



Informe técnico de resultados: descripción de las algas utilizadas, comparativa de los sistemas de secado y características como biocombustible sólido

Fecha: Mayo 2021

Contenido

1. Introducción	3
2. Objetivo	3
3. Características fisicoquímicas de las algas recogidas.....	4
3.1. Análisis inmediato.....	4
3.1.1. Preparación de las muestras	4
3.1.2. Resultados obtenidos	4
3.2. Poder calorífico.....	5
3.2.1. Preparación de las muestras	5
3.2.2. Resultados obtenidos	7
4. Adecuación de las algas (secado natural vs forzado)	7
4.1. Preparación de las muestras	7
4.2. Secado. Proceso natural o forzado.....	8
5. Densificación y peletización de las algas de arribazón.....	14
5.1. Determinación de tonelada de pellets de alga por tonelada de algas frescas18	
6. Evaluación de los pellets como combustible	19
6.1. Caracterización fisicoquímica de los pellets: análisis elemental y análisis inmediato	19
6.1.1. Análisis inmediato.....	20
6.1.2. Análisis elemental.....	20
6.1.3. Poder calorífico.....	21
6.2. Comparativa con la normativa vigente	22
7. Conclusiones	23
8. Bibliografía.....	24

1. Introducción

Tradicionalmente, la base de la industrialización de los países ricos ha sido el uso masivo de combustibles fósiles. A día de hoy esto sigue siendo un elemento principal de los procesos de cambio económico que caracterizan a los países más poblados del mundo. En las últimas décadas se han utilizado más que nunca en la historia el petróleo, carbón y gas natural¹. El incremento constante en el precio de estos recursos debido a su limitación y futuro agotamiento así como el impacto medioambiental asociado a ellos, han promovido la búsqueda de nuevas fuentes de energía y la necesidad de establecer políticas comunitarias que frenen su consumo. La Directiva 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo establece que el consumo final bruto de energía en la Unión Europea deberá proceder como mínimo en un 27% de energías renovables en el año 2030².

La **biomasa** es uno de los **recursos renovables** con **mayor potencial del momento**. Su uso se ha incrementado significativamente en los últimos años debido al auge de las energías no contaminantes. Este crecimiento está potenciando no sólo la mejora de aquellas tecnologías de valorización energética existentes, sino también la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de biomasa. En este contexto, el uso de los recursos existentes se convierte en fundamental para lograr la descarbonización de la sociedad y alcanzar el desarrollo de una economía circular. Es por ello que, **el uso de las algas de arribazón como fuente de energía se convierte en especialmente atractivo ya que se trata de recursos biomásicos abundantes cuya excesiva proliferación** en determinadas épocas del año presenta problemáticas derivadas. Los acúmulos de algas derivan en la generación de malos olores en las playas y producen graves pérdidas al sector pesquero al depositarse sobre los bancos marisqueros al inducir condiciones de anoxia en el sedimento (muerte de moluscos bivalvos). El mantenimiento de los bancos marisqueros y de las condiciones higiénico-sanitarias necesarias para el uso de las playas, hace necesaria la retirada de dichas algas, lo que supone la extracción de enormes cantidades al año, en la mayoría de los casos no cuantificadas. La valorización energética de las algas trata de buscar un mayor **beneficio social y medioambiental**.

En este contexto, el proyecto "VALORALGAE: Cerrando la cadena de valor en la acuicultura marina a través de la valorización energética de las algas de arribazón" persigue promover la **sostenibilidad del sector acuícola marítimo** a través de la implantación de un proceso innovador de **valorización de algas de arribazón** mediante su transformación en biocombustibles que posibiliten la obtención de energía renovable. Las opciones de valorización seleccionadas son: transformación en un combustible renovable gaseoso (biogás) a través de digestión anaerobia, y el aprovechamiento de las algas como combustible sólido (pellets). Ambos combustibles permitirán la generación de energía renovable de emisiones neutras. Adicionalmente, se estudiará la viabilidad de aprovechar ese gas renovable y/o pellets como fuente de energía para lonjas, puertos o cofradías, cumpliendo así con la filosofía de economía circular dentro del sector acuícola marino.

2. Objetivo

El objetivo del presente informe es evaluar la viabilidad de **valorizar las algas** seleccionadas y recogidas en etapas previas del proyecto como **biocombustible sólido** (pellets) para su uso en calderas. Para ello en primer lugar se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica de las algas y se determinó su poder calorífico. A continuación se llevó a cabo un proceso de secado con las diferentes especies

recogidas y la especie observada como mayoritaria en la región de estudio, esto es, *Ulva lactuca*, fue densificada para estudiar sus propiedades como biocombustible sólido.

3. Características fisicoquímicas de las algas recogidas

En primer lugar, las algas recogidas en base a disponibilidad (esto es, *Ulva lactuca*, *Enteromorpha* o *Ulva intestinalis*, *Fucus spp.*, *Gracilaria spp.*) en las playas seleccionadas en etapas previas del proyecto se sometieron a un análisis inmediato y se determinó su poder calorífico, con el objetivo de determinar su potencial como combustibles en procesos de valorización termoquímica. Una descripción más detallada de dichas algas puede encontrarse en el informe previo del presente proyecto con título “Informe de potencial de producción de biocombustible gaseoso a partir de algas de Galicia y Asturias”.

4

3.1. Análisis inmediato

Mediante el análisis inmediato de una muestra se determina su contenido en carbono fijo, en volátiles, su humedad y el porcentaje de cenizas presente en la misma.

La **humedad** de las diferentes muestras se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18134, que consiste en calentar una cantidad de muestra conocida a 105°C y registrar la pérdida de masa hasta alcanzar un valor constante. Las **cenizas** se obtuvieron siguiendo el procedimiento UNE-EN ISO 18122, que se basa en calcinar la muestra a 550°C durante 3 horas.

Para la determinación del contenido en **volátiles**, se siguió el procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 18123 que consiste en calentar la muestra en ausencia de aire a 900 °C. El **carbono fijo** se determinó por diferencia considerando el contenido en cenizas y compuestos volátiles.

Los valores obtenidos se compararon con un combustible de referencia: astillas de pino, dado que la biomasa leñosa es la más comúnmente empleada en procesos de combustión.

3.1.1. Preparación de las muestras

Para llevar a cabo los análisis se prepararon muestras representativas y homogéneas de cada una de las especies estudiadas. Las algas fueron recogidas en arena y lavadas con agua dulce previamente a la realización de los análisis.

3.1.2. Resultados obtenidos

En la Tabla 1 se detalla el análisis inmediato de las muestras estudiadas.

Tabla 1. Análisis inmediato de las algas estudiadas y del combustible de referencia (porcentaje en peso).

