



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

Andrés
Iglesias Canabal

Tesis doctoral

PROPIEDADES ENERGÉTICAS
DE PELLETS TORREFACTOS
DE PINO Y DE MEZCLAS DE
PINO CON EUCALIPTO

Santiago de Compostela, 2024

TESIS DOCTORAL

**PROPIEDADES ENERGÉTICAS
DE PELLETS TORREFACTOS DE
PINO Y DE MEZCLAS DE PINO
CON EUCALIPTO**

Andrés Iglesias Canabal

Directores: Roque Rodríguez Soalleiro y José Antonio Rodríguez Añón

Tutor: José Antonio Rodríguez Añón

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y SOSTENIBILIDAD
ENERGÉTICA**

SANTIAGO DE COMPOSTELA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores de tesis Roque Rodríguez Soalleiro y José Antonio Rodríguez Añón por confiar en mí para llevar a cabo este proyecto. Por todos sus consejos y su ayuda durante estos años.

En segundo lugar, aunque no menos importante, quiero expresar mi gratitud a Xurxo Proupín Castiñeiras, por su gran ayuda en el laboratorio y por estar siempre dispuesto a echarme una mano..

No puedo dejar de mencionar a Cristina Eimil Fraga por su ayuda con los análisis de muestras y sus aportaciones durante mi estancia en Lugo.

Gracias también a María Vázquez García de Biomasa Forestal por aportar el material de pino y a Javier García Calvo de Tomás Forestal SLU por las trozas de eucalipto.

Por último, a mi familia, mi mayor pilar. Desde siempre, me han brindado todo el cariño y soporte necesario para alcanzar mis metas. Su constante aliento y comprensión han sido esenciales para superar los desafíos a lo largo de este camino. Gracias por creer en mí y por darme la fuerza para continuar.

PRÓLOGO

Esta tesis doctoral, presentada bajo la modalidad tesis monográfica con reproducción total o parcial de publicaciones, resume 4 años de trabajo de investigación e incluye 2 artículos principales (reproducidos parcial y/o totalmente), todos ellos publicados en revistas indexadas (JCR). La monografía también incluye otros resultados, discusiones y conclusiones derivadas del trabajo de investigación y respaldadas por los hallazgos reportados en los artículos.

ARTÍCULOS INCLUIDOS EN ESTA TESIS:

1. Iglesias Canabal, A., Proupín Castiñeiras, J., Rodríguez Añón, J.A., Eimil Fraga, C., Rodríguez Soalleiro, R., 2023. Elemental composition of raw and torrefied pellets made from pine and pine-eucalyptus blends. *Biomass and Bioenergy* 177. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106951>

Este artículo ha sido reproducido en el capítulo 3.

La revista *Biomass and Bioenergy*, perteneciente a la editorial Elsevier, permite la reutilización del artículo (Acceso Abierto - Licencia CC BY-NC-ND) por parte del autor como parte de su tesis (<http://creativecommons.org/licenses/bync-nd/4.0/>).

2. Iglesias Canabal, A., Proupín Castiñeiras, J., Rodríguez Añón, J.A., Eimil Fraga, C., Rodríguez Soalleiro, R., 2023. Predicting the energy properties of torrefied debarked pine pellets from torrefaction temperature and residence time. *Renewable Energy* 218. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119346>

Este artículo ha sido reproducido en el capítulo 3.

La revista *Renewable Energy*, perteneciente a la editorial Elsevier, permite la reutilización del artículo (Acceso Abierto - Licencia CC BY-NC-ND) por parte del autor como parte de su tesis (<http://creativecommons.org/licenses/bync-nd/4.0/>).

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Las contribuciones de los autores en los artículos mencionados anteriormente fueron las siguientes:

- Andrés Iglesias Canabal: realizó los experimentos, contribuyó al análisis de resultados y a la redacción del manuscrito.
- Jorge Proupín Castiñeiras: realizó experimentos de calorimetría y contribuyó al análisis de resultados.
- José Antonio Rodríguez Añón: realizó experimentos de calorimetría y contribuyó al análisis de resultados.

- Cristina Eimil Fraga: contribuyó al análisis de resultados y a la redacción del manuscrito.
- Roque Rodríguez Soalleiro: contribuyó al análisis de resultados y a la redacción del manuscrito.

DESEMPEÑO DE LAS REVISTAS

Artículo	Revista	Categoría	SJR
1	Biomass and Bioenergy	Renewable Energy, Sustainability and the Environment	1.107 (Q2)
2	Renewable Energy	Renewable Energy, Sustainability and the Environment	1.923 (Q1)

RESUMEN

La producción de pellets A1+ en Galicia se basa exclusivamente en la utilización de puntal de pino descortezado como materia prima. Los pellets resultantes poseen excelentes propiedades energéticas, incluyendo un alto poder calorífico y bajo contenido de humedad y cenizas. Ante las incertidumbres de la sobre la futura disponibilidad de pino a precios razonables, se ha estudiado en esta tesis el empleo de *Pinus radiata* y de mezclas de pino y eucalipto (en concreto *Eucalyptus nitens*) para producir dos tipos de biocombustibles: astilla y pellet, bien en crudo o con tratamiento térmico de torrefacción.

Previamente al estudio de la pelletización y la torrefacción se analizan las astillas de pino y eucalipto. La astilla de madera descortezada de *Pinus radiata* es un biocombustible de alta calidad para uso térmico doméstico, clasificable en la categoría A1 de la norma UNE-EN ISO 17225-4 si se seca previamente a un contenido de humedad (en base húmeda) inferior al 25 %. De manera similar, la astilla de *Eucalyptus nitens* de árboles de 15 años puede ser una alternativa interesante, aunque con niveles de cloro más altos que el pino. Los valores de densidades aparentes (BD) para astillas de pino y eucalipto a un 25 % de humedad son de 203 kg/m³ y 218 kg/m³, respectivamente. Además, la astilla de *Eucalyptus nitens* ofrece una mejor densidad energética (775 kWh/m³) comparada con la de pino (729 kWh/m³).

Para poder desarrollar esta tesis se estudiaron, produjeron y torrefactaron tres mezclas de pellets 100 % pino (100P), 90 % pino 10 % eucalipto (90P/10E) y 60 % pino 40 % eucalipto (60P/40E). Los pellets puros de pino sin torrefactar presentan propiedades óptimas para su clasificación en la categoría A1 de la norma UNE-EN ISO 17225-2. La densificación incrementa su densidad a granel en un 350 % y la densidad energética en un 410 % respecto al material de partida. Sin embargo, la pelletización de mezclas con eucalipto presentó dificultades en laboratorio, requiriendo ajustes en la matriz utilizada y diferentes relaciones de compresión según la proporción de eucalipto en la mezcla estudiada, dada su mayor dureza.

Los niveles de ciertos elementos como Na, K, Zn, B y Cl aumentan con el porcentaje de eucalipto en el pellet sin torrefactar, con el cloro siendo particularmente limitante para su uso térmico doméstico. La torrefacción tras pelletizar (proceso TAP) se muestra efectiva para reducir los problemas de cloro, logrando tasas de liberación del 90 % a una severidad de 300 °C durante 60 minutos.

Complementariamente se han desarrollado modelos precisos para predecir el rendimiento en masa, porcentaje de cenizas, volátiles, carbono fijo, poder calorífico superior anhidro y poder calorífico neto en función de la severidad de torrefacción. Estos modelos permiten recomendar un rango óptimo de torrefacción entre 260 y 270 °C durante 50 a 60 minutos para obtener pellets torrefactos con las propiedades deseadas de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 17225-8.

La torrefacción de pellets (proceso TAP) con una severidad de 240 °C durante 40 minutos resulta en una reducción promedio de la densidad aparente del 11 %, aunque se compensa con un aumento moderado de la densidad energética (4 %). Por otra parte, en el proceso TOP, la pelletización de astilla torrefactada a 240 °C durante 40 minutos con un 2 % de almidón de maíz como aglomerante se mostró factible, logrando altos niveles de densidad aparente y durabilidad mecánica, así como un incremento de la densidad energética entre el 11 y 14 % respecto al pellet crudo.

La disminución de la densidad aparente y de la durabilidad mecánica en los pellets TAP puede afectar negativamente al transporte y manejabilidad de este biocombustible. Los valores obtenidos fueron inferiores a los marcados por la UNE-EN ISO 17225-8 para las categorías TW1 y TW2 (excepto el valor de durabilidad mecánica del pellet 90P/10E).

Tanto el proceso TAP como el TOP presentaron un aumento de porcentaje de carbono y poder calorífico respecto al pellet de madera sin tratamiento térmico y una disminución en el contenido de hidrógeno y oxígeno. Se ha observado una reducción de la higroscopicidad derivada del tratamiento térmico.

Ambos procesos de torrefacción podrían integrarse en las líneas actuales de fabricación de pellets, empleando energía térmica proveniente de la combustión de cortezas. Los pellets torrefactos, especialmente los TOP, podrían tener un mercado en el ámbito industrial debido a sus mejoradas propiedades energéticas y mayor friabilidad, que facilita su pulverización previa a la combustión o gasificación.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la torrefacción de pellets puros de pino puede producir un producto de alta calidad con unas mejoras significativas en el poder calorífico neto, alcanzando hasta un 50 % de incremento en las condiciones de mayor severidad ensayadas.

RESUMO

A produción de pellets A1+ en Galicia baséase exclusivamente na utilización de puntal de piñeiro descortezado como materia prima. Os pellets resultantes posúen excelentes propiedades enerxéticas, incluíndo un alto poder calorífico e baixo contido de humidade e cinzas. Ante as incertezas sobre a futura dispoñibilidade de piñeiro a prezos razoables, estudouse nesta tese o emprego de *Pinus radiata* e de mesturas de piñeiro e eucalipto (en concreto *Eucalyptus nitens*) para producir dous tipos de biocombustibles: astilla e pellet, ben en cru ou con tratamento térmico de torrefacción.

Previamente ao estudo da pelletización e a torrefacción analízanse as astillas de piñeiro e eucalipto. A astilla de madeira descortezada de *Pinus radiata* é un biocombustible de alta calidade para uso térmico doméstico, clasificable na categoría A1 da norma UNE-EN ISO 17225-4 se se seca previamente a un contido

de humidade (en base húmida) inferior ao 25 %. De xeito semellante, a astilla de *Eucalyptus nitens* de árbores de 15 anos pode ser unha alternativa interesante, aínda que con niveis de cloro máis altos que o piñeiro. Os valores de densidades aparentes (BD) para astillas de piñeiro e eucalipto a un 25 % de humidade son de 203 kg/m³ e 218 kg/m³, respectivamente. Ademais, a astilla de *Eucalyptus nitens* ofrece unha mellor densidade enerxética (775 kWh/m³) comparada coa de piñeiro (729 kWh/m³).

Para poder desenvolver esta tese estudáronse, producíronse e torrefactáronse tres mesturas de pellets 100 % piñeiro (100P), 90 % piñeiro 10 % eucalipto (90P/10E) e 60 % piñeiro 40 % eucalipto (60P/40E). Os pellets puros de piñeiro sen torrefactar presentan propiedades óptimas para a súa clasificación na categoría A1 da norma UNE-EN ISO 17225-2. A densificación incrementa a súa densidade a granel nun 350 % e a densidade enerxética nun 410 % respecto ao material de partida. Non obstante, a pelletización de mesturas con eucalipto presentou dificultades en laboratorio, requirindo axustes na matriz utilizada e diferentes relacións de compresión segundo a proporción de eucalipto na mestura estudada, dada a súa maior dureza.

Os niveis de certos elementos como Na, K, Zn, B e Cl aumentan co porcentaxe de eucalipto no pellet sen torrefactar, sendo o cloro particularmente limitante para o seu uso térmico doméstico. A torrefacción tras pelletizar (proceso TAP) móstrase efectiva para reducir os problemas de cloro, logrando taxas de liberación do 90 % a unha severidade de 300 °C durante 60 minutos.

Complementariamente desenvóléronse modelos precisos para predicir o rendemento en masa, porcentaxe de cinzas, volátiles, carbono fixo, poder calorífico superior anhidro e poder calorífico neto en función da severidade de torrefacción. Estes modelos permiten recomendar un rango óptimo de torrefacción entre 260 e 270 °C durante 50 a 60 minutos para obter pellets torrefactos coas propiedades desexadas de acordo coa norma UNE-EN ISO 17225-8.

A torrefacción de pellets (proceso TAP) cunha severidade de 240 °C durante 40 minutos resulta nunha redución promedio da densidade aparente do 11 %, aínda que se compensa cun aumento moderado da densidade enerxética (4 %). Por outra banda, no proceso TOP, a pelletización de astilla torrefactada a 240 °C durante 40 minutos cun 2 % de amidón de millo como aglomerante mostrouse factible, logrando altos niveis de densidade aparente e durabilidade mecánica, así como un incremento da densidade enerxética entre o 11 e 14 % respecto ao pellet cru.

A diminución da densidade aparente e da durabilidade mecánica nos pellets TAP pode afectar negativamente ao transporte e manexabilidade deste biocombustible. Os valores obtidos foron inferiores aos marcados pola UNE-EN ISO 17225-8 para as categorías TW1 e TW2 (agás o valor de durabilidade mecánica do pellet 90P/10E).

Tanto o proceso TAP como o TOP presentaron un aumento de porcentaxe de carbono e poder calorífico respecto ao pellet de madeira sen tratamento térmico e unha diminución no contido de hidróxeno e osíxeno. Observouse unha redución da higroscopicidade derivada do tratamento térmico.

Ambos procesos de torrefacción poderían integrarse nas liñas actuais de fabricación de pellets, empregando enerxía térmica proveniente da combustión de cortizas. Os pellets torrefactos, especialmente os TOP, poderían ter un mercado no ámbito industrial debido ás súas melloradas propiedades enerxéticas e maior friabilidade, que facilita a súa pulverización previa á combustión ou gasificación.

Os resultados obtidos permiten concluír que a torrefacción de pellets puros de piñeiro pode producir un produto de alta calidade cunhas melloras significativas no poder calorífico neto, alcanzando ata un 50 % de incremento nas condicións de maior severidade ensaiadas.

ABSTRACT

The production of A1+ pellets in Galicia is based exclusively on the use of debarked pine logs as raw material. The resulting pellets have excellent energy properties, including high calorific value and low moisture and ash content. Due to uncertainties about the future availability of pine at reasonable prices, this thesis examines the use of *Pinus radiata* and mixtures of pine and eucalyptus (specifically *Eucalyptus nitens*) to produce two types of biofuels: chips and pellets, either raw or with torrefaction thermal treatment.

