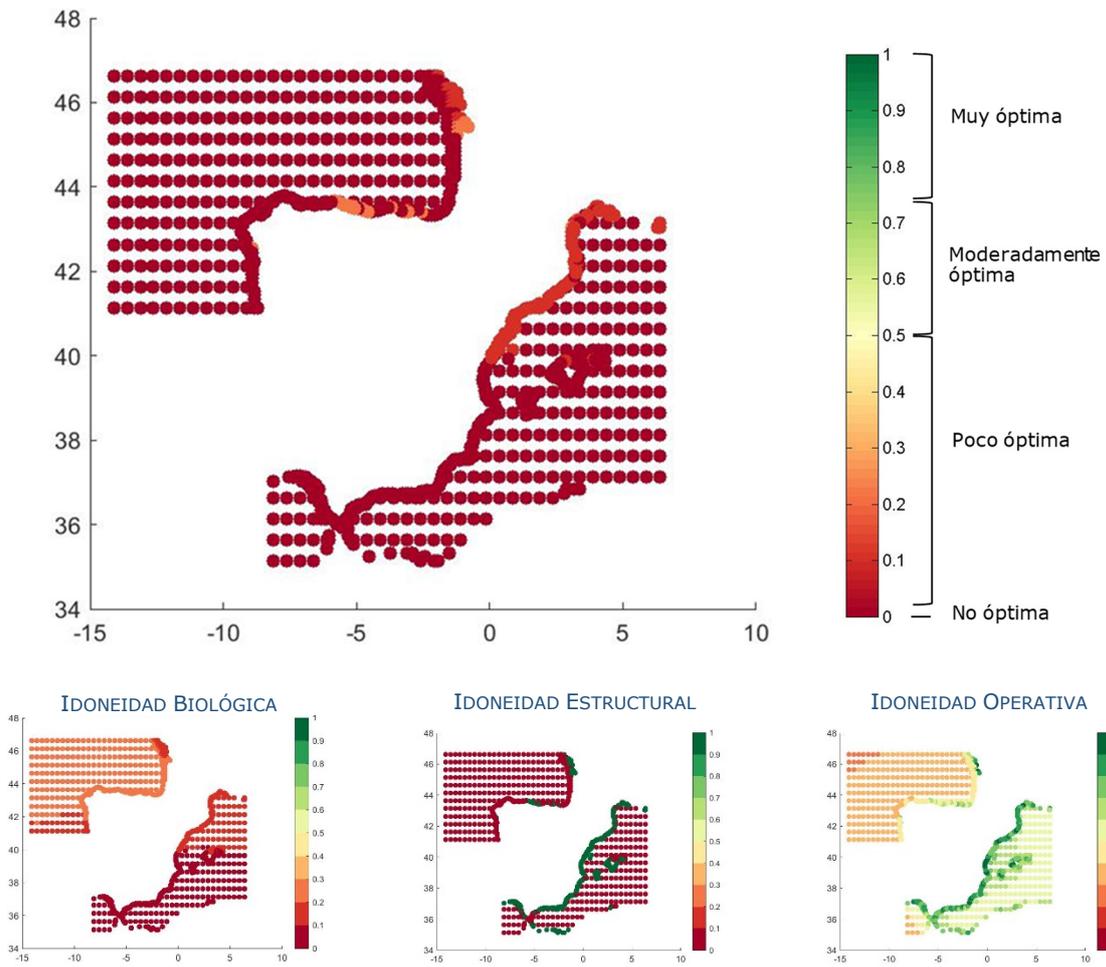
2. PORPHYRA SP



3. HIMANTHALIA ELONGATA



4. CODIUM TOMENTOSUM



5. *CHONDRUS CRISPUS*