Muestra	Humedad	Volátiles (b.s)*	Cenizas (b.s)	C fijo (b.s)
Ulva lactuca	84,78 ± 1,31	48,36 ± 1,01	36,09 ± 1,81	15,55
Fucus spp.	84,69 ± 1,41	70,61 ± 2,31	20,65 ± 1,55	8,74
Gracilaria spp.	88,21 ± 1,70	79,82 ± 1,14	9,38 ± 0,42	10,80

Enteromorpha (<i>Ulva intestinalis</i>)	83,86 ± 1,76	59,50 ± 0,28	24,29 ± 2,05	16,21
Astillas de pino ₃	8,8	83,1	0,5	7,6

*b.s: base seca

De la Tabla 1 destaca, en primer lugar, la humedad presente en las algas estudiadas, lo cual es lógico dada su naturaleza (valores próximos a un 85% en todos los casos). Es por ello que antes de poder utilizarlas como combustible en algún proceso térmico será necesaria una etapa previa de secado para evitar la pérdida de material combustible y facilitar su manejo, transporte y alimentación a la planta de obtención de energía correspondiente. Esta etapa de secado sería conveniente realizarla en el lugar de producción del residuo para minimizar los costes asociados a su transporte.

Asimismo, las muestras analizadas presentan un elevado contenido en cenizas si se comparan con el material de referencia (valores próximos a un 35% en el caso de *Ulva lactuca*, a un 20 y 25 % en el caso de *Fucus spp.* y *Enteromorpha* y a un 10% en el caso de *Gracilaria spp.*, frente a valores en torno a 0,5% en el caso de las astillas de pino), lo que puede suponer la necesidad de instalar un sistema de eliminación en continuo de las mismas durante el proceso de combustión. Por otra parte, los valores de volátiles oscilan entre 48-80% siendo los más bajos los obtenidos con *Ulva lactuca* (48,36%) y *Enteromorpha* (59,50%) mientras que las astillas de pino presentan un contenido superior al 80%. Un elevado contenido en volátiles podría significar una rápida transformación del producto sólido a productos gaseosos, lo cual es altamente deseable en procesos de combustión. Finalmente, los valores de carbono fijo presentan el orden que se muestra a continuación: *Enteromorpha* (16,21) > *Ulva lactuca* (15,55) > *Gracilaria spp.* (10,80) > *Fucus spp.* (8,74) > Astillas de pino (7,6).

3.2. Poder calorífico

La determinación del poder calorífico de un combustible es fundamental, ya que indica el contenido energético del mismo por unidad de masa.

El poder calorífico superior (PCS) se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125, que se basa en la determinación del poder calorífico superior con una bomba calorimétrica. El poder calorífico inferior (PCI) se calculó a partir del PCS mediante un cálculo matemático contemplado en la norma ASTM D5468 para el que es necesario conocer el contenido en H₂ total de la muestra (H₂ elemental + agua). Los valores de H₂ las diferentes muestras se han obtenido en la bibliografía.

3.2.1. Preparación de las muestras

Para la preparación de los pellets de algas a escala laboratorio y determinación de su poder calorífico se empleó una prensa de comprimidos (Figura 1). Previo a su uso, las diferentes algas estudiadas se lavaron, secaron y molieron a un tamaño < 40 µm con el fin de adaptar el tamaño de partícula a aquel requerido en dicho equipo.



Figura 1. Prensa de comprimidos empleada.

Los pellets obtenidos contaban en todos los casos con un diámetro de 12 mm y 15 mm de longitud (Figura 2).



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 2. Pellets obtenidos a escala laboratorio de (a) *Ulva lactuca*, (b) *Fucus spp.*, (c) *Gracilaria spp.* y (d) *Ulva intestinalis (Enteromorpha)*.

3.2.2. Resultados obtenidos

En la Tabla 2 se presenta el valor promedio obtenido en la determinación del PCS de cada una de las muestras estudiadas y el calculado para el PCI en base seca, debido al elevado contenido en humedad observado en las muestras estudiadas.

Tabla 2. Poder calorífico superior e inferior de los materiales estudiados.

Muestra	P.C.S (b.s)	P.C.I (b.s)
Ulva lactuca	8,77 ± 0,19	6,75
Fucus spp.	14,97 ± 0,01	13,96
Gracilaria spp.	15,44 ± 0,17	14,21
Enteromorpha (Ulva intestinalis)	11,48 ± 0,02	10,37
Astillas de pino ³	19,91	18,51

7

Tal y como se observa en la Tabla 2, el **poder calorífico de los material estudiados es más bajo que el del combustible de referencia**. En el caso de *Fucus spp.*, y *Gracilaria spp.*, éstas muestran valores próximos a 15 MJ/kg, siendo inferiores los poderes caloríficos de *Enteromorpha* (11,48 MJ/kg) y *Ulva lactuca* (8,77 MJ/kg), lo cual es lógico dada la **superior proporción de cenizas** observada en dichas muestras (24,29% y 36,09% respectivamente), motivo por el cual la suma de C, H y O en las muestras es baja, lo que decrece su poder calorífico.

4. Adecuación de las algas (secado natural vs forzado)

4.1. Preparación de las muestras

Las algas recogidas mostraron una elevada contaminación por presencia de materiales inorgánicos, arenosos y limosos. Los sistemas de densificación de materiales combustibles sólidos (peletización, granulación o briquetado) no admiten elevados contenidos de materiales inorgánicos (procedentes de crustáceos y otros animales marinos) ni de fangos y residuos contaminantes del fondo marino que pueden dañar por abrasión las matrices metálicas presentes en los mismos.

Es por ello que, con objeto de evitar la entrada de contaminantes fue necesario implementar un proceso de lavado de las algas previo al proceso de secado. Este proceso de lavado se realizó mediante inmersión y agitación de las algas en barreños de 100 litros de capacidad con agua corriente dulce y agitación con rejillas metálicas. Esta operación se realizó hasta en tres ocasiones hasta que el agua residual no presentaba un exceso de contenido de contaminantes.

Como se puede ver en las fotografías, en el primer lavado y posterior escurrido de las algas se aprecia un importante contenido de restos de contaminantes (arena y limos). Del mismo modo, el lavado contribuye a la dilución y limpieza del contenido de sal presente en las algas por inmersión en agua dulce.



Figura 3. Primer lavado y posterior escurrido de las algas recogidas (*Ulva lactuca*).

4.2. Secado. Proceso natural o forzado.

Para realizar el proceso de densificación de la biomasa es necesario acondicionar el contenido de humedad del material a unos valores adecuados que permitan obtener un producto homogéneo y cohesionado para de este modo obtener la mayor cantidad de energía térmica por cantidad de materia prima. Secar quiere decir eliminar el agua que está en exceso. Para conseguir este fin son necesarias estas acciones:

- Suministrar el calor necesario para producir la evaporación del agua.
- Provocar el desplazamiento por capilaridad del agua líquida del interior del material al lugar donde se evapora y después transportar el vapor por difusión hasta la superficie. Este proceso de circulación del agua en el interior del material es tanto más rápido cuanto mayor es la temperatura.
- Arrastrar el vapor, resultante de la evaporación, de la superficie del material.