Before studying pelletization and torrefaction, the pine and eucalyptus chips are analyzed. Debarked *Pinus radiata* wood chips are a high-quality biofuel for domestic thermal use, classifiable in category A1 of the UNE-EN ISO 17225-4 standard if they are dried to a moisture content (wet basis) of less than 25 %. Similarly, 15-year-old *Eucalyptus nitens* chips can be an interesting alternative, although they have higher chlorine levels than pine. The bulk densities (BD) for pine and eucalyptus chips at 25% moisture are 203 kg/m³ and 218 kg/m³, respectively. Additionally, *Eucalyptus nitens* chips offer better energy density (775 kWh/m³) compared to pine (729 kWh/m³).

For this thesis, three mixtures of pellets were studied, produced, and torrefied: 100 % pine (100P), 90 % pine 10 % eucalyptus (90P/10E), and 60 % pine 40 % eucalyptus (60P/40E). Untorrefied pure pine pellets exhibit optimal properties for classification in category A1 of the UNE-EN ISO 17225-2 standard. Densification increases their bulk density by 350 % and energy density by 410 % compared to the starting material. However, pelletization of mixtures with eucalyptus presented difficulties in the laboratory, requiring adjustments in the matrix used and different compression ratios according to the proportion of eucalyptus in the studied mixture due to its greater hardness.

The levels of certain elements such as Na, K, Zn, B, and Cl increase with the percentage of eucalyptus in the untorrefied pellet, with chlorine being particularly limiting for domestic thermal use. Post-pelletization torrefaction (TAP process) is effective in reducing chlorine problems, achieving release rates of 90 % at a severity of 300 °C for 60 minutes.

Additionally, precise models have been developed to predict mass yield, ash percentage, volatiles, fixed carbon, higher anhydrous calorific value, and net calorific value based on torrefaction severity. These models recommend an optimal torrefaction range between 260 and 270 °C for 50 to 60 minutes to obtain torrefied pellets with desired properties according to the UNE-EN ISO 17225-8 standard.

Torrefaction of pellets (TAP process) at a severity of 240 °C for 40 minutes results in an average reduction in bulk density of 11 %, though it is offset by a moderate increase in energy density (4 %). On the other hand, in the TOP process, pelletization of torrefied chips at 240 °C for 40 minutes with 2 % corn starch as a binder was feasible, achieving high levels of bulk density and mechanical durability, as well as an increase in energy density between 11 and 14 % compared to raw pellets.

The decrease in bulk density and mechanical durability in TAP pellets may negatively affect the transportation and handling of this biofuel. The obtained values were lower than those set by the UNE-EN ISO 17225-8 for TW1 and TW2 categories (except for the mechanical durability value of the 90P/10E pellet).

Both the TAP and TOP processes showed an increase in carbon percentage and calorific value compared to untreated wood pellets and a decrease in hydrogen and oxygen content. A reduction in hygroscopicity due to thermal treatment was observed.

Both torrefaction processes could be integrated into current pellet manufacturing lines, using thermal energy from bark combustion. Torrefied pellets, especially TOP, could have a market in the industrial sector due to their improved energy properties and higher friability, facilitating their pulverization prior to combustion or gasification.

The results obtained allow concluding that torrefaction of pure pine pellets can produce a high-quality product with significant improvements in net calorific value, reaching up to a 50 % increase under the most severe tested conditions.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS.....	21
1.1	Contexto.....	21
1.2	El proceso de producción del pellet.....	22
1.3	Normalización y situación actual de los pellets.....	26
1.4	La materia prima: evolución del consumo de pino.....	31
1.5	La torrefacción.....	35
1.6	Objetivos.....	46
2.	POTENCIAL DE LA ASTILLA DE <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus nitens</i>	47
2.1	Introducción.....	47
2.2	Material y métodos.....	49
2.2.1	Materia prima.....	49
2.2.2	Caracterización y análisis de las astillas.....	54
2.2.3	Análisis estadístico.....	55
2.3	Resultados y discusión.....	56
3.	EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP.....	59
3.1	Introducción.....	59
3.2	Material y métodos.....	61
3.2.1	Biomasa.....	61
3.2.2	Proceso de pelletización.....	63
3.2.3	Proceso de torrefacción.....	64
3.2.4	Análisis de las propiedades de los pellets.....	64
3.2.5	Análisis estadístico.....	66
3.3	Resultados y discusión.....	67
3.3.1	Rendimiento másico.....	67
3.3.2	Análisis inmediato.....	67
3.3.3	Análisis elemental.....	70
3.3.4	Poder calorífico y rendimiento energético.....	77
3.3.5	Índice de álcali.....	80
3.3.6	Superficies de respuesta.....	80
3.3.7	Propiedades mecánicas y densidad energética.....	94

3.3.8 Absorción de humedad	98
4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP	102
RESUMEN.....	102
4.1 Introducción.....	102
4.2 Material y métodos.....	103
4.2.1 Biomasa	103
4.2.2 Proceso de torrefacción	103
4.2.3 Proceso de pelletización	103
4.2.4 Análisis de las propiedades de las astillas y de los pellets.....	105
4.2.5 Análisis de las propiedades de las astillas y de los pellets.....	105
4.3 Resultados y discusión.....	106
4.3.1 Análisis de las astillas torrefactas.....	106
4.3.2 Análisis inmediato	107
4.3.3 Análisis elemental	109
4.3.4 Poder calorífico.....	110
4.3.5 Índice de álcali	112
4.3.6 Propiedades mecánicas y densidad energética	113
4.3.7 Absorción de humedad	117
5. DISCUSIÓN GENERAL	118
6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	128
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
ANEXOS	141

Índice de figuras

Figura 1. Pellets de origen leñoso. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 2. Proceso de producción de los pellets. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 3. Estructura de la biomasa leñosa a nivel micro. Fuente: Thybring and Fredriksson (2021). Reproducción con autorización.....	26
Figura 4. Evolución de la producción de pellets a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 5. Producción de pellets a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 6. Consumo de pellets a nivel global. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 7. Evolución del consumo y producción de pellets en España. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 8. Top 5 mayores productores de pellets certificados en volumen. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 9. Producción de pellets certificados por CCAA. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 10. Precios corrientes medios de venta de madera en cargadero. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 11. Etapas de la torrefacción. Fuente: Chen et al. (2021). Reproducción con autorización.....	37
Figura 12. Cambios en la estructura de la biomasa con la torrefacción. Fuente: Tumuluru et al. (2011). Reproducción con autorización.	39
Figura 13. Esquema de un reactor de lecho móvil. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.....	41
Figura 14. Sección de un reactor de lecho fluidizado. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.....	42
Figura 15. Esquema de un reactor de tambor rotatorio. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.....	42
Figura 16. Esquema de un reactor de tornillo. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.....	43
Figura 17. Esquema de un microondas. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.....	43
Figura 18. Proyectos de biomasa torrefacta a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 19. Actualización del mapa de biocombustibles sólidos en el año 2023. Fuente: AVEBIOM. Reproducción con autorización.	48
Figura 20. Madera de eucalipto con corteza. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 21. Madera de eucalipto descortezada. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 22. Biotrituradora Greenmech Arborist 130. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 23. Astilla de eucalipto sin corteza. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 24. Astilla de pino sin corteza. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 25. Calorímetro IKA C5000. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 26. Serrín de pino. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 27. Serrín de eucalipto. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 28. Esquema y dimensiones características de una matriz plana de pelletización. Fuente: Elaboración propia.	63

Figura 29. Durabilímetro. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 30. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del rendimiento másico en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 31. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de cenizas en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. La línea rosa marca el límite para los pellets según la UNE-EN ISO 17225-2 y la línea roja según la UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 32. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de volátiles en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 33. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de carbono fijo en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 34. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la tasa de liberación de cloro en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 35. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico superior anhidro en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 36. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico inferior en base húmeda en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 37. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del rendimiento energético en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 38. Diagrama de van Krevelen adaptado de Basu et al. (2013) para los datos de este estudio. La reproducción de la imagen ha sido autorizada.....	79
Figura 39. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del índice de álcali en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 40. Valores observados versus valores predichos para las seis variables en estudio, en comparación con la línea objetivo Predicho = Observado. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 41. Superficies de respuesta de cenizas, volátiles, carbono fijo, rendimiento en masa y poderes caloríficos superior e inferior para los pellets de pino puro P100. Fuente: Elaboración propia.....	86

Figura 42. Isolíneas para el contenido de cenizas (líneas continuas, A, %) y poder calorífico neto (líneas de puntos, PCI_h , $MJ\ kg^{-1}$) derivado de los modelos de regresión obtenidos para pellet de pino puro. El área sombreada se refiere a las combinaciones de temperatura de torrefacción ($^{\circ}C$) y tiempo de residencia (min) cubiertos por los datos, donde el modelo podría proponerse para predicciones. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 43. Valores observados versus valores predichos para las seis variables en estudio, en comparación con la línea objetivo Predicho = Observado. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 44. Superficies de respuesta de cenizas, volátiles, carbono fijo, rendimiento en masa y poderes caloríficos superior e inferior para los pellets con mezcla de eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 45. Isolíneas para el contenido de cenizas (líneas continuas, A, %) y poder calorífico neto (líneas de puntos, PCI_h , $MJ\ kg^{-1}$) derivado de los modelos de regresión obtenidos para pellet de mezcla pino y eucalipto. El área sombreada se refiere a las combinaciones de temperatura de torrefacción ($^{\circ}C$) y tiempo de residencia (min) cubiertos por los datos, donde el modelo podría proponerse para predicciones. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 46. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets crudos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 47. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 48. Humedad relativa media del aire a 1.5 m de altura de noviembre de 2022 a noviembre de 2023. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 49. Evolución de la humedad de los pellets de control durante un año. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 50. Evolución de la humedad de los pellets TAP durante un año. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 51. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de humedad en base húmeda. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	107
Figura 52. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de cenizas en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	108
Figura 53. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de volátiles en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	108
Figura 54. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del carbono fijo en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	109
Figura 55. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico superior anhidro. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.	111

Figura 56. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico inferior en base húmeda. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	111
Figura 57. Diagrama de van Krevelen adaptado de Basu et al. (2013) para los datos de este estudio. La reproducción de la imagen ha sido autorizada.....	112
Figura 58. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del índice de álcali. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	113
Figura 59. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets TOP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	115
Figura 60. Evolución de la humedad de los pellets TAP durante un año. Fuente: Elaboración propia.....	117
Figura 61. Imágenes de los tres pellets TOP y TAP estudiados (severidad 240 °C 40 min). Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 62. Isolíneas para el rendimiento másico (RM, %) derivado de los modelos de regresión obtenidos en el presente estudio para pino. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 63. Isolíneas para el rendimiento másico (RM, %) derivado de los modelos de regresión obtenidos en el presente estudio para mezclas con eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	123
Figura 64. Isolíneas para poder calorífico inferior en base húmeda (PCI_h , $MJ\ kg^{-1}$) para las tres combinaciones estudiadas. Fuente: Elaboración propia.....	124
Figura 65. Representación del proceso de producción de pellets TAP (aguas abajo) (a) y producción de pellets TOP (aguas abajo) (b). Adaptado de Kumar et al. (2016) y Tumuluru et al. (2021). Reproducción con autorización.	125

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis inmediato, poderes caloríficos y propiedades mecánicas de las astillas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 2. Análisis elemental de las astillas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 3. Importancia y efectos de la composición elemental de los biocombustibles para su aprovechamiento térmico. FAP=partículas de cenizas volantes (elementos volátiles que forman aerosoles). Los límites de las normas se refieren al uso doméstico para las categorías A1, A2 y B. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 4. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	70
Tabla 5. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 6. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 7. Datos de diferentes estudios en los que se determinaron propiedades del eucalipto torrefactado producido en diferentes condiciones. Los valores negativos de pérdida de H indican una ganancia. Los datos se transformaron a base seca cuando fue necesario. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 8. Resultados del análisis de regresión que muestran las estimaciones de parámetros y las medidas de exactitud y precisión de los modelos para muestras de pellet P100. Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 9. Resultados del análisis de regresión que muestran las estimaciones de parámetros y las medidas de exactitud y precisión de los modelos (8) y (9) para muestras de mezcla de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 10. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets de control. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 11. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 12. Diferentes estudios en los que las propiedades de pellets torrefactos producidos bajo diferentes condiciones fueron determinadas. Se muestran las condiciones óptimas de torrefacción de cada estudio. Fuente: Elaboración propia.	97
Tabla 13. Análisis inmediato, poderes caloríficos y propiedades mecánicas de las astillas torrefactas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.	106
Tabla 14. Análisis elemental de las astillas torrefactas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.....	106

Tabla 15. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 16. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 17. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 18. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	113
Tabla 19. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP-TOP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.....	114
Tabla 20. Revisión bibliográfica del uso de aglutinantes en pellets TOP de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia.....	117
Tabla 21. Reporte de las propiedades que cumplen los pellets TAP respecto a la norma UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla 22. Reporte de las propiedades que cumplen los pellets TOP respecto a la norma UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.	122

Glosario de términos y abreviaturas

100P: mezcla/pellet 100 % pino

60P/40E: mezcla/pellet 60 % pino 40 % eucalipto

90P/10E: mezcla/pellet 90 % pino 10 % eucalipto

A: cenizas (%)

Al: aluminio

ANOVA: análisis de varianza

AVEBIOM: Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa

B: boro

BD: densidad a granel (kg m^{-3})

C: carbono

Ca: calcio

CF: carbono fijo (%)

CH: contenido de humedad (%)

CH_3Cl : clorometano

Cl: cloro

Cu: cobre

DU: durabilidad mecánica (%)

ED: densidad energética (kWh m^{-3})

FAP: partículas de cenizas volantes (elementos volátiles que forman aerosoles)

Fe: hierro

FI: contenido de finos (%)

H: hidrógeno

IFCG: Inventario Forestal Continuo de Galicia

IFN: inventarios forestales nacionales

K: potasio

K_2CO_3 : carbonato de potasio

K_2O : óxido de potasio

KCl: cloruro de potasio

m_{Clc} : contenido de cloro del pellet de control

m_{Cltorr} : contenido de cloro del pellet torrefacto

Mg: magnesio

Mn: manganeso

MRES: residuo medio

MV: materia volátil (%)

N: nitrógeno

Na: sodio

Na_2O : óxido de sodio

O: oxígeno

OH: grupo hidroxilo

P: fósforo

PCI_0 : poder calorífico inferior anhidro ($kJ\ kg^{-1}$)

PCI_h : poder calorífico inferior en base húmeda ($kJ\ kg^{-1}$)

PCS_0 : poder calorífico superior anhidro ($kJ\ kg^{-1}$)

PCS_h : poder calorífico superior en base húmeda ($kJ\ kg^{-1}$)

R_{Cl} : relación de liberación de cloro (%)

RE: rendimiento energético (%)

RM: rendimiento másico (%)

RMSE: raíz del error cuadrático medio

S: azufre

Si: silicio

TAP: torrefacción después de pelletizar

TOP: torrefacción antes de pelletizar

UE: Unión Europea

Zn: zinc

ρ : densidade del pellet ($kg\ m^{-3}$)

1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS

1.1 Contexto

La preocupación por los efectos que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) están generando en el sistema climático y los costes ambientales y energéticos asociados, están obligando a los diferentes países a buscar una alternativa a los sistemas energéticos tradicionales (carbón, gas natural y petróleo).