Con el objeto de adecuar el contenido de humedad de las algas para los procesos de densificación se procedió a **evaluar las posibles vías de secado**, incidiendo en los procesos más utilizados para realizar estas operaciones en el sector de densificado de biomasa y en el de adecuación de esta materia prima para la obtención de producto alimentario: proceso de **secado por oreo natural** y **secado forzado por convección de aire caliente**.

4.2.1.1. Secado natural

En el secado natural o por oreo a la intemperie, el aire es el agente secante. Su temperatura, su humedad y su velocidad son los elementos determinantes del proceso de secado, actuando de la siguiente forma:

La temperatura: Es un factor de aceleración de la evaporación. Cuanto más elevada es la temperatura más intensa será la evaporación, puesto que el aire podrá suministrar más calor y absorber más humedad.

La humedad relativa: Cuanto menor sea la humedad relativa del aire mayor capacidad de absorción de vapor tendrá, favoreciendo de este modo la velocidad de evaporación.

La velocidad de paso del aire: El movimiento de aire alrededor del material eliminará más rápido la capa de aire saturado provocada por la salida de vapor, creando un gradiente que permitirá renovar la capacidad de absorción del aire. Una débil velocidad del aire es también causa de un intercambio de calor poco importante y, por consiguiente, de un descenso de la evaporación.

Se realizó una experiencia de secado por oreo natural en muestras de las cuatro especies de algas estudiadas: *Ulva lactuca*, *Fucus spp.*, *Ulva intestinalis* (*Enteromorpha*) y *Gracilaria spp.*

El proceso de secado natural se realizó sometiendo las muestras de algas a la exposición directa a las condiciones climáticas presentes sin ningún tipo de aislamiento o bajo cubierta para acentuar la acción directa de radiación solar y el aire dominante.

Las algas se instalaron sobre cangilones de rejillas metálicas de dimensiones 2x1 m y con separación de malla de 25 mm. Las rejillas se separan del suelo unos 40 cm para asegurar el paso del aire en la zona inferior, facilitando la evacuación del aire húmedo que tiende a permanecer en la parte baja. Las algas se distribuyen en estas rejillas de manera homogénea con una altura de referencia de manta de 4 a 5 cm de grosor.

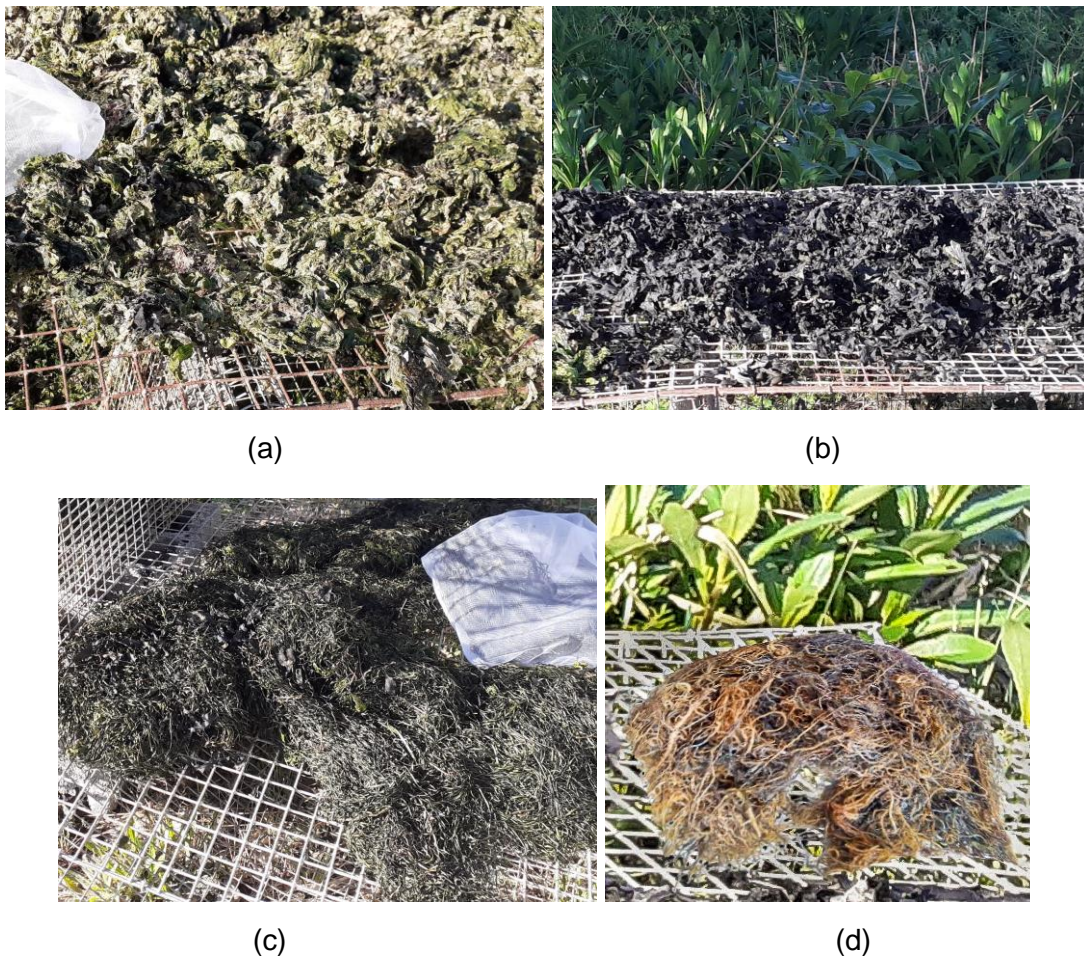


Figura 4. Experiencias de secado natural con (a) *Ulva lactuca* (b) *Fucus spp.* (c) *Ulva intestinalis* (*Enteromorpha*) y (d) *Gracilaria spp.*

INCIDENCIAS EN EL SECADO NATURAL

Tras el inicio de la experiencia de secado, se observó que si bien en la parte superior de la manta de alga expuesta a luz solar directa se apreciaba una decoloración blanquecina, con importantes pérdidas de humedad, en la parte inferior no expuesta de la manta seguía conservando un elevado contenido de humedad y una importante coloración verde. Para homogeneizar la pérdida de humedad en toda la manta se procedió a removerla diariamente, revirtiendo la cara expuesta de la misma, procurándose así una exposición homogénea a las condiciones ambientales.