Las energías renovables se presentan como el futuro energético a medio y largo plazo para los países que buscan mejorar la seguridad energética, ampliar, socializar y democratizar el acceso a la energía y reducir la contaminación ambiental, asegurando así el futuro mantenimiento del bienestar social.

Para tratar de evitar una posible crisis energética y disminuir el deterioro del medio ambiente, la comunidad internacional ha estado desarrollando una serie de iniciativas desde finales de los 90. Históricamente, y por relevancia social, la primera de ellas fue la firma del protocolo de Kioto (Boehringer, 2003; UNFCCC, n.d.), en el cual los 37 países firmantes y la Unión Europea (UE) se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global. Más tarde y de forma menos global, la UE pone en marcha su propia estrategia en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta el año 2030 y en la que se contemplan una serie de objetivos y metas durante el período 2021-2030. Los objetivos clave para dicho año son la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un mínimo del 40 % con respecto a 1990, un 32 % de cuota de energías renovables y una mejora de la eficiencia energética de al menos un 32.5 % (European Commission, n.d.). Ya en la actualidad, la UE ha integrado su estrategia ambiental, social y energética en lo que se conoce como el Pacto Verde Europeo (IRENA, 2023), un conjunto de iniciativas políticas con el objetivo de situar a la UE en el camino de la transición ecológica para poder alcanzar la neutralidad climática en el 2050 (Abbass et al., 2022; Urban et al., 2024).

Todas estas iniciativas políticas, unidas a la creciente concienciación ambiental de la sociedad y los marcos legislativos que se están desarrollando para frenar en la medida de lo posible los efectos negativos del cambio climático está haciendo que las energías renovables se estén posicionando en los mercados internacionales debido a su alta competitividad, mayor eficiencia y solución de transición ecológica por su menor impacto ambiental.

Como marco de trabajo, se entiende por energías renovables aquellas que proceden de fuentes naturales y casi inagotables ya que se reponen más rápido que se consumen, durante su uso generan menos emisiones que la quema de combustibles fósiles tradicionales por lo que son ambientalmente más respetuosas, y social y económicamente son más rentables en forma de costes y puestos de trabajo (United Nations, n.d.; IRENA, 2023). A este grupo pertenecen la energía solar, mareomotriz, eólica, hidroeléctrica, biomasa, undimotriz y geotérmica.

El eje central de esta investigación, y en la que se centrará este trabajo, es la biomasa tratada termoquímicamente, en concreto los pellets de madera, principalmente procedentes de pino. La biomasa comprende toda aquella materia orgánica susceptible de ser aprovechada como energía térmica o eléctrica. La biomasa es uno de los mayores contribuyentes a la producción de energía sostenible a nivel global. Se estima que representa el 10 % de la producción mundial total de energía (Basu et al., 2013). Además, la biomasa es actualmente el único recurso renovable disponible para la producción de biocarburantes (etanol de la fibra de grano y biodiésel). Se espera que la demanda de biocombustibles y bioenergía aumente debido a la gran demanda de energía y a las recientes normativas restrictivas que se están desarrollando para poner freno a las energías contaminantes (IEA, n.d.).

Históricamente, esta fuente de energía simplemente se quemaba para la obtención de electricidad y calor. No obstante, los avances en la tecnología han provisto un mayor rango de posibilidades para la conversión de esta fuente de energía renovable, en bioquímica y bioproductos. Esta fuente energética ha cobrado gran interés en los últimos años, debido a su papel en la reducción de gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes, reducción de residuos, desarrollo económico y seguridad energética (Dahlquist, 2013).

Se estima que aproximadamente un 5 % de la biomasa disponible en el mundo (13500 millones de toneladas métricas) (Basu et al., 2013) es potencialmente aprovechable para la producción de energía. Este porcentaje es lo suficientemente grande como para abastecer a un 26 % de la población mundial.

1.2 El proceso de producción del pellet

Históricamente, la biomasa leñosa se ha utilizado como fuente de energía para producir principalmente calor en el hogar. Entre los diferentes tipos de biomasa leñosa en uso caben destacar los pellets, que son el caso de estudio de esta tesis (Figura 1). Se trata de un biocombustible de origen orgánico que se produce mediante compresión de astillas a alta presión. La lignina de la propia biomasa actúa como aglomerante natural ayudando a unir todas las partículas resultando en un cilindro de 3.15 a 40 mm de longitud y un diámetro de 6 u 8 mm.



Figura 1. Pellets de origen leñoso. Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, se trata de un combustible natural con bajas emisiones de dióxido de carbono, ya que durante el crecimiento de los árboles estos realizan la fotosíntesis absorbiendo el CO_2 de la atmósfera y liberando O_2 . Este CO_2 se libera posteriormente durante la combustión de los pellets estableciendo un ciclo de emisiones que se considera neutro.

Los pellets únicamente se deben usar en calderas y estufas específicas y homologadas para la combustión de este tipo de biocombustible. Se pueden utilizar para calefacción de viviendas, en calderas de agua, de vapor, y también a nivel industrial.

Este biocombustible presenta varias ventajas (Ortíz and Míguez, 1995):

- Como ya se dijo, un ciclo de emisiones de CO_2 neutro.
- Alto poder calorífico y densidad energética elevada.
- Fácil transporte lo que facilita la logística.
- Menos emisiones y más económico que los combustibles fósiles.
- Menor densidad real y aparente que la biomasa tradicional.



- Alto rendimiento de combustión en calderas y estufas pudiendo llegar hasta un 90 %.

- Aprovechamiento de las cenizas generadas como abono.

De forma habitual, cuando se habla de fabricar pellets siempre se piensa en la fase específica de pelletización, sin embargo, previamente a esta densificación de la biomasa deben realizarse una serie de procesos, al igual que después de obtener los pellets. El proceso de fabricación de los pellets de origen leñoso puede resumirse como (Wei et al., 2024; Basu et al., 2013):

- **Preparación y obtención de la materia prima.** Es el primer paso cuando se van a fabricar pellets de madera. Si el pellet es para uso personal, las materias primas suelen ser los residuos de cultivos, de podas o de desbroces, pero si éste es para uso comercial, la biomasa empleada normalmente es serrín o restos obtenidos de aserraderos cercanos. Para una pequeña planta de pellets, la cantidad de materia prima no es muy elevada. Sin embargo, en el caso de grandes plantas, la preparación de la materia prima a veces se convierte en un problema grave, ya que la demanda es importante, y la materia restante de un aserradero puede no resultar suficiente. Por lo tanto, una gran planta de pellets suele utilizar troncos y ramas de madera como materia prima lo que implica un mayor coste y competir por una materia prima más demandada por otros sectores productivos secundarios.

- **Reducción del tamaño.** Para plantas de pellets grandes lo primero que se debe hacer es reducir el tamaño de la biomasa. Las materias primas para producir pellets de madera deben tener un diámetro inferior a 5 mm, por lo que los troncos y las ramas deben procesarse para reducir su tamaño. En esta etapa, una planta de pellets de gran tamaño suele utilizar la astilladora de madera, que es un equipo común de reducción de tamaño que convierte por impacto contra cuchillas los troncos y ramas en astillas de madera con dimensión habitual menor de 40 mm para su posterior procesamiento. Este no es un paso necesario para plantas pequeñas, ya que el serrín es un subproducto del propio proceso de aserrado.

- **Secado.** Para plantas grandes de pellets de madera, después del paso inicial de reducción de tamaño, las materias primas deben secarse. Para producir pellets de madera de alta calidad, la biomasa debe mantener un contenido de humedad del 8 % al 12 %, por lo que debe emplearse un secadero para reducir su contenido de humedad. El secadero más común para plantas de pellets grandes es el de tambor rotatorio, que es la opción más rentable para plantas de pellets grandes. El proceso de secado también es un paso necesario para que la planta de pellets a pequeña escala produzca pellets de madera comerciales.

- **Tamizado.** Para las grandes plantas de pellets de madera, después del proceso de secado, la materia prima se tamiza y se limpia para separar los materiales no deseados como los restos de piedra y metales que pudiese contener la biomasa. Las máquinas empleadas son despedregadoras, tamizadoras y separadores magnéticos (Tolosana et al., 2008). Las plantas pequeñas no suelen tener en cuenta este paso.

- **Molienda.** La molienda también es un paso de reducción de tamaño, y un paso necesario tanto en las plantas grandes y pequeñas. Durante este proceso las materias primas se introducen en un molino de martillos que tritura la biomasa en piezas de menor calibre hasta alcanzar un diámetro inferior a 5 mm. Debe tenerse en cuenta que un molino de martillos solo puede procesar las materias primas con un diámetro de no más de 50 mm, de ahí la necesidad de reducir su tamaño en la astilladora previamente.

- **Pelletización.** Después del proceso de molienda, las materias primas de madera alcanzan los requisitos de tamaño y humedad para la fabricación de pellets de madera. El siguiente paso es la densificación de la astilla o serrín. La máquina utilizada para pelletizar las materias primas y convertirlas en pellets de madera se denomina pelletizadora. Su principal función es convertir un material astillado en pequeñas piezas llamadas gránulos o pellets mediante un proceso de "aglutinación". Hay dos tipos de pelletizadoras, las pelletizadoras de matriz anular y las pelletizadoras de matriz plana. La pelletizadora de matriz anular tiene una mayor capacidad de producción de pellets por hora que las pelletizadoras de matriz plana.

- **Enfriado.** Como después de la extrusión los pellets alcanzan temperaturas de 90 a 100 °C, deben enfriarse con aire a 25 °C o a temperatura ambiente. Esto reconfigura la lignina y endurece el producto, contribuyendo a mantener su calidad durante el almacenamiento y la manipulación. Posteriormente, los pellets se tamizan para separar los finos, que generalmente se reutilizan en el proceso. Finalmente se procede al envasado y almacenamiento.

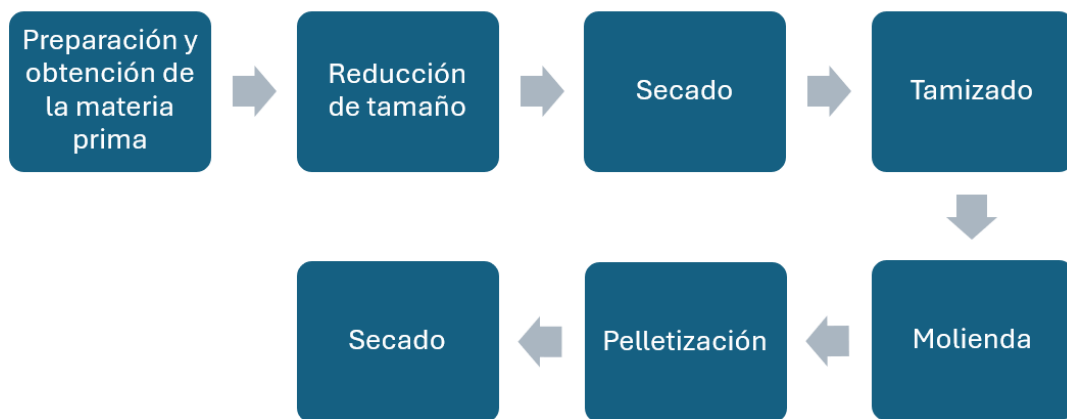


Figura 2. Proceso de producción de los pellets. Fuente: Elaboración propia.

Entrando ya más en detalle en la química del proceso, la composición polimérica de las paredes celulares y otros constituyentes de la biomasa, esta varía ampliamente, pero está compuesta esencialmente de tres polímeros principales: celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 3) (Gent et al., 2017).

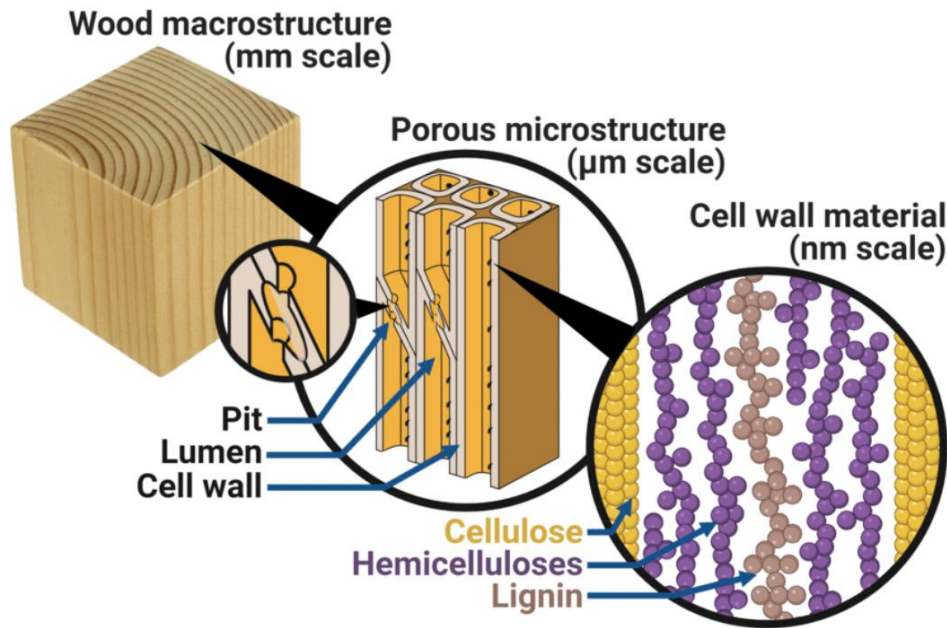


Figura 3. Estructura de la biomasa leñosa a nivel micro. Fuente: Thybring and Fredriksson (2021). Reproducción con autorización.

La celulosa es un polímero lineal que constituye aproximadamente el 40-45 % del peso seco de la madera. Se compone de subunidades de D-glucosa unidas entre sí para formar largas cadenas (fibrillas elementales), que se enlazan mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Las fibras celulares, formadas por varias microfibrillas unidas, pueden ser cristalinas o amorfas.