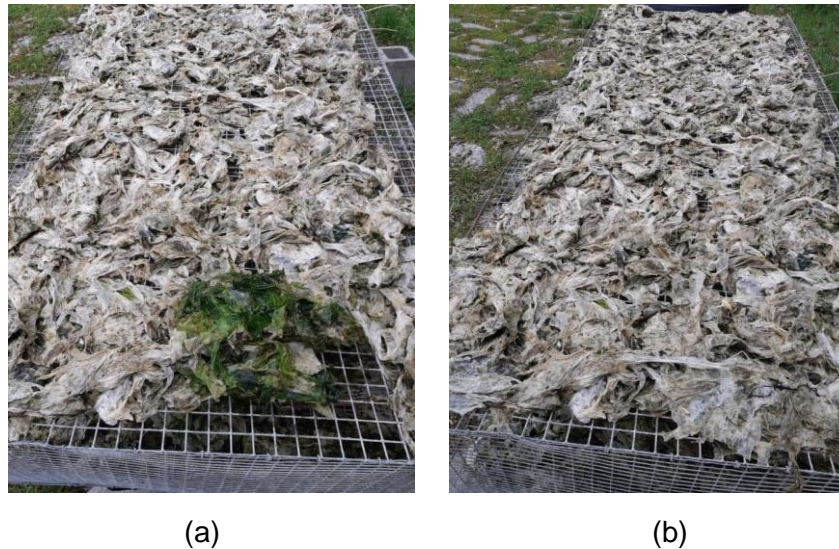


Figura 5. (a) Parte inferior de la manta con coloración verde y alto contenido de humedad (b) Parte superior de la manta con coloración verde y menor contenido de humedad.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD POR PÉRDIDA DE PESO

La determinación del contenido de humedad inicial se realizó por desecación hasta el estado anhidro de muestras de 300 g de cada una de las especies de algas. Para ello se pesaron y se secaron en estufa a 104 °C hasta alcanzar un peso constante, que se corresponde con el peso anhidro. La determinación se realizó en base húmeda.

Los resultados obtenidos (Tabla 3) muestran contenidos de humedad muy elevados, cercanos al 90%, lo cual nos indica la escasa materia seca presentes en las algas (aprox. un 10%) y, por lo tanto, la reducida relación entre la masa recogida y la posible materia prima obtenida para su posterior combustión.

Tabla 3. Contenido en humedad inicial de las muestras de algas estudiadas.

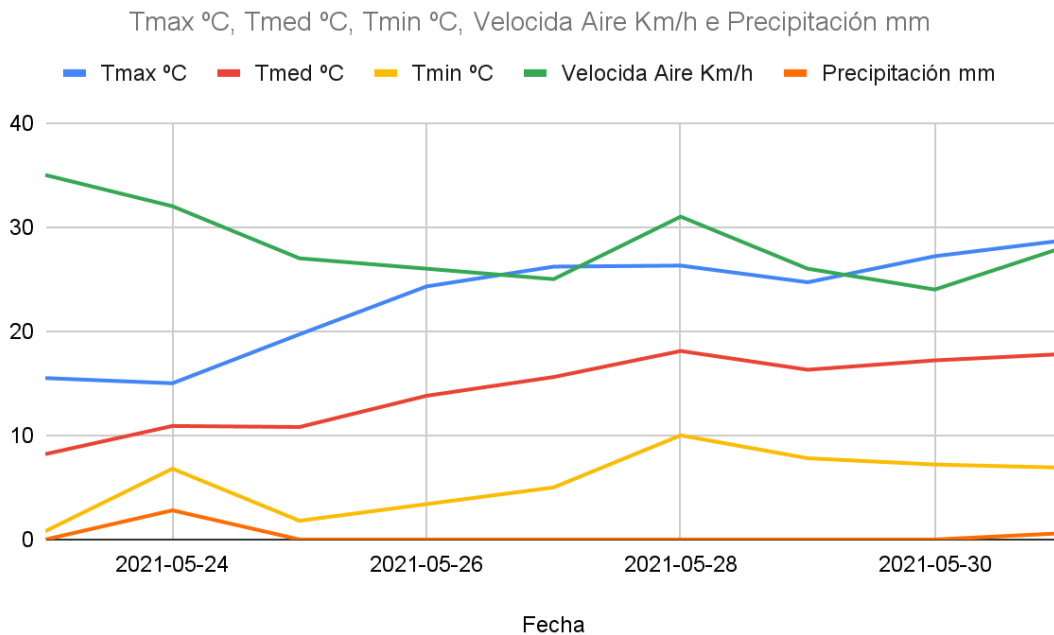
	Humedad (%)
Ulva lactuca	87,74
Enteromorpha (Ulva intestinalis)	89,93
Fucus spp.	90,34
Gracilaria spp.	88,81

Conviene aclarar que las pequeñas diferencias en el contenido en humedad observadas en la Tabla 3 respecto a la Tabla 1 se deben a que las muestras fueron recogidas en días diferentes.

Para evaluar la evolución del contenido de humedad de las muestras de algas ubicadas en oreo natural se realizó una determinación de la pérdida de peso en muestras introducidas en bolsas para muestras biológicas de malla fina de nylon blanco (0,3 mm de diámetro), lo que reduce el riesgo de pérdida de muestras durante el procesamiento. De esta forma, las muestras de algas permanecen agrupadas y enteras expuestas a las condiciones climáticas, sin interferencias a la evaporación del contenido de agua presente en las mismas.

Durante el proceso de secado, las bolsas se pesaron diariamente y se realizó un seguimiento de las condiciones climáticas mediante los datos obtenidos en la estación meteorológica más cercana de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), en este caso de Xinzo de Limia, ubicada a 4 km del lugar de realización de la experiencia de secado natural

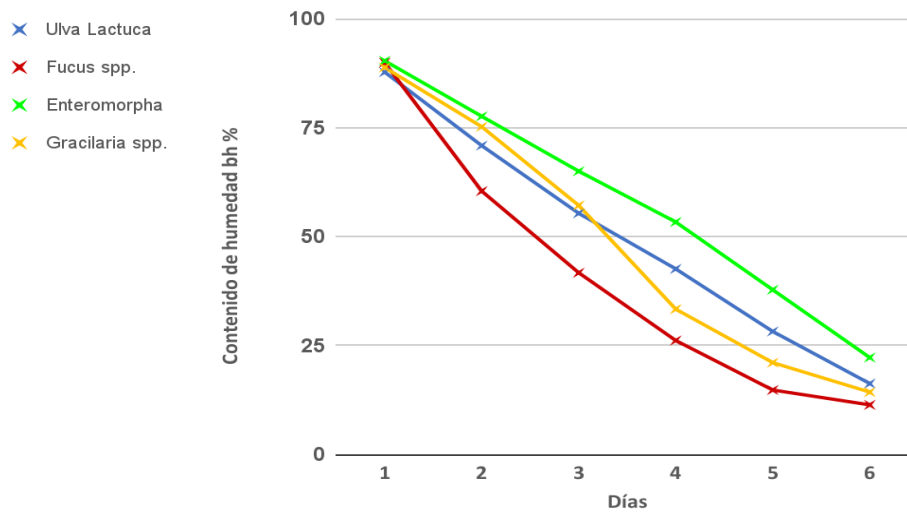
Los resultados de las variables climáticas más importantes se reflejan en la siguiente gráfica. Las temperaturas medias oscilaban entre los 10°C y los 20°C con máximas de casi 30°C y mínimas de 2°C. Las velocidades del aire oscilaron entre los 25 y 35 Km/h.