La hemicelulosa es un polímero de carbohidrato complejo con un peso molecular más bajo que la celulosa y constituye 25-30 % del peso seco total de la madera. Se compone de D-xilosa, D-manosa, D-galactosa, D-glucosa, L-arabinosa, 4-O-metilglucurónico, ácidos D-galacturónico y D-glucurónico. El componente principal de la hemicelulosa de madera dura es el glucuronoxilano y el arabino-glucuronoxilano, y en el caso de la madera blanda lo es el glucomanano. A diferencia de la celulosa, las hemicelulosas son polímeros fácilmente hidrolizables y no forman agregados.

La lignina junto con la celulosa es el polímero más abundante en la tierra. La lignina es un compuesto no estructurado y muy ramificado, compuesto por 4-propenilfenol, 4-propenil-2-metoxifenol y 4-propenil-2,5-dimetoxifenol. Este polímero llena los espacios en la pared celular entre los componentes de celulosa, hemicelulosa y pectina. La lignina es el agente cementante de las fibras de celulosa que sostienen las células adyacentes. Una madera dura contiene entre 18 a 25 % en peso seco de lignina, mientras que madera blanda contiene 25-35 %.

1.3 Normalización y situación actual de los pellets

En la actualidad, existen una serie de sellos de calidad que aseguran que los pellets comerciales cumplen una serie de propiedades y características que los hacen aptos

para su uso comercial y que certifican las diferentes normativas nacionales e internacionales (ISO, UNE, DIN, etc), son ENplus y DINplus.

ENplus es el certificado de pellet más conocido. Perteneciente al EPC (European Pellet Council) y está regulado por AVEBIOM (Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa). Esta certificación nació en el año 2011 y fue diseñada por el Instituto Alemán del Pellet (DEPI).

La certificación y el sello de calidad DINplus surge en el año 2002 impulsada por DIN CERTCO como primer organismo en realizar la certificación de calidad de pellets de madera.

Ambas certificaciones son muy valoradas a nivel europeo y mundial, y son indispensables para la venta de pellets para su uso en estufas y calderas a nivel doméstico o industrial.

En los últimos 10 años este biocombustible se ha convertido en una fuente de energía indispensable a nivel global. Es por ello, que la producción de pellets se ha visto incrementada debido a la gran demanda a nivel industrial como residencial para su aprovechamiento en forma de calor como electricidad (Figura 4).

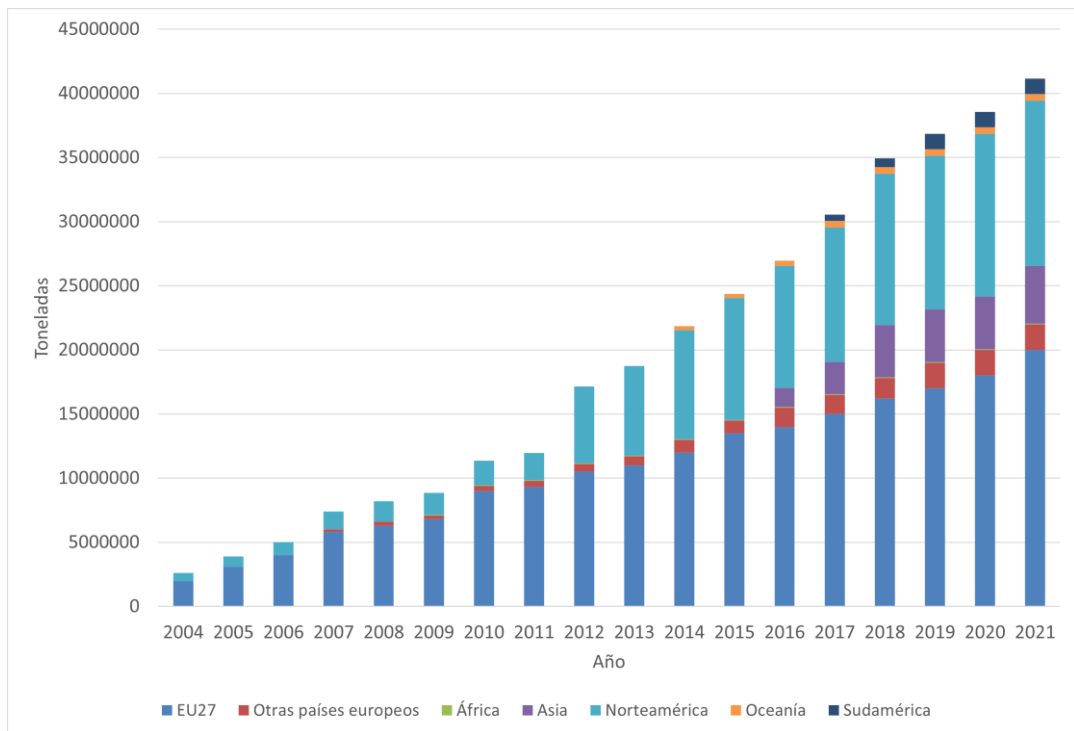


Figura 4. Evolución de la producción de pellets a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.

En el año 2021, la producción de pellets en los países pertenecientes a la Unión Europea aumentó entorno al 9 % (1.64 Mtons). El mayor productor fue Alemania con una producción de 3.36 Mtons, seguido por Lituania con 2.11 Mtons. Además de estos dos países, cabe destacar la gran producción a nivel mundial de Suecia, Francia, Polonia, Estonia y Austria. La UE representa el 48.31 % de la producción de pellet a nivel mundial, seguido por Norteamérica (31.73 %) y Asia (11.91 %). El

porcentaje restante lo abarcan Oceanía, Sudamérica, África y los países no pertenecientes a la UE (Figura 5).

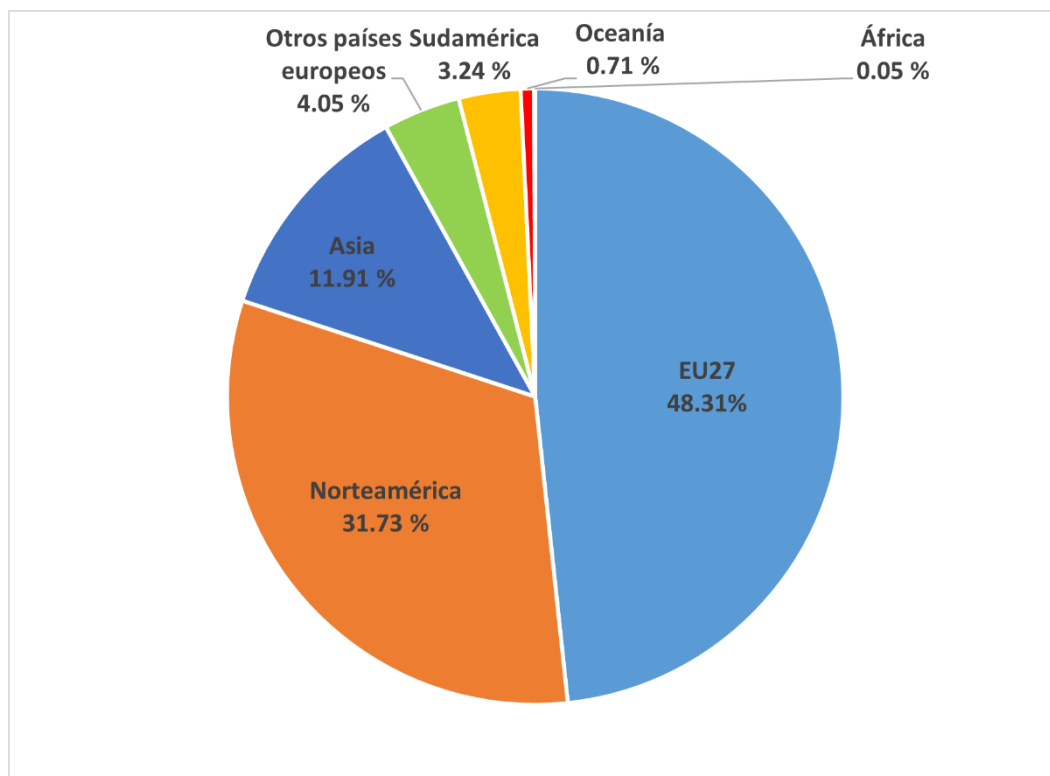


Figura 5. Producción de pellets a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.

El mercado del pellet ha sufrido alteraciones importantes como consecuencia de la pandemia de covid en 2020 y especialmente de la guerra de Ucrania, que comenzó en febrero de 2022. Estos episodios supusieron subidas importantes (más del 50 %) de los precios, que se han visto en general acompañadas de un descenso del consumo para satisfacer el sector térmico doméstico, que se liga también a una menor severidad de los inviernos. Actualmente se acepta que el pellet de madera es una *commodity* a nivel mundial, por lo que los precios atienden a los problemas de transporte marítimo y abastecimiento derivado de la situación geopolítica. Aún dentro de ese esquema general, puede considerarse que la evolución de los precios del pellet ha mostrado una estabilidad importante.

En la Figura 6 se representa el consumo de pellets a nivel mundial, se puede observar que la UE fue el mayor consumidor de pellets en el mundo en el año 2021, pasando de 20.6 Mtons consumidas en 2020 a 24.5 millones de toneladas (52 % del consumo mundial). Cabe destacar el papel de países como Dinamarca e Italia (3.4 Mtons cada país), Países Bajos (3.3 Mtons) y Alemania (2.9 Mtons) (Statistical Report 2022).

Los países europeos fuera de la UE también mostraron un crecimiento constante en el consumo (+6 %), impulsado mayormente por el aumento en el consumo residencial, excepto en el Reino Unido, donde el consumo industrial es el mayor

impulsor de este biocombustible (+300.000 toneladas), este país consumió 9.8 Mtons (Statistical Report 2022).

En América del Norte, el consumo de pellets se ha mantenido estable en los últimos años, a pesar de varias iniciativas para expandir el mercado tanto en EE. UU. como en Canadá.

Por último, Asia representa el 16 %, porcentaje concentrado en dos países Corea del Sur y Japón. El porcentaje restante lo abarcan América y Oceanía (Statistical Report 2022).

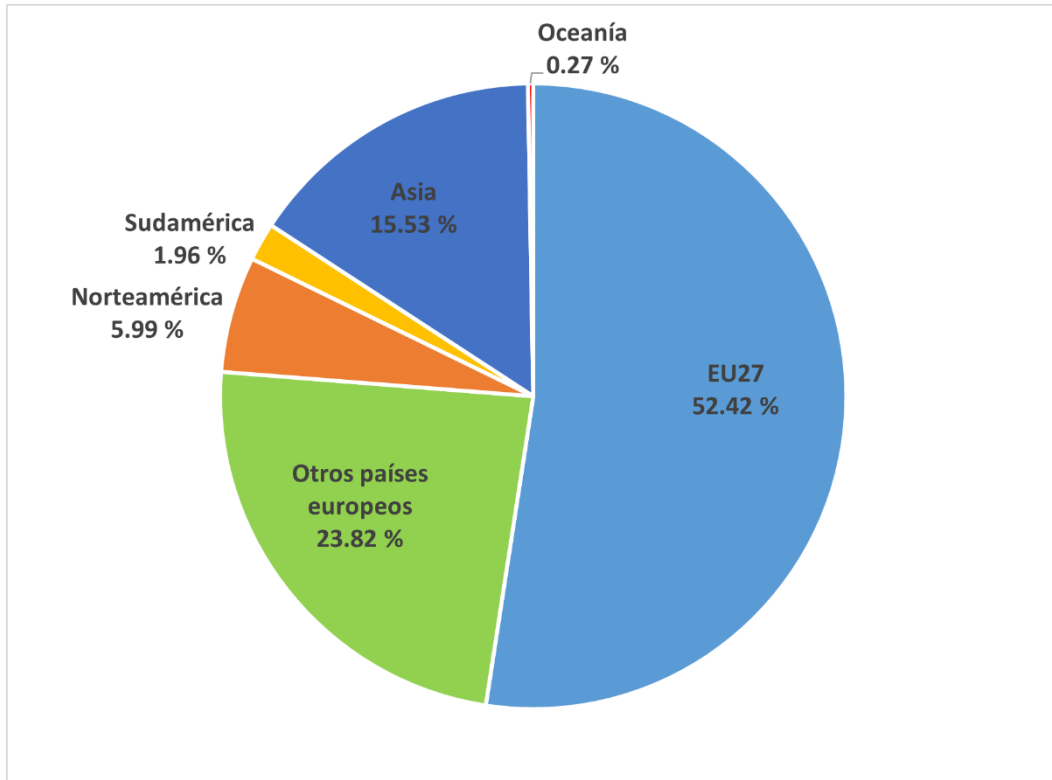


Figura 6. Consumo de pellets a nivel global. Fuente: Elaboración propia.

El aumento de la producción y consumo de pellets a nivel global también se ha visto reflejado a nivel nacional (Figura 7). España produjo en el año 2021 0.64 Mtons en 75 plantas de producción que se encuentran operativas y se consumieron 0.78 Mtons en calefacción tanto residencial como comercial. El 85 % del uso de pellet fue a nivel doméstico mediante el uso de estufas y calderas, un 12 % se usó a nivel industrial y el 3 % restante para otros usos como camas de ganado, barbacoas, etc.

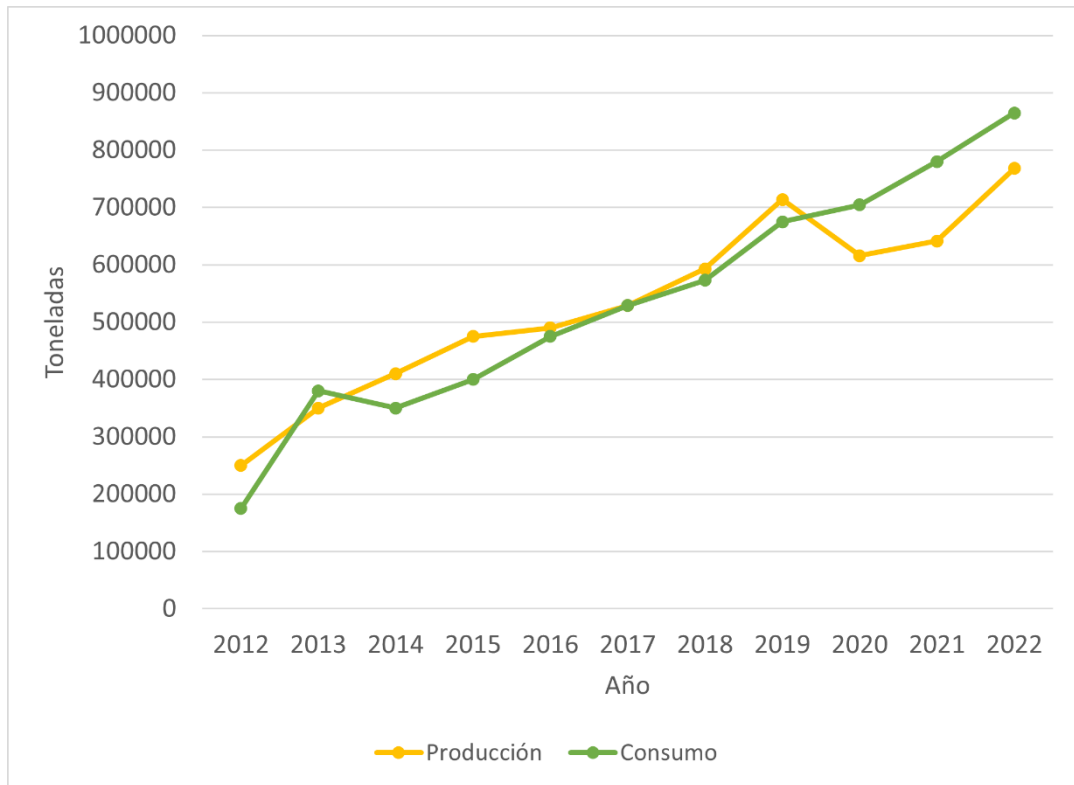


Figura 7. Evolución del consumo y producción de pellets en España. Fuente: Elaboración propia.