Gráfica 1. Variables climáticas más importantes en el intervalo de tiempo en el que se llevó a cabo el secado natural.

En la siguiente gráfica se observa la evolución del contenido de humedad:

Evolución contenido de humedad secado oreo natural



Gráfica 2. Pérdida de humedad mediante el proceso de secado por oreo natural.

En estas condiciones de secado, muy suaves, claramente de primavera, se alcanzó un contenido de humedad del 16% para *Ulva lactuca*, de 11% para *Enteromorpha*, de 22% para *Fucus spp.*, y de un 14% en el caso de *Gracilaria spp.* en un periodo de **6 días**.

Tabla 4. Humedad inicial y final tras el proceso de secado en oreo natural para las especies de algas estudiadas.

	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
Ulva Lactuca	87,74	16,25
Enteromorpha (Ulva Intestinalis)	89,93	11,36
Fucus spp.	90,34	22,22
Gracilaria spp.	88,81	14,29

4.2.1.2. Secado Forzado

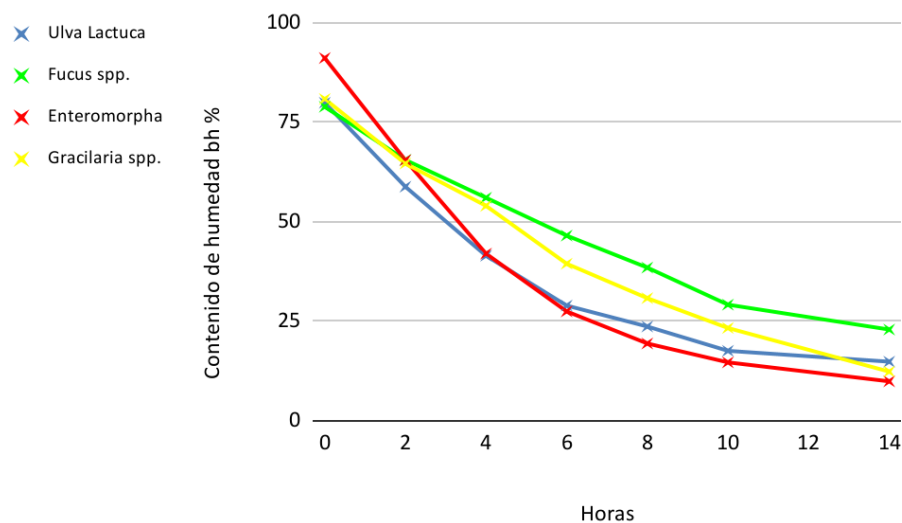
La experiencia de secado forzado se realizó en una cámara de desecación por aire caliente mediante ventilación forzada por ventilador y calentamiento por resistencias eléctricas (Figura 6).



Figura 6. Secado forzado de muestras de algas en cámara.

A modo de referencia se establecieron condiciones de secado similares a las empleadas en el secado de biomásas empleadas habitualmente, esto es, temperatura de 60°C y velocidad de aire de 40 Km/h. Con estas condiciones se alcanzó la siguiente evolución de la pérdida de humedad.

Evolución contenido de humedad en secado forzado a 60°C



Gráfica 3. Pérdida de humedad mediante el proceso de secado forzado a 60°C.

En estas condiciones se alcanzó un contenido de humedad de un 15% para *Ulva lactuca*, de 22% para *Fucus spp.*, de 10% para *Enteromorpha* y de un 12% en el caso de la muestra de *Gracilaria spp* en un periodo de **14 horas**.

Tabla 5. Humedad inicial y final tras el proceso de secado forzado a 60°C para las especies de algas estudiadas.

	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
Ulva lactuca	79,88	14,88
Fucus spp.	78,87	22,94
Enteromorpha (Ulva intestinalis)	91,10	9,94
Gracilaria spp.	80,83	12,38

4.2.1.3. Comparativa entre sistemas de secado

14

El secado natural presenta las particularidades de ser un proceso sometido al albur de los condicionantes climáticos presentes en la época del año y en la zona geográfica en que se realiza, con escasas posibilidades de intervención sobre los parámetros que influyen en la capacidad de secado del aire (temperatura, velocidad, precipitaciones, humedad relativa) lo que repercute en la obtención de tiempos de secado muy largos y con una distribución del contenido de humedad muy dispar por lo que se precisa de intervención para homogeneizar el secado del material (volteos de material). Sin embargo, este proceso presenta ventajas de gran magnitud como pueden ser la ausencia de equipamiento específico (instalaciones con cámaras de secado, calderas, equipos de transporte) y el nulo coste energético para conseguir la evaporación del agua.

En cuanto al secado forzado, éste presenta las particularidades de ser un proceso estanco donde podemos actuar sobre los parámetros que influyen en la capacidad de secado del aire (temperatura, velocidad, humedad relativa) de manera ininterrumpida, obteniendo tiempos de secado cortos y muy homogéneos durante todo el año. Como desventaja más importante conviene mencionar la necesaria inversión en equipamiento específico (instalaciones con cámaras de secado, calderas, equipos de transporte) y el elevado coste energético para conseguir la evaporación del agua.

En un **contexto industrial**, donde la calidad y homogeneidad de producto es imprescindible, parece clara la **apuesta por un proceso de secado forzado** donde se puede obtener un material homogéneo y con las características de humedad adecuadas para peletizar en cuestión de horas, frente al secado natural que dura varios días y que presenta heterogeneidades importantes que precisan de intervención para homogeneizar la distribución del contenido de humedad (volteos de material).

5. Densificación y peletización de las algas de arribazón

La biomasa en forma de pellet representa una fuente de energía renovable de alta densidad, constituyendo un combustible sólido en formato cilíndrico con dimensiones variadas. Los pellets presentan un contenido en humedad reducido de entre un 8-12% y su densidad volumétrica es de unas 2,5 veces mayor que aquellas biomásas no compactadas mecánicamente. Esto facilita su transporte, optimiza su almacenamiento y facilita su uso en equipos para la quema del recurso como pueden ser hornos y calderas ⁴.

Normalmente, el peletizado es un proceso de granulación mediante extrusión. En los tipos de fabricación más comunes el principio operativo se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre el material, situados sobre una matriz metálica dotada de orificios de calibre variable. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se

comprime, obteniendo a la salida un diámetro característico a la matriz empleada. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto de cuchillas, corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada.