España es un gran productor de pellets a nivel mundial, gran parte de sus exportaciones son a Francia e Italia (105000 toneladas de pellets) e importa pellets principalmente de Portugal (140000 toneladas).

Un punto importante en el mercado del pellet es la certificación ENplus, un pellet con este certificado presenta una gran calidad ya que ha superado una serie de restricciones de diferentes propiedades.

Los grandes cinco productores de pellet certificado en Europa en 2021 fueron: Alemania con más de 3 Mtons seguido por Austria, Francia, Polonia y España (Figura 8).

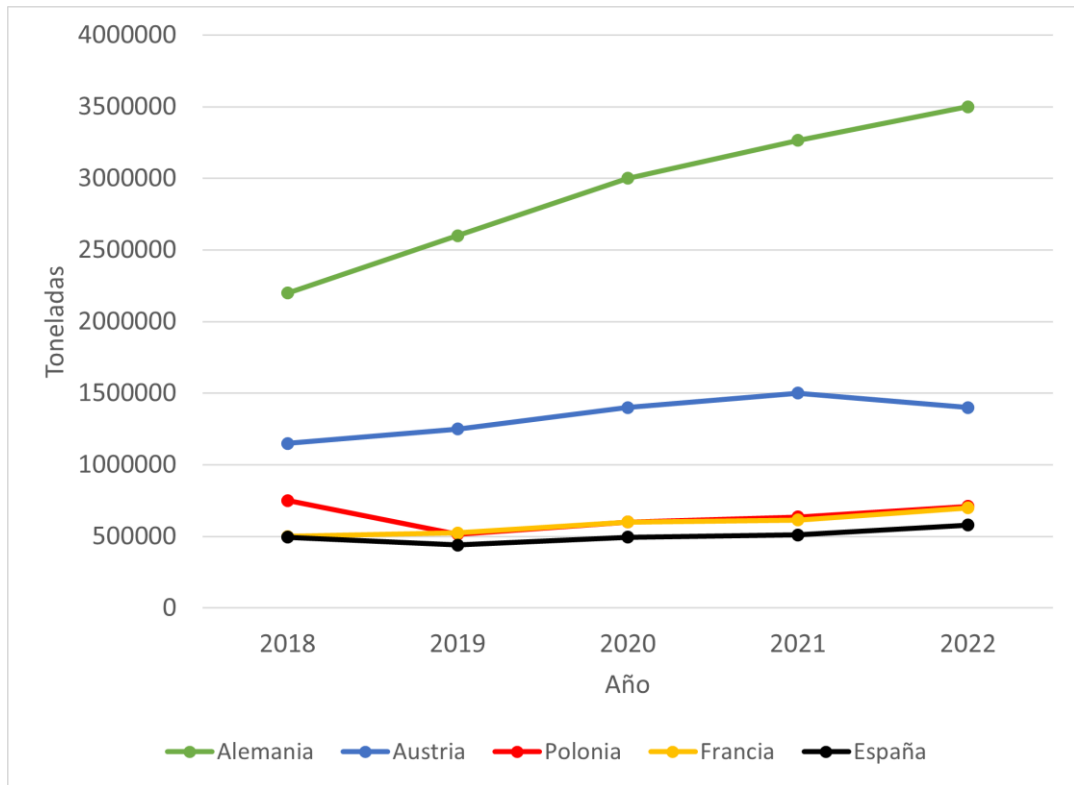


Figura 8. Top 5 mayores productores de pellets certificados en volumen. Fuente: Elaboración propia.

En España los grandes productores de pellets certificados son: Castilla y León, Cataluña y Galicia (Figura 9). Castilla y León representa el 31 % de la producción nacional, Cataluña el 17 % y Galicia 11 %.

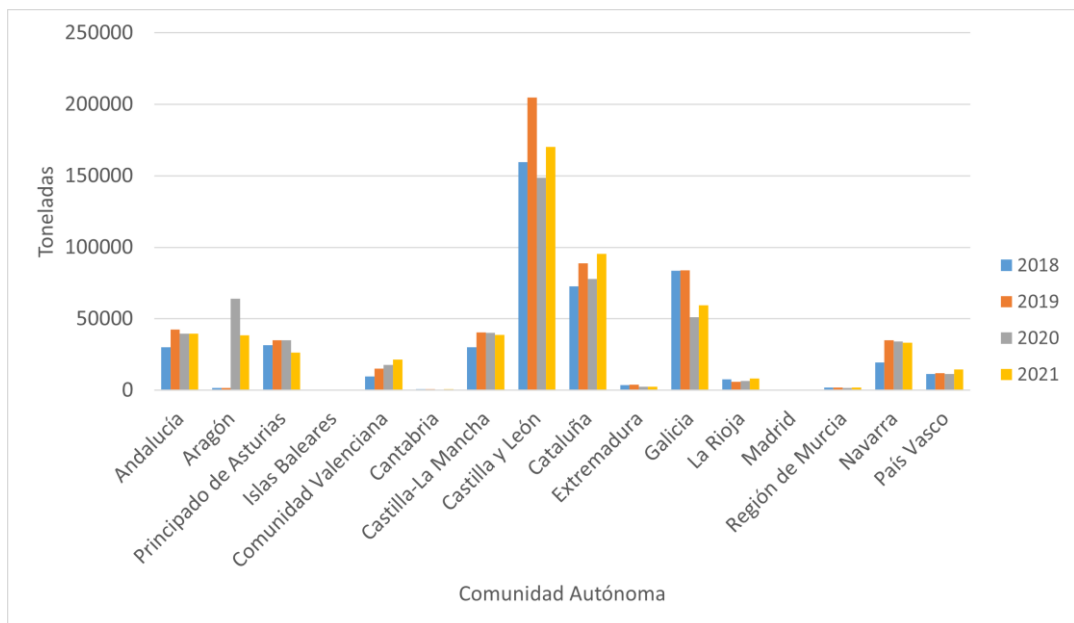


Figura 9. Producción de pellets certificados por CCAA. Fuente: Elaboración propia.



1.4 La materia prima: evolución del consumo de pino

La materia prima de mayor calidad para la producción de pellet en nuestro ámbito geográfico es la madera descortezada de pino, que puede recibirse en forma de

troncos, astillada o incluso ya molida en forma de serrines (Lerma-Arce et al., 2017). Esta calidad deriva de un poder calorífico algo superior al de especies frondosas, tanto las autóctonas como los eucaliptos, y de la facilidad de pelletización derivada de la abundancia de lignina, que actuaría como aglomerante natural (Filbakk et al., 2011), aspectos que determinan que el pellet producido presente un bajo contenido en ceniza, una elevada densidad aparente y durabilidad, pudiendo cumplir los requisitos más elevados de calidad de pellet de uso doméstico según la norma UNE-EN ISO 17225-2.

La disponibilidad de materia prima es variable según las comunidades autónomas españolas. En algunos ámbitos, subproductos de la industria del aserrado como el serrín está disponible para un uso final en producción de pellet, siendo varias las empresas que combinan en cadena ambas actividades (aserradero y planta de pellet). En Galicia sin embargo la industria forestal está muy integrada desde hace tiempo, lo que significa que los subproductos de aserraderos se emplean en industrias de desintegración como las de tableros (Picos, 2023). Esa situación condiciona a las fábricas de pellets gallegas a abastecerse directamente de madera en rollo a través de rematantes.

La madera de pino que se comercializa en Galicia corresponde en general a 3 especies principales:

1. El pino del país o pino marítimo (*Pinus pinaster*), en el que el nivel de cortas ha ido bajando en los últimos años, hasta alcanzar una producción global actual de 1.6 M m³/año. Las cortas de esta especie llegaron a ser de 3 Mm³ anuales.
2. El pino radiata o insigne (*Pinus radiata*), especie originalmente americana que se ha difundido mucho en plantaciones y cuyo nivel de cortas ha ido subiendo hasta alcanzar un nivel similar al pino del país: 1.6 Mm³.
3. El pino silvestre (*Pinus sylvestris*), especie de montaña y de crecimiento más lento, cuyo nivel de producción se situaría en 0.3 Mm³.

El nivel global de cortas de pino en Galicia ascendería por tanto a 3.5 Mm³, de un total de volumen cortado que ronda los 10 Mm³. Las cortas de pino suponen actualmente por tanto un 35 % de las cortas totales en Galicia, mientras que hace una década suponían la mitad. Esto es indicativo de que la relevancia productiva a nivel volumétrico de ambas especies de eucalipto (*Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*) ha incrementado mucho con los años (Xunta de Galicia, n.d.).

Las propiedades de la madera de las 3 especies de pino indicadas presentan algunas diferencias que pueden condicionar su transformación industrial preferente. Una diferencia importante es la densidad de la madera, que es claramente más alta en el pino silvestre, que presenta además mayor dureza y resistencia mecánica (Vignote, 2014). Son más similares las maderas de pino pinaster y pino radiata, aunque el primero es ligeramente más denso en Galicia. Por

sus condiciones de crecimiento y porte de los árboles, las trozas de pino silvestre y pino radiata suelen ser más rectas y con menos defectos de madera en rollo que las de pino pinaster.

Esas circunstancias han condicionado a que las 3 especies se traten conjuntamente cuando se analiza el uso industrial de la madera de pino en Galicia. El abanico de usos industriales de la madera de pino en Galicia tiene su mayor nivel de precio y de valor añadido en la rolla apta para chapa plana, que debe cumplir unas exigencias estrictas de rectitud, limpieza de nudos, ausencia de azulado y diámetro en punta delgada (>55 cm). Para este destino se usa casi exclusivamente pino del país y los precios en cargadero de camión son de unos 100 €/m³ con corteza (cc). La misma especie se emplea también para desenrollo, con los mismos requisitos anteriores pero unos requisitos dimensionales inferiores (>38 cm en punta delgada), oscilando en este caso el precio en cargadero entre 47 y 62 €/m³ cc (AFG, 2023).

Las fábricas de pellets no pueden competir por la materia prima con estas industrias, pero tampoco con los aserraderos, ámbito de uso industrial que requiere rolla derecha, verde y sin azular, pero en el que las calidades oscilan desde madera sin nudos y gruesa (>40 cm; 81-92 €/m³ cc) hasta rolla delgada (14-19 cm; 35-45 €/m³ cc).

El resto de ámbitos industriales consumen madera de trituración, así denominada debido a que tras el descortezado se procede al astillado de los troncos, procesando posteriormente las astillas o bien incluso desfibrando el material. Las industrias de tableros consumen todas las calidades de rolla y puntal de pequeña dimensión, incluso ramas gruesas y piezas muy torcidas. El rango de precios en cargadero de camión es de 32 a 37 €/m³ cc.

Las fábricas de pellets compiten directamente con las anteriores por su abastecimiento, así como con las empresas que producen directamente astilla para uso energético térmico en el ámbito doméstico. Los precios en cargadero de camión que suelen pagar estas empresas del ámbito de la biomasa oscilan entre 22 y 33 €/m³ cc, lo que las coloca en una situación de desventaja en escenarios de incremento del precio de la madera de trituración del pino, como ha ocurrido en los últimos 3 años, si bien durante 2023 se ha producido una ligera bajada que aún no ha quedado reflejada en las estadísticas habituales del sector.

Las circunstancias indicadas, que afectan directamente al abastecimiento de materia prima de las fábricas de pellets, se producen además en una época de fuertes incertidumbres sobre la disponibilidad futura de madera de pino, que deriva de largo intervalo de tiempo entre los inventarios forestales nacionales (IFN) y la percepción sobre cambios de especies en las plantaciones en favor de eucaliptos, en concreto de *Eucalyptus nitens*. Estos cambios fueron especialmente relevantes

en los momentos inmediatamente anteriores a la entrada en vigor de la moratoria sobre plantaciones de eucalipto establecida por la Xunta de Galicia del 03/07/2021.

La información más actualizada sobre la disponibilidad de madera de pino en Galicia parte del Inventario Forestal Continuo de Galicia (IFCG), en el marco del cual se ha aportado recientemente las superficies asignadas a este grupo de especies, que totalizarían 422000 ha, frente a 409000 ha de eucalipto y 620000 ha de frondosas no eucaliptos (Picos, 2023). Resulta sin embargo evidente que la información de superficie cubierta no supone necesariamente un elevado nivel de recurso maderero, ya que debe considerarse en paralelo las existencias promedio por ha, que a su vez dependen del balance de clases de edad de las plantaciones.

A falta de resultados específicos de existencias derivadas del IFCG, la única comparación que puede realizarse de estos datos superficiales es con los que arroja el IFN4, cuyos trabajos de campo datan de 2008 y 2009 y que indicaban globalmente para coníferas unas 571000 ha, considerando la fracción que les correspondería en las clases definidas como mezclas de coníferas y frondosas. Por tanto, en unos 13 años, la superficie de coníferas se habría reducido en un 26 % (MAGRAMA, 2011).

La preocupación de las agrupaciones de propietarios forestales y de las asociaciones industriales (CONFEMADERA, Asociaciones de aserraderos y rematantes de la madera, clúster de la madera de Galicia), ha derivado en la creación de Arume, entidad que pretende relanzar el interés por el pino por parte de los selvicultores. Los datos de reforestación con pinos, si bien han mejorado en los últimos años, no parece que sean suficientes como para asegurar en el futuro el suministro de todas las empresas que consumen preferentemente estas maderas (ver Campogalego, 24/01/2023).

La alternativa de emplear ramas y restos de corta como materia prima se ha explorado a nivel de investigación, determinándose cómo quedan condicionadas algunas propiedades de los pellets producidos (Pegoretti et al., 2021; Lerma-Arce et al., 2017). Sin embargo, los costes de extracción y acondicionamiento para el transporte limitan la operatividad comercial de esa alternativa, siendo lógico el interés actual por el uso de materias primas alternativas que estarán más disponibles en el futuro, como la madera de eucalipto. La especie objetivo de eucalipto es *Eucalyptus nitens*, dado su menor nivel de precio comparado con *Eucalyptus globulus*, mucho más demandado para producir pasta de papel y otros destinos tecnológicos.

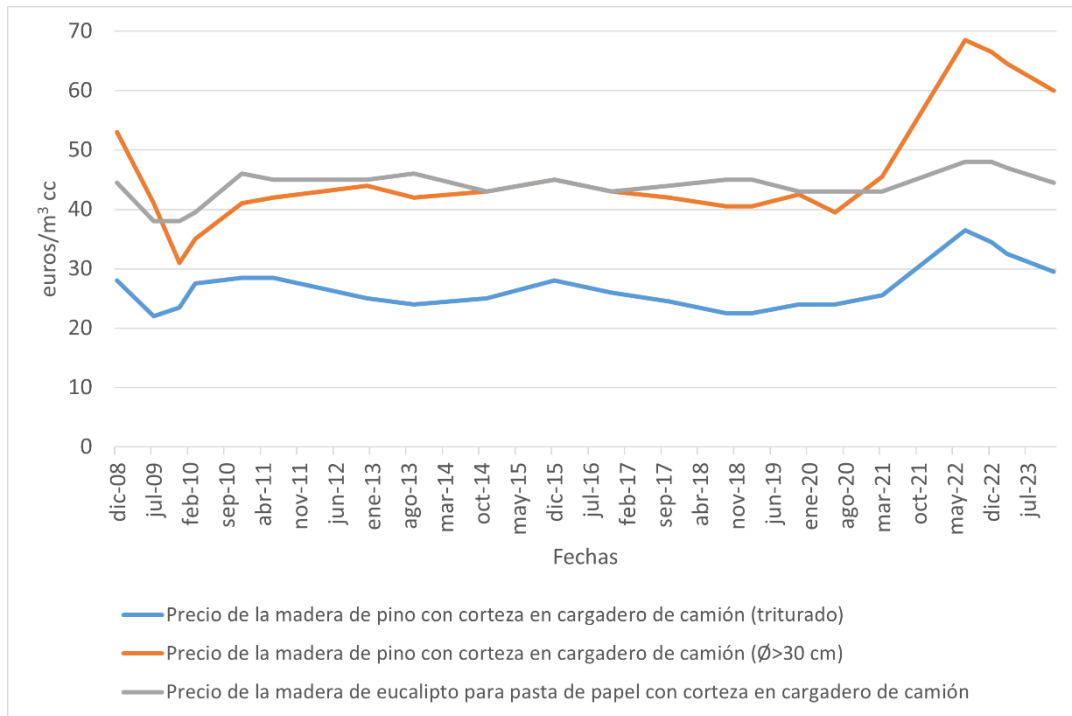


Figura 10. Precios corrientes medios de venta de madera en cargadero. Fuente: Elaboración propia.

1.5 La torrefacción

La torrefacción es un proceso termoquímico en una atmósfera inerte o con un contenido limitado de oxígeno en un rango de temperaturas de entre 200 a 300 °C y con un gradiente de calentamiento menor a 50 °C/min.

Otro aspecto importante de la definición de torrefacción es la concentración de oxígeno en el reactor. Diversos estudios (Basu et al., 2013; Uemura et al., 2011) sobre el efecto de la concentración de oxígeno en la torrefacción sugieren que no es esencial tener una atmósfera inerte para la torrefacción. La presencia de un pequeño porcentaje de oxígeno es aceptable e incluso puede tener un efecto beneficioso sobre la torrefacción.

Los principales beneficios de la torrefacción son: la reducción de la humedad, el aumento del poder calorífico, la disminución de las relaciones atómicas O/C y H/C, su naturaleza hidrofóbica y propiedades más uniformes.

Históricamente, la torrefacción se empezó a conocer en relación con el pretratamiento de la madera en el año 1930 en Francia (Gent et al., 2017) cuando la producción de madera torrefactada fue investigada para su uso en gasificadores, pero no fue hasta la década de los 80 cuando hubo un interés real en sustituir el carbón vegetal por material torrefactado.

En la actualidad los procesos de torrefacción se pueden clasificar en tres grupos: torrefacción seca (dry torrefaction), torrefacción húmeda (wet torrefaction) y torrefacción con vapor (steam torrefaction). Así tenemos la:

- Torrefacción seca (van der Stelt et al., 2011). En este proceso la biomasa se trata en atmósferas oxidativas o no oxidativas a temperaturas entre 200 y 300 °C. En la torrefacción no oxidativa se utilizan como gases portadores el nitrógeno y el dióxido de carbono, siendo el primero el más utilizado para este pretratamiento. En cuanto a la torrefacción oxidativa, se utilizan como gases portadores aire, gas de combustión y otros gases que contienen diferentes concentraciones de oxígeno.

Además, debido a la presencia de oxígeno en la atmósfera de torrefacción y a las reacciones exotérmicas que ocurren durante la degradación térmica, la torrefacción oxidativa tiene una tasa de reacción más alta que la torrefacción no oxidativa, lo que acorta la duración del proceso. El uso de aire o gases de combustión para torrefactar la biomasa reduce los costes operativos porque no se requiere la separación del nitrógeno del aire.

- Torrefacción húmeda (Li et al., 2015; Bach et al., 2016). La biomasa se trata con agua o soluciones ácidas diluidas en el rango de temperaturas entre 180-260 °C durante intervalos de 5 a 240 minutos. Con el aumento de la temperatura del agua, sus propiedades cambian drásticamente, incluida la constante dieléctrica, los productos iónicos, la densidad, la viscosidad y la difusividad. Estos cambios conducen a la degradación de la biomasa en fase líquida o acuosa. Por lo tanto, la torrefacción húmeda generalmente se opera en condiciones cercanas a las subcríticas.

Además, en este pretratamiento se puede agregar ácido sulfúrico, ácido acético y otros materiales como cloruro de litio al agua para mejorar el rendimiento. Debido a que en la torrefacción húmeda se trata la biomasa en un ambiente húmedo, no se requiere un proceso de secado previo, lo que implica que los lodos, las aguas residuales, el estiércol y otra biomasa húmeda pueden utilizarse directamente como materia prima.

También cabe resaltar que, en comparación con la torrefacción seca, la torrefacción húmeda puede obtener una mayor densificación energética con un rendimiento másico similar. Desde el punto de vista del consumo de energía, la torrefacción húmeda no requiere secado previo, por lo que se ahorra más energía en comparación con la torrefacción seca. Sin embargo, el proceso de recolección del producto es más costoso en términos de energía, lo que indica que existe una compensación en el consumo de energía.

Otra importante diferencia entre la torrefacción seca y húmeda es el contenido de cenizas en la biomasa. El contenido de cenizas del producto aumenta tras la torrefacción seca; sin embargo, el contenido de cenizas en la biomasa se reduce si se trata previamente mediante torrefacción húmeda, esto se debe a la disolución de los minerales de las cenizas en la fase acuosa. El contenido reducido de cenizas

puede evitar posibles problemas como la aglomeración, la deposición en calderas y estufas, la corrosión, el ensuciamiento y la escoria.

- Torrefacción con vapor (Lam et al., 2012). Además de las torrefacciones secas y húmedas, la torrefacción con vapor también es un proceso de torrefacción que utiliza una explosión de vapor a alta temperatura y alta presión para torrefactar la biomasa. Originalmente, este tipo de proceso se empleaba para producir bioetanol.

El proceso introduce vapor a alta presión y temperatura en una cámara sellada en la que se coloca la materia prima lignocelulósica y generalmente se lleva a cabo a temperaturas de 200-260 °C con un tiempo de residencia de 5-10 min. Posteriormente, la presión se libera rápidamente, lo que hace que el vapor hinche la matriz lignocelulósica y se separen las fibras individuales junto con una ligera pérdida de materia prima. Los volátiles de bajo peso molecular en la biomasa se eliminan durante la explosión de vapor, aumentando el poder calorífico y el contenido de carbono, y disminuyendo el tamaño medio de las partículas, la densidad aparente y el contenido de humedad de equilibrio.

La torrefacción con vapor presenta la ventaja de aumentar el poder calorífico, el contenido de carbono y la hidrofobicidad a temperaturas mucho más bajas y duraciones del tratamiento más cortas en comparación con la torrefacción seca. Además, los pellets tratados por explosión de vapor tienen mayor elasticidad y resistencia mecánica que los no tratados.

Durante el proceso de torrefacción se pueden diferenciar diferentes etapas y que se van a explicar a continuación (Figura 11) (Bergman et al., 2005; Chen et al., 2021):

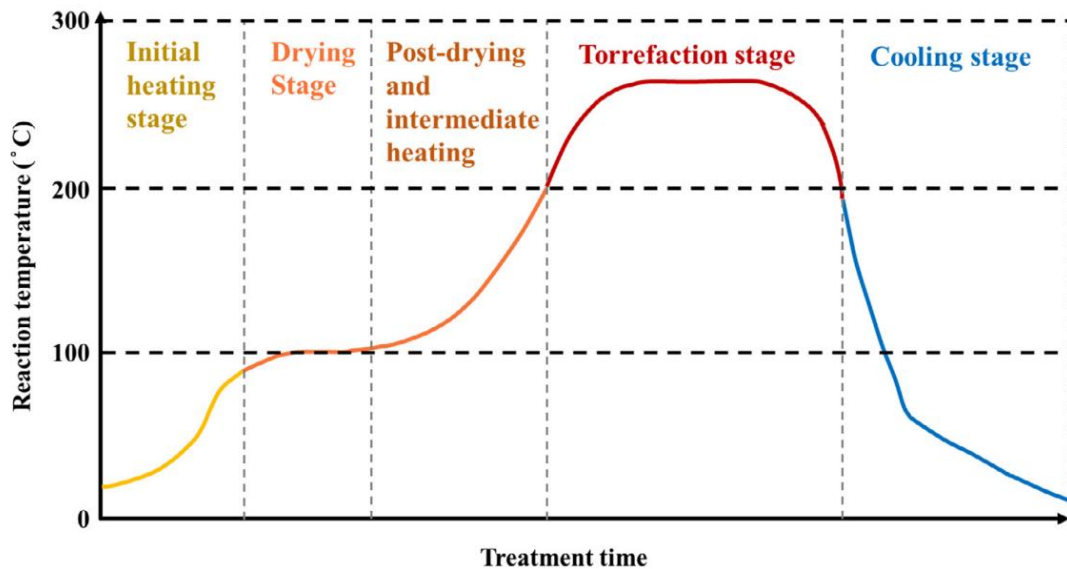


Figura 11. Etapas de la torrefacción. Fuente: Chen et al. (2021). Reproducción con autorización.

- Calentamiento inicial. La biomasa se calienta hasta alcanzar la temperatura deseada en la etapa de secado. Mientras tanto, la humedad presente en la biomasa se evapora gradualmente al final de esta etapa.
- Presecado. La temperatura se mantiene constante hasta que se alcanza el contenido crítico de humedad, mientras que el agua libre de la biomasa se evapora a un ritmo constante. La tasa de evaporación del agua comienza a disminuir cuando se alcanza el contenido crítico de humedad.
- Postsecado y calentamiento intermedio. La biomasa se calienta a 200 °C. El agua unida físicamente se elimina mientras que la resistencia a la transferencia de masa y calor se encuentra dentro de las partículas de biomasa. La biomasa está casi libre de contenido de agua al final de esta etapa. Se puede esperar alguna pérdida de masa durante esta etapa, como consecuencia de la evaporación de compuestos orgánicos ligeros.
- Torrefacción. La biomasa se torrefacta cuando la temperatura de reacción supera los 200 °C. Esta etapa se opera bajo una temperatura constante denominada temperatura de torrefacción. La desvolatilización comienza durante el período de calentamiento, continúa durante el período de temperatura constante y se detiene durante o después del período de enfriamiento.
- Enfriamiento. La temperatura del producto torrefactado disminuye desde la temperatura de torrefacción elegida hasta temperatura ambiente o la temperatura final deseada. No hay pérdida de masa durante este período.

El cambio en las propiedades de la biomasa durante la torrefacción se atribuye a algunos mecanismos de reacción involucrados y acoplados. Estos mecanismos incluyen la deshidroxilación de hemicelulosas, la desacetilación y descarboxilación de polímeros de hemicelulosas que contienen xilano, la despolimerización parcial y la desmetoxilación de celulosa (acortamiento de microfibrillas de celulosa) y lignina, etc. La pérdida de masa de biomasa por degradación térmica da como resultado la descarbonización, deshidrogenación y desoxigenación de la biomasa.

Todos los cambios en la biomasa debido a la torrefacción se observan en la Figura 12 y se explican a continuación (Tumuluru et al., 2011; Acharya et al., 2012).

La torrefacción de biomasa lignocelulósica implica la degradación de hemicelulosas, celulosa y lignina en diferentes etapas de temperatura. La biomasa se degrada inicialmente de 150 a 200 °C, debido a la deshidratación y eliminación de volátiles ligeros. Cuando se alcanzan los 200 °C de temperatura, se produce la degradación de las hemicelulosas, incluidas las reacciones de desacetilación y despolimerización. La desacetilación conduce a la formación de ácido acético, que cataliza la despolimerización adicional de los carbohidratos de bajo orden, así como la condensación y degradación de la lignina. La fase amorfa de la celulosa comienza a descomponerse alrededor de los 200 °C para aumentar la cristalinidad relativa de la

biomasa, mientras que la fase cristalina de la celulosa comienza a descomponerse y la despolimerización de la celulosa ocurre a temperaturas superiores a los 270 °C. La lignina tiene una estructura grande y complicada en comparación con las hemicelulosas y la celulosa. La lignina es un polímero tridimensional amorfo, durante la torrefacción de biomasa el ablandamiento de la lignina comienza a 160-190 °C, la escisión de los enlaces α - y β -aril-alquiléter se produce entre 150 °C y 300 °C, y la escisión de las cadenas laterales alifáticas se produce alrededor de los 300 °C. La escisión de los enlaces conduce a la eliminación de los grupos metoxilo (también llamada desmetoxilación). Además, se produce una despolimerización significativa cuando la temperatura de reacción supera los 300 °C.