Durante el proceso de extrusión, las fuerzas de fricción que actúan por unidad de superficie son suficientes para provocar un incremento de la temperatura superior a los 70°C, lo cual genera la plastificación parcial de la lignina que actúa como aglomerante.

Los requisitos de la materia prima biomásica para el proceso de peletización, son:

- *Ausencia de materiales minerales y metálicos:* la materia prima debe estar absolutamente desprovista de piezas metálicas y minerales para evitar el desgaste y la abrasión de las partes mecánicas de los equipos de peletizado.
- *Humedad:* la biomasa deberá tener entre un 11 y un 18% de humedad dependiendo del tipo de biomasa con la que se trabaje. Por ejemplo, el serrín de encina se puede peletizar entre un 11-12% de humedad, el de pino ronda el 14% y con la paja de cereales el valor estimado es de un 18% para conseguir rendimientos óptimos. Por debajo de un 10% la máquina machaca el material y no se consigue peletizar (sólo polvo) y por encima del 18% el pellet resultante será poco compacto y se desmenuzará.
- *Granulometría:* es necesario reducir el tamaño del material mediante un proceso de trituración y obtener una separación granulométrica homogénea y adecuada para poder transportar el material y para poder realizar la compactación en los equipos de densificación. La granulometría ideal para una peletizadora deberá ser más reducida que el diámetro del troquel de la matriz utilizada para peletizar. A modo de ejemplo, para una matriz con un troquel de 6 mm, la granulometría de partícula deberá presentar valores comprendidos entre 1 y los 4 mm para conseguir rendimientos óptimos. Si las partículas son demasiado grandes, se produce la rotura de los pellets.

En el presente trabajo se ha procedido a la densificación de la especie de alga que se ha observado más abundante en las costas gallegas: *Ulva lactuca*, cuya valorización energética supondría el uso de un residuo a día de hoy desaprovechado en su mayor parte. La experiencia de peletización se realizó con biomasa procedente de dicha especie libre de contaminantes minerales y con un contenido de humedad comprendido entre el 12 y 16%, adecuado para la realización del proceso de densificación.

Para adecuar el tamaño de partícula al proceso de peletización se procedió a su reducción y homogeneización granulométrica a valores comprendidos entre 1 y 4 mm. La obtención de esta granulometría se consiguió mediante el empleo de un molino de cuchillas con un malla de 1 mm.



Figura 7. (a) Molino de cuchillas con malla 1 mm; (b) Fracción granulométrica resultante de alga.

La utilización de aditivos como el almidón de maíz para facilitar la compactación puede ser recomendable ya que prolonga la vida útil de rodillos, matrices y otras partes móviles y aumentan considerablemente los rendimientos sin contaminar del pellet resultante, siempre y cuando no se exceda de entre un 2% y un 5% en la mezcla.

La realización de las densificaciones se realizó con una peletizadora anular, comúnmente llamada de anillo. Estos equipos están compuestos por un anillo móvil situado de forma vertical con unos rodillos internos fijos que aplican la presión contra las paredes internas de dicho anillo que es donde están situados los orificios. El material es alimentado a través de un acondicionador sobre la máquina. La materia prima entra en el frontal del aparato hacia el centro del anillo a través de un tornillo sinfín. Una vez el material es oprimido contra las paredes del anillo giratorio, los pellets surgen por la parte exterior de la plantilla a través de los orificios.



Figura 8. Anillo móvil de la peletizadora anular.

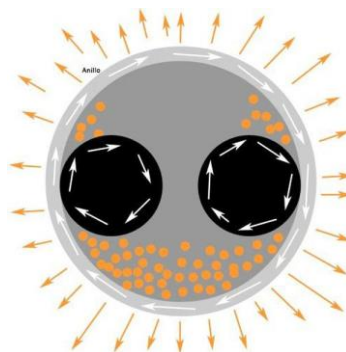


Figura 9. Esquema básico del funcionamiento de la peletizadora empleada.

La peletizadora anular empleada cuenta con 7 kW de potencia, con un sistema de carga con tolva vertical y con batería de dosificación forzada de producto mediante sinfín metálico, con un conjunto de rotor compacto conectado directamente al motorreductor con una matriz con diámetro interno de 200 mm y diámetro troquel de 6 mm. La peletizadora está equipada con un sistema manual para ajustar los dos rodillos de forma independiente en la parte delantera de la máquina y con un sistema de cuchilla para el corte radial de los pellets.



Figura 10. Sistema de carga vertical forzada.



Figura 11. Matriz de peletizado con rodillos de presión.

El proceso de peletización efectúa un trabajo de compresión en el producto de forma continua, reduciendo el volumen de la materia prima de 3 a 5 veces. En el proceso se comprime la materia y se transforma en un pellet sólido de unos 6 mm de diámetro y entre 25 y 30 mm de longitud a una temperatura de salida de 80°C. Este proceso les proporciona compactación y una apariencia brillante.

La peletización del alga seleccionada fue llevada a cabo sin inconvenientes, obteniéndose un proceso de densificación de buena calidad y sin problemas técnicos que deban ser destacados. No fue necesario añadir ningún aditivo con la finalidad de mejorar la compactación del material.

En la Figura 12 se muestran los pellets obtenidos:



Figura 12. Pellets de *Ulva lactuca*.

5.1. Determinación de tonelada de pellets de alga por tonelada de algas frescas

A la hora de establecer ratios de producción de materia prima en origen para obtener material densificado apto para la combustión se tienen en cuenta parámetros como el contenido en humedad inicial, la presencia de contaminantes y la eficiencia de los equipos y máquinas empleados en la elaboración del pellet.

En este caso, la principal característica de las algas que influye en la producción del material densificado es el elevado contenido de humedad que presenta este material en origen. Los resultados obtenidos muestran contenidos de humedad muy elevados, cercanos al 90%, lo cual nos indica la escasa materia seca presente en las algas (aprox. un 10%) y, por lo tanto, la reducida relación entre la masa recogida y la posible materia prima obtenida para su posterior combustión. A modo de referencia, el contenido de humedad, en base húmeda, de madera en verde de pino para fabricación de pellet, tras su corta y apeo, se encuentra entre el 40 – 50%.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta la presencia de contaminantes de origen mineral, que si bien no representan un elevado porcentaje de material no apto para su densificación, si que revierten en la laboriosidad del proceso de producción, siendo necesario incorporar un proceso de lavado y retirada de contaminantes, que encarece y ralentiza la densificación del material.

Teniendo en cuenta el contenido en humedad de las algas estudiadas en la tabla a continuación se muestra la materia seca presente en las mismas una vez lavadas para retirar los contaminantes:

Tabla 6. Humedad y contenido en materia seca presentes en las algas estudiadas.