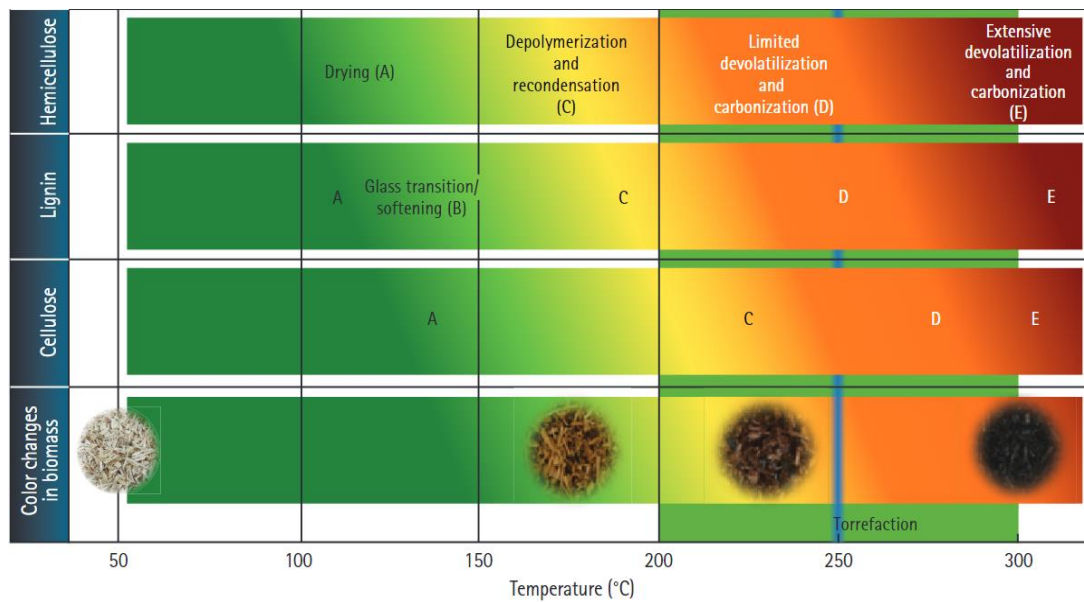


Figura 12. Cambios en la estructura de la biomasa con la torrefacción. Fuente: Tumuluru et al. (2011). Reproducción con autorización.

En la actualidad, se están desarrollando y estudiando diferentes clases de reactores para torrefacción. Muchos de estos han ido evolucionando a partir de otras unidades de tratamiento de biomasa como son los hornos de secado, estufas, reactores de pirólisis o carbonización. A la hora de clasificar los reactores deben tenerse en cuenta dos parámetros: la transmisión de calor y el contacto sólido (Basu et al., 2013).

Según el modo de la transmisión de calor

El calentamiento es una parte importante del proceso de torrefacción. Un medio lleva calor y lo transfiere a las partículas de biomasa. La transferencia de calor a la biomasa puede llevarse a cabo a través de los siguientes medios:

- Convección gas-partícula.
- Conducción pared-partícula.
- Calentamiento electromagnético de la biomasa.

- Transferencia de calor partícula-partícula.
- Transferencia de calor líquido-partícula.

Basándose en el modelo de calentamiento, los rectores de torrefacción se pueden dividir en: calentamiento directo o indirecto.

En los reactores de calentamiento directo, la biomasa se calienta directamente mediante un medio portador de calor, y el calor se intercambia a través del contacto directo entre la biomasa y el portador de calor. El portador de calor puede ser un gas caliente sin oxígeno o uno con cantidad limitada de oxígeno. También pueden ser sólidos no reactivos calientes o fluidos calientes como agua a presión, vapor o aceite residual.

En los reactores de calentamiento indirecto, el medio portador de calor no entra en contacto con la biomasa directamente. El calor se transporta a través de una pared o mediante radiación electromagnética. Por lo tanto, es relativamente fácil evitar el contacto con el oxígeno y, por ende, evitar una combustión no deseada durante la torrefacción. Estos reactores tienen dos ventajas principales: primero, que el fluido y el medio de calentamiento pueden ser algo más calientes, y segundo, que los volátiles liberados durante la torrefacción no se diluyen por el medio de calentamiento que lo atraviesa. De esta manera, el producto gaseoso de la torrefacción se puede quemar por separado para complementar la carga térmica del reactor.

Ejemplos de reactores de calentamiento directo son: reactor convectivo (lecho fijo, lecho móvil, flujo arrastrado), lecho fluidizado y reactor hidrotermal; de calentamiento indirecto son: de tambor rotatorio, de tornillo o eje estacionario y microondas (Basu et al., 2013; Devaraja et al., 2022).

- Reactor de lecho fijo. Este tipo de reactor presenta una construcción sencilla, en la que el lecho de biomasa cruda se somete a torrefacción dentro del reactor. El proceso se realiza mediante el suministro de calor, utilizando un horno que opera en una atmósfera inerte, sin oxígeno o con bajo contenido de oxígeno, durante un tiempo de residencia determinado. Una vez que el proceso de torrefacción ha concluido y el reactor se ha enfriado, el material torrefactado se extrae por la parte inferior del reactor.

- Reactor de lecho móvil (Figura 13). La biomasa se alimenta desde la parte superior y cuando entra en contacto con la superficie caliente, el calor se transfiere por conducción debido a las partículas calientes en movimiento y la convección forzada a través de los gases calientes. La biomasa se mueve dentro del reactor de torrefacción ya sea mecánicamente mediante el uso de tornillos sin fin horizontales, de tipo ablativo vertical y un mecanismo giratorio sobre paredes, discos, etc., calentados eléctricamente, o utilizando la gravedad como en un horno de solera múltiple, un secador turbo, y un sistema móvil de lecho móvil.

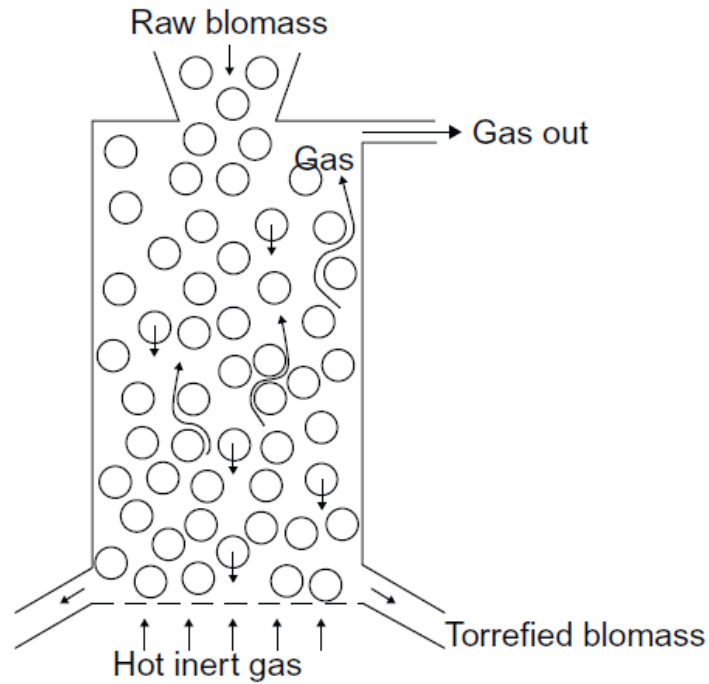


Figura 13. Esquema de un reactor de lecho móvil. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.

- Reactor de flujo arrastrado. La biomasa molida se arrastra en un chorro de gas caliente de alta velocidad y se calientan a una temperatura más alta hasta 350°C durante un tiempo de residencia relativamente muy corto (10-120 s) similar al de un pirolizador rápido.
- Reactor de lecho fluidizado (Figura 14). La biomasa se mueve usando gases inertes calientes en un lecho compuesto por un sólido inerte, como arena o pequeñas bolas de cerámica. Cuando se soplan estos gases, las partículas con arena se mueven a cierta altura específica, determinada por la velocidad mínima de fluidización, y luego vuelven a caer en la mezcla a granel. Este proceso asegura una distribución uniforme de la temperatura a lo largo del lecho. Algunos de los tipos de reactores de lecho fluidizado son lechos cónicos, lechos fluidos burbujeantes y lechos fluidizados de circulación externa o interna.

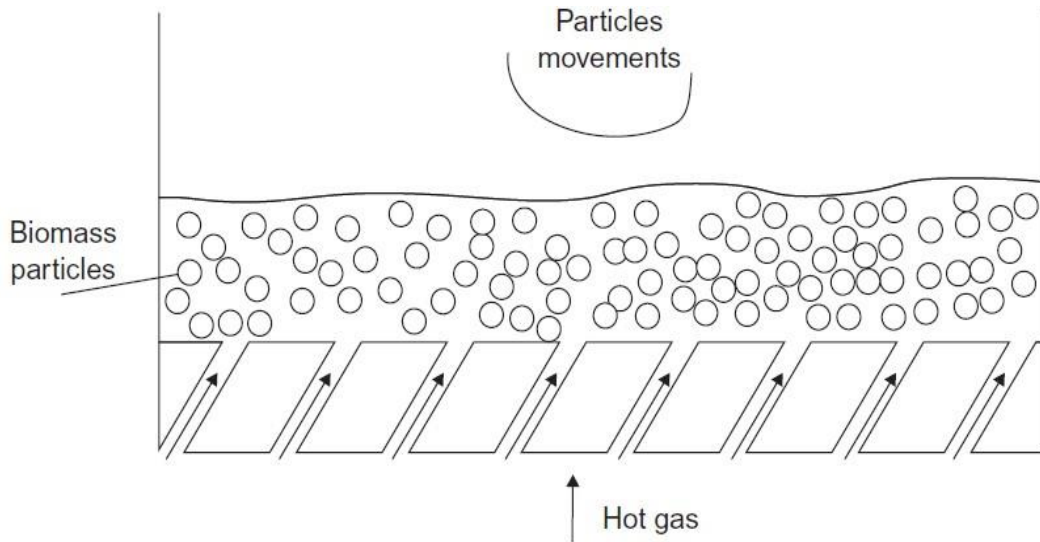


Figura 14. Sección de un reactor de lecho fluidizado. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.

- Reactor hidrotermal. La biomasa se somete a una reacción con agua o acetona a alta temperatura y alta presión para despolimerizarla en compuestos más pequeños. Durante este proceso, los compuestos volátiles se liberan, dejando el biocombustible como una fase separada. Este material densificado al secarse tiene un alto poder calorífico en comparación con el producto obtenido tras la torrefacción en seco. La ventaja de este proceso es que no se requiere secado previo.

- Reactor de tambor rotatorio (Figura 15). Las partículas de biomasa se calientan continuamente mediante dos mecanismos: el contacto directo con las paredes del tambor calentado, que proporciona un calentamiento externo indirecto, y el calor generado por los gases calientes o la combustión de los gases volátiles formados durante la torrefacción. La vibración (*tumbling*) se transfiere a las partículas a través de las aletas integradas en las paredes internas del reactor, lo que asegura una mezcla eficiente y un calentamiento uniforme.

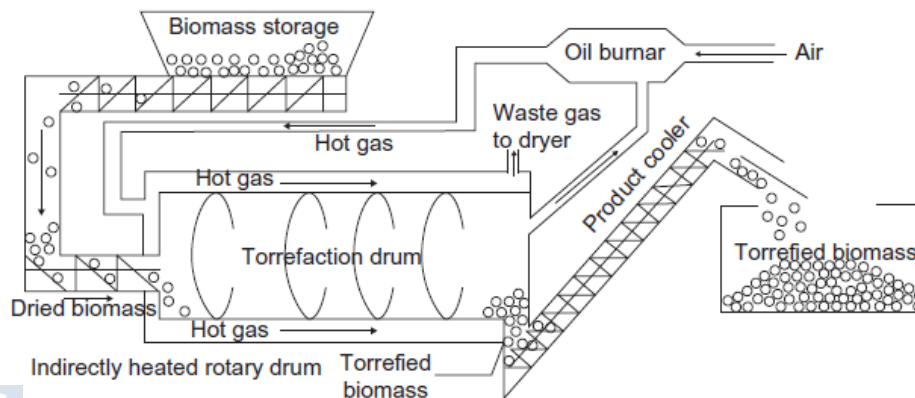


Figura 15. Esquema de un reactor de tambor rotatorio. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.

- Reactor de tornillo o eje estacionario (Figura 16). El reactor de torrefacción (circular o de sección transversal rectangular) es estacionario, y puede ser vertical, horizontal o inclinado. El reactor generalmente se calienta desde el exterior para evitar el contacto con los gases calientes, aunque algunos pueden tener orificios para permitir la salida de los productos de la torrefacción. El calor se transfiere a la biomasa principalmente por conducción a través de las paredes del reactor. Un tornillo giratorio agita y mueve la biomasa a través del reactor para mejorar la transferencia de calor entre la pared y la mayor parte de la biomasa, y al mismo tiempo mover la biomasa a lo largo de su longitud.

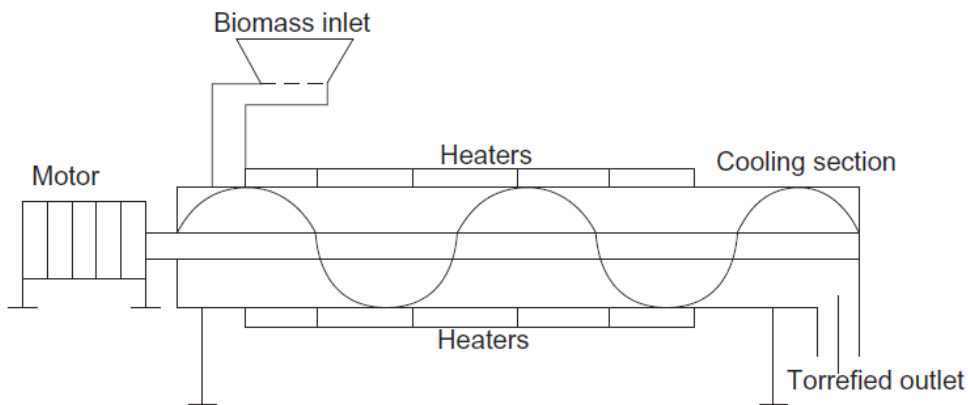


Figura 16. Esquema de un reactor de tornillo. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.

- Microondas (Figura 17). La biomasa se introduce en una cámara resonante de microondas de alta frecuencia de 2.4 GHz, donde las partículas se calientan induciendo fricción y oscilación molecular de alta frecuencia. Aunque existen ventajas como el calentamiento volumétrico, la no necesidad de un medio de calentamiento o un gas, la biomasa es un mal conductor térmico y es necesario un aditivo con una naturaleza más absorbente de microondas para mezclar con la alimentación.

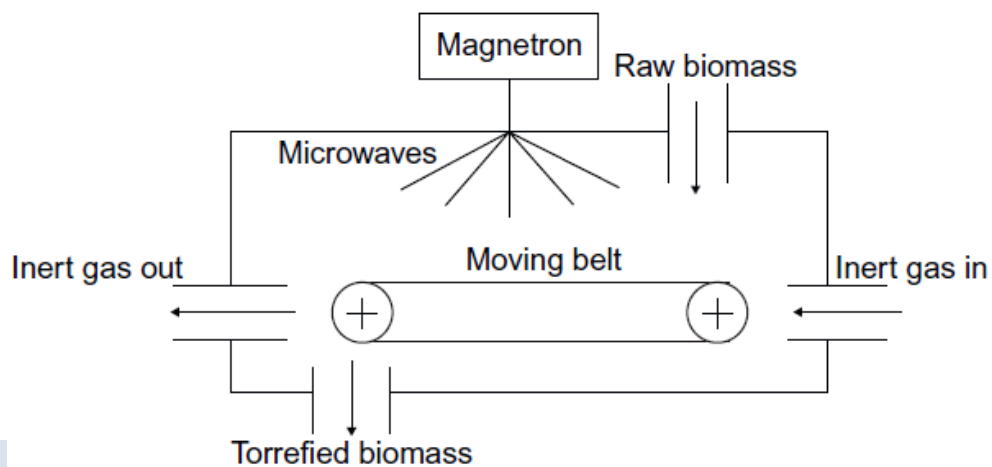


Figura 17. Esquema de un microondas. Fuente: Basu et al. (2013). Reproducción con autorización.

Según el modo de mezcla gas-sólido

En las plantas de procesamiento químico, los reactores a menudo se clasifican por modelo de contacto gas-sólido. Se pueden diferenciar cuatro grupos:

- Flujo de pistón. El gas se filtra a través de sólidos estáticos; tanto el gas como el sólido se mueven unidireccionalmente.
- Parcialmente mezclado. El gas se mueve en una sola dirección, pero los sólidos se mezclan parcialmente en dirección opuesta.
- Rotación. Los sólidos dan vueltas o se mueven dentro de un tambor o túnel cilíndrico.
- Arrastre. Los sólidos son transportados neumáticamente por una corriente de gas.

Cuando se habla de pellet torrefacto debe diferenciarse el proceso que se ha llevado a cabo para obtenerlo ya que hay dos caminos posibles para producir este biocombustible: torrefactar antes el material y después pelletizar (TOP); y torrefactar después de pelletizar (TAP).

El proceso TOP implica el secado de la astilla o serrín, la torrefacción, otra molienda (si fuera necesario) y la densificación. En cambio, en el proceso TAP se seca la astilla de madera, se reduce la granulometría del material, se densifica y finalmente se torrefacta.

Varios estudios han demostrado que los pellets TAP presentan mayor poder calorífico, mayor contenido de carbono y menor contenido en humedad, sin embargo, presentan peor durabilidad mecánica, dureza, densidad de pellet y densidad aparente que los pellets TOP.

Además, el proceso de producción de pellets TOP habitualmente necesita la adición de algún aglutinante como lignina, melaza o almidón, debido a la gran pérdida de humedad y estructura de la astilla en la torrefacción previa a la pelletización, haciendo que este proceso sea más complicado que utilizando biomasa sin tratamiento térmico. Por tanto, se trata de un proceso de producción más costoso.

En ambos procesos además de obtener un biocombustible con mejores propiedades energéticas que un pellet convencional, se puede aprovechar el calor extraído del proceso de torrefacción recirculando los gases calientes para el proceso de secado de la biomasa previo a la torrefacción.

El combustible obtenido a partir de biomasa torrefactada tiene una calidad muy alta que lo hace muy atractivo para aplicaciones de combustión y gasificación. Algunas otras aplicaciones son: combustible sólido de biomasa para centrales térmicas de generación de calor y electricidad, cocombustión en calderas pulverizadas, cogasificación en gasificador de flujo arrastrado, combustibles para

1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS

uso doméstico y comercial, pellets a pequeña escala calderas o estufas, y combustible de alta calidad para aplicaciones bioenergéticas avanzadas.

En la actualidad se están llevando varias puestas en marchas de diferentes proyectos de pellets torrefactos a nivel industrial. Destaca la apuesta por la torrefacción en Estados Unidos y Canadá con grandes producciones anuales de biocombustibles torrefactos, seguido por países europeos como Portugal, Austria, Bélgica, etc. (Wild and Calderón, 2021) (Figura 18).

Ubicación	Estado	Puesta en marcha	Capacidad nominal	Poder calorífico neto previsto	Forma del producto
Austria	Proyecto en operación	Desde 2013	8000 t/año	22-23 MJ kg ⁻¹	Briqueta 70 mm diámetro
Bélgica	Proyecto en operación	Pelletización a escala industrial esperada en 2022	Polvo 30000 t/año, pellets 150 kg/h	Polvo 22-28 MJ kg ⁻¹ Pellets 21 MJ kg ⁻¹	Polvo (producción general), Pellets (solo para pruebas)
Estonia	Proyecto en construcción	Cuarto trimestre en 2020	157000 t/año	21 MJ kg ⁻¹	Pellet
Finlandia	Proyecto en negociación final	2023	60000 t/año	22-23 MJ kg ⁻¹	Briqueta 70 mm diámetro
Irlanda	Proyecto en operación	-	10500 t/año	-	-
Portugal	Proyecto en operación (aún no a plena capacidad)	Cuarto trimestre de 2020	120000 t/año pellets negros, 80000 t/año pellets blancos	18-22 MJ kg ⁻¹	Pellet
Portugal	Proyecto en construcción	2020	110000 t/año	22 MJ kg ⁻¹	Astilla y pellet
Reino Unido	Proyecto en operación	-	30000 t/año	21 MJ kg ⁻¹	Pellet
Rusia	Proyecto en fase de permisos	Cuarto trimestre de 2021	2 x 40000 t/año	21-25 MJ kg ⁻¹	Pellet
Canadá (Columbia Británica)	Proyecto en fase de permisos	Primer trimestre de 2021	100000 t/año	21 MJ kg ⁻¹	Pellet
Canadá (Quebec)	Proyecto en operación	2016	15000 t/año	21 MJ kg ⁻¹	Pellet
Estados Unidos	Proyecto en operación	2012	75000 t/año	25-30 MJ kg ⁻¹	Pellet
Estados Unidos	Proyecto en fase de permisos	2022	400000 t/año	25-30 MJ kg ⁻¹	Pellet
Estados Unidos (Luisiana)	Proyecto en operación	2017	16000 t/año	19 MJ kg ⁻¹	Pellet y briqueta
Estados Unidos (Oregón)	Proyecto en operación	2019	90000 t/año	21-22.5 MJ kg ⁻¹	Pellet y briqueta
Estados Unidos	Proyecto en construcción	Tercer trimestre de 2021	125000 t/año	30 MJ kg ⁻¹	Pellet y briqueta
Estados Unidos (Oregón)	Proyecto en construcción	-	100000 t/año	-	Briqueta
Indonesia	Proyecto en negociación final	Primer trimestre de 2021	80000 t/año	21 MJ kg ⁻¹	Pellet y briqueta
Tailandia	Proyecto en desarrollo	Tercer trimestre de 2020	15000 t/año	20 MJ kg ⁻¹	Pellet
Etiopía	Proyecto en operación final	2023	60000 t/año	22-23 MJ kg ⁻¹	Briqueta 70 mm diámetro

Figura 18. Proyectos de biomasa torrefacta a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia.

1.6 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar las propiedades químicas, físicas y energéticas de pellet de pino y de mezclas de pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus nitens*) en dos proporciones con presencia creciente de eucalipto y considerando tanto pellet sin torrefactar como pellet torrefacto, bien con torrefacción previa o posterior a la pelletización.

De forma más concreta, los objetivos específicos que se pretenden alcanzar son:

- Caracterizar el material de partida, astilla de pino y de eucalipto, como biocombustible de uso térmico doméstico, a partir de sus propiedades energéticas.
- Producir pellet de mezcla con proporción de eucalipto del 10 y del 40 % en masa, evaluando los parámetros adecuados en pelletizadora de laboratorio.
- Evaluar las propiedades químicas, físicas y energéticas del pellet puro de pino y el pellet de mezcla, tanto en crudo como torrefactado a distintos niveles de severidad.
- Producir pellet de astilla torrefactada a un nivel concreto de severidad, tanto de pino puro como de mezcla, evaluando las propiedades químicas, físicas y energéticas de los mismos.
- Evaluar las posibles opciones de utilización de esos productos con aplicación de las normas de calidad de biocombustibles sólidos, tanto en formato de astilla como de densificado, sin y con tratamiento térmico.

2. POTENCIAL DE LA ASTILLA DE *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*

RESUMEN

El uso extendido del pino como materia prima para la producción de pellets en España ha generado una problemática que es la gran demanda y elevados precios de esta especie arbórea para su empleo en diferentes sectores. En este trabajo se pretende comparar las propiedades físico-químicas, energéticas y mecánicas de la astilla de *Pinus radiata* y la de *Eucalyptus nitens*, y así poder determinar su potencial para uso directamente como biocombustible o para su pelletización. Los análisis de las diferentes propiedades fueron realizados siguiendo la normativa UNE-EN ISO 17225-4:2021. Los resultados del pino presentan un poder calorífico bruto mayor (19.16 MJ kg^{-1}) frente al eucalipto (18.95 MJ kg^{-1}), sin embargo, la madera de eucalipto presenta menor contenido de cenizas frente a la madera de pino.

2.1 Introducción

El abanico de biocombustibles sólidos que se emplean para producción de energía térmica y/o eléctrica en los ámbitos doméstico e industrial en España es muy amplio y comprende las leñas, las astillas de madera, el hueso de aceituna, la cáscara de almendra, los densificados (pélets y briquetas) o el carbón vegetal, entre otros. Para instalaciones térmicas de redes de calor, calderas de biomasa o estufas, se emplean esencialmente el hueso de aceituna, las astillas de madera y los pellets, dadas las mejores posibilidades de estandarización del combustible y automatización de las instalaciones, particularmente en el caso de los pellets (IDEA, 2009). La Figura 19 es representativa de la relevancia de estos tres biocombustibles en cuanto a la capacidad de producción en la Península Ibérica.

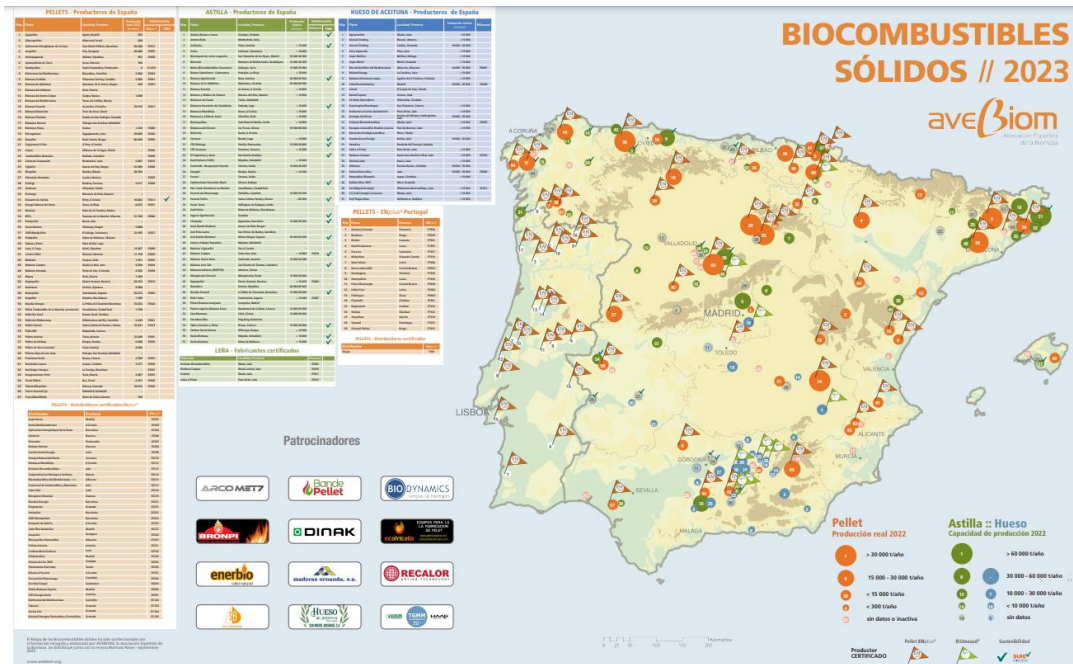


Figura 19. Actualización del mapa de biocombustibles sólidos en el año 2023. Fuente: AVEBIOM. Reproducción con autorización.

La astilla de madera es el biocombustible de elección para instalaciones térmicas de mayor potencia (superior a 100-150 kW de potencia) en forma de redes de calor, en las que existen posibles ubicaciones para instalar depósitos de almacenamiento, ya que el volumen ocupado por la astilla es típicamente 3 veces superior al de los biocombustibles densificados.

El objetivo de las redes de calor (district heating en terminología anglosajona) es satisfacer de las necesidades de calor, principalmente calefacción y agua caliente sanitaria de un complejo urbano, pudiendo este componerse de edificios residenciales, fábricas, centros comerciales o edificaciones varias a través de la generación en uno o varios puntos específicos que posteriormente se distribuye. Idealmente, el calor procede de una fuente renovable como la biomasa o una combinación de fuentes o aprovecharse el calor residual obtenido como excedente de alguna actividad industrial (Lund et al., 2014).

A nivel gallego el INEGA ha fomentado de forma relevante el uso de la biomasa en base a ayudas que en 2023 ascendieron a 55 M€, con líneas que atienden a la instalación de renovables térmicas en la industria (consumiendo en este caso astilla industrial), redes de calor en el sector residencial o planificación energética de entidades locales y comunidades energéticas. Actualmente, de la producción de energía primaria autóctona gallega, la biomasa contribuye con un 33.1 % al total de fuentes renovables, siendo claramente líder en el ámbito de la energía térmica (Rodríguez., 2024).



Un ejemplo de proyecto de reciente aprobación es la red de calor del Campus de Lugo de la USC, que corresponde a una inversión de 4.6 M€, de los que 2.5 M€ es inversión directa de IDAE. La instalación contará de 5 calderas de 1 MW, dos

depósitos de astilla de fondo móvil y una producción de energía térmica de 9700 MWh.

La astilla para uso doméstico es por lo tanto un biocombustible de posible uso directo, pero a la vez resulta una de las materias primas esenciales para la fabricación de pellets. A nivel gallego, salvo algunos aserraderos que fabrican pellet a partir del serrín generado como subproducto, la mayor parte de los pellets se producen a partir de astilla de pino. El porcentaje de esta biomasa ronda entre