	Humedad inicial (%)	Materia seca
Ulva Lactuca	87,74	12,26
Enteromorpha (Ulva Intestinalis)	89,93	10,07
Fucus spp.	90,34	9,66
Gracilaria spp.	88,81	11,19

Si se establece un rendimiento de fabricación de densificación del 95% (pérdidas de materia prima en triturado, transportes y en peletizado) se obtienen unos ratios de producción muy bajos con máximos para la *Ulva lactuca* de 0,116 y mínimos para *Fucus spp.* de 0,092.

Tabla 7. Toneladas de pellets de algas por toneladas de algas frescas.

	Humedad inicial (%)	Materia seca	Rendimiento 95%	Total tonelada de pellet por tonelada de alga fresca
Ulva Lactuca	87,74	12,26	11,65	0,117
Enteromorpha (Ulva Intestinalis)	89,93	10,07	9,57	0,096
Fucus spp.	90,34	9,66	9,18	0,092
Gracilaria spp.	88,81	11,19	10,63	0,106

A modo de referencia, la producción de pellet de madera de pino, presenta valores donde partiendo de 1.000 kg de madera verde se obtienen, aproximadamente 550 kg de pellet, es decir, un ratio de 0,550.

6. Evaluación de los pellets como combustible

En las fotografías que se presentan a continuación se observan los pellets objeto de estudio obtenidos tras el proceso de densificación:



Figura 13. Pellets de *Ulva lactuca*.

6.1. Caracterización fisicoquímica de los pellets: análisis elemental y análisis inmediato

Tras el proceso de densificación se ha determinado el potencial como combustible de los pellets de *Ulva lactuca*. Para ello se ha determinado su análisis inmediato, su análisis elemental y su poder calorífico.

6.1.1. Análisis inmediato

Al igual que en el caso de las algas recogidas, con los pellets elaborados se llevó a cabo su análisis inmediato (determinación del contenido en humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo), siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.1 del presente documento. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos. Al igual que en los apartados anteriores se han introducido valores de análisis análogos con pellets de pino, comúnmente empleados en procesos de combustión.

Tabla 8. Análisis inmediato de los pellets estudiados.

Muestra	Humedad	Volátiles (b.s)	Cenizas (b.s)	C fijo (b.s)
Pellets Ulva lactuca	14,09 ± 0,13	60,29 ± 0,90	32,58 ± 1,02	7,13
Pellets de pino	6,80 ± 0,14	81,6 ± 0,31	0,80 ± 0,89	17,6

20

Los valores obtenidos con las algas densificadas distan mucho de aquellos obtenidos con el combustible de referencia. Si bien es cierto que se ha rebajado el contenido en humedad respecto a la muestra de alga sin pelletizar, lo cierto es que el contenido en cenizas sigue siendo muy elevado. Es por ello que se ha probado a densificar dicha alga con otros cosustratos biomásicos disponibles dentro del territorio estudiado. Los resultados serán presentados en el informe del presente proyecto de investigación con título (“Informe técnico de resultados: Descripción de los cosustratos biomásicos utilizados, características como biocombustibles sólidos de las distintas mezclas estudiadas”).

6.1.2. Análisis elemental

El análisis elemental de una muestra determina el contenido total en la misma de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cloro. Es por ello muy útil a la hora de determinar el poder calorífico del material empleado o su contenido de contaminantes como óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre o ácido clorhídrico.

El análisis elemental se realizó siguiendo dos normas ISO, la ISO 16948:2015 para la determinación de C, H y N y la ISO 16994:2015 para la determinación de S y Cl.

Para el análisis de C, H y N se utilizó un analizador elemental en el que se realizó la combustión completa de la muestra a 950°C seguida de una transformación catalítica de los gases resultantes y la determinación por infrarrojo de hidrógeno y carbono en forma de H₂O y CO₂ y la determinación por conductividad térmica del nitrógeno en forma de N₂. La determinación del contenido en azufre y cloro se realizó mediante cromatografía iónica previa recuperación de los compuestos procedentes de una bomba calorimétrica.

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos con los pellets estudiados.

Tabla 9. Análisis elemental de los pellets de *Ulva Lactuca* y comparativa con combustible de referencia.

Muestra	%H	%N	%C	%S	%Cl
Pellets <i>Ulva lactuca</i>	3,24 ± 0,01	1,62 ± 0,08	28,31 ± 0,15	1,2691 ± 0,3458	0,0186 ± 0,0043
Pellets de pino	6,10 ± 0,02	0,19 ± 0,03	50,30 ± 0,08	0,0217 ± 0,0002	0,0091 ± 0,0010

Tal y como se observa, los pellets de alga presentan unas cantidades de nitrógeno, azufre y cloro superiores a las presentes en los materiales de referencia, mientras que el contenido en carbono e hidrógeno es sensiblemente inferior. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores que han estudiado este tipo de materiales^{4,5}. No obstante, es de esperar que haya variaciones estacionales en su composición bioquímica debido a su ciclo de crecimiento. De hecho, hay estudios que demuestran que en marzo, las algas suelen presentar un contenido elevado en proteínas, ácido algínico y bajo en carbohidratos. Durante la primavera, debido al incremento de la fotosíntesis y con ello al contenido en azúcar se produce un incremento en el contenido en cenizas, proteínas y ácido algínico⁶.

Un bajo contenido en carbono e hidrógeno indica la muy probable obtención de un biocombustible con un poder calorífico moderado bajo mientras que la presencia de nitrógeno, cloro y azufre en mayor medida que en el combustible de referencia podría indicar la más que probable formación de compuestos contaminantes. Así, el contenido en N observado en el material estudiado hace esperar la formación de NO_x en procesos de combustión^{7,8}.

Por otra parte, el contenido en cloro observado es ligeramente superior al de material de referencia. La valorización termoquímica de materiales con un alto contenido en cloro puede causar corrosión, escoriación e incrustaciones en tuberías y equipos de trabajo, a parte de la formación de HCl⁹.

Por último, el contenido en azufre en los pellets de *Ulva lactuca* es considerablemente superior al material de referencia. La presencia de este compuesto podría ser responsable de procesos de corrosión y de formación de compuestos contaminantes (SO₂)¹⁰.

6.1.3. Poder calorífico

La determinación del poder calorífico se llevó a cabo del modo descrito en el apartado 3.2 del presente documento. Los resultados presentados son de las muestras tal y como se reciben.

Tabla 10. Poder calorífico de los pellets estudiados y del combustible de referencia.

Muestra	P.C.S	P.C.I
Pellets <i>Ulva lactuca</i>	10,95 ± 0,09	10,26
Pellets pino	19,10 ± 0,08	17,63

Tal y como se observa, aunque se han mejorado el poder calorífico gracias al proceso de densificado, lo cierto es que el pellet de alga estudiado presenta un poder calorífico bajo si se compara con el material de referencia.

6.2. Comparativa con la normativa vigente

Sólo para garantizar la calidad de los pellets, el comité técnico 335 del CEN desarrolla continuamente normas europeas para biocombustibles sólidos. La principal norma europea para pellets de madera es la UNE-EN ISO 17225:2014¹¹, que define varios niveles de calidad del producto de pellets de madera para uso no industrial. Esta norma establece rangos para varios parámetros que son relevantes para evaluar la calidad de los pellets de madera y la calidad de otros biocombustibles sólidos. Los pellets empleados deben tener una serie de especificaciones en cuanto a poder calorífico, contenido en humedad, contenido en cenizas, etc. para ser empleados en calderas de combustión. Uno de los parámetros más importantes se refiere al contenido de cenizas (materiales inorgánicos) que representan un grave problema en la combustión de biomasa porque provoca escoriación, aglomeración del lecho, incrustaciones y corrosión en el dispositivo de combustión, lo que degrada su desempeño y daña severamente el equipo de combustión¹². La parte 2 de la norma establece la clasificación de los pellets de madera y la parte 6 la de los pellets de origen no leñoso (biomasa herbácea, biomasa de frutos, biomasa acuática y conjuntos y mezclas). En la Tabla 11 se presenta una comparativa de las principales características de los pellets estudiados con aquellas establecidas en la norma.

Tabla 11. Comparativa de los pellets estudiados con las especificaciones establecidas en la Norma ISO 17225.

	Pellets estudiados	UNE 17225-2 (Pellets de madera)	UNE 17225-6 (Pellets de origen no leñoso)
Humedad (% en peso)	14,09	≤10	≤12 (A) y ≤15 (B)
Cenizas (% peso, b.s)	32,58	Entre ≤0,7 (A1) y ≤2 (B) y hasta 3 uso industrial	Entre ≤6 (A) y ≤10 (B)
PCI (MJ/kg)	10,26	Q≥16,5	Q≥14,5

Tal y como se observa, los pellets de alga sola **no cumplen los requerimientos necesarios para cumplir con las mínimas normas de calidad para su uso como biocombustibles**, lo que hace necesaria su mezcla con cosustratos biomásicos disponibles en el territorio y de mayor calidad, para así incrementar la eficiencia de los recursos. Los datos obtenidos concuerdan con otros autores que establecen poderes caloríficos y contenidos en cenizas semejantes para las especies estudiadas^{4, 5, 13}. Si bien es cierto que existen pocos estudios al respecto, en aquellos existentes se establece que el proceso de valorización termoquímico idóneo para este tipo de materiales sería aquel que sea más tolerante a la presencia de cenizas en el biocombustible de partida. Por ejemplo, para procesos de gasificación, la materia mineral puede jugar un papel importante por su efecto catalítico a la hora de destruir los alquitranes⁴. Es importante asimismo tener en cuenta que las características fisicoquímicas de las algas como pueden ser el contenido en cenizas o en humedad están sujetas a la estacionalidad del recurso, pudiendo variar sustancialmente de una época del año a otra.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos tras la realización del análisis inmediato y la determinación del poder calorífico de las **algas** estudiadas indican que presentan un **elevado contenido en humedad, cenizas y un poder calorífico moderado**. El estudio del proceso de secado en las algas estudiadas (secado natural vs forzado), permite determinar que, en un contexto industrial donde la calidad y homogeneidad de producto es imprescindible, parece clara la **apuesta por un proceso de secado forzado** donde se puede obtener material homogéneo y con las características de humedad adecuadas para peletizar en cuestión de horas. La densificación de la especie mayoritaria observada en las costas gallegas, esto es, *Ulva lactuca*, fue llevada a cabo sin dificultades técnicas relevantes. No obstante, los pellets obtenidos tras dicho proceso presentan, al igual que el material de partida, un elevado contenido en cenizas y un poder calorífico moderado. Asimismo la presencia de N, Cl y S indica la probable corrosión de los equipos de trabajo y la formación de agentes contaminantes como NO_x, SO₂ y HCl en procesos de valorización termoquímica. Es por ello que su combustión directa no presenta una opción atractiva. Para su uso como biocombustibles sería **recomendable su empleo** combinadas con **otros materiales de una mayor calidad** (es decir, con menos cenizas, más volátiles y mayor potencial energético). Asimismo, tras el desarrollo del presente trabajo de investigación se determina que sería recomendable un lavado más profundo de las algas de partida para bajar el contenido en sales de los materiales estudiados.

8. Bibliografía

- ¹ Salaet, S., Roca, J. “Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: algunos posibles escenarios futuros de emisiones”.
- ² European Commission (2018). “Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Diario Oficial de la Unión Europea”. Brussels. Report No.: 02018L2001 — EN — 21.12.2018 — 000.003.
- ³ Torreiro, Y., Ortiz, I., Molina, G., Maroño, M., Pérez, V., Murillo, J.M., et al. (2018). “Thermochemical assessment of *Nicotiana glauca*, *Panicum virgatum* and *Elytrigia elongata* as fuels for energy recovery through gasification”. *Fuel*, 225:71–79.
- ⁴ Coelho, F.P. “Potencial de aproveitamento energético da biomassa de macroalgas no estado de Alagoas” (2018).
- ⁵ Ross, A. B., Jones, J. M., Kubacki, M. L., & Bridgeman T. “Classification of macroalgae as fuel and its thermochemical behaviour” (2008). *Bioresour Technol* 99 (14):6494–504.
- ⁶ Marinho-Soriano, E., Fonseca, P.C., Carneiro, M.A.A., Moreira, W.S.C. “Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds” (2006). *Bioresour Technol* 97(18):2402–6.
- ⁷ Verma, V., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I. “Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance”(2012). *Appl Energy* 90:17–23.
- ⁸ Vicente, E., Duarte, M., Nunes, T., Tarelho, L., & Alves C. “Particulate and gaseous emissions from residential pellet combustion” (2014). *Proc SPEIC14—Towards Sustain Combust* 19–21.
- ⁹ Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., Riedl, R. “Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions” (1997). *Biomass and Bioenergy* 12(3):211–24.
- ¹⁰ Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Ogada, T., Siagi, Z. “Combustion of agricultural residues” (2000). *Prog Energy Combust Sci.* 26(1):1–27.
- ¹¹ Standardization. EC for. UNE-EN ISO 17225:2014-Solid biofuels - Fuel specifications and classes (2014).
- ¹² Toscano, G., Riva, G., Foppa Pedretti, E., Corinaldesi, F., Mengarelli, C., Duca, D. “Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements” (2013). *Biomass and Bioenergy* 56:317–22.
- ¹³ Maceiras, R., Ortiz, L., Cancela, Á., & Sánchez Á. “Analysis of combustion products of seaweeds residue pellets” (2015). *Environ Prog Sustain Energy* 34(4):1187–90.

The logo for VALORALGAE features a stylized green 'V' with a leaf-like shape on its right side, followed by the word 'VALORALGAE' in a bold, sans-serif font. The letters are colored in a gradient from light green to yellow.



valoralgae.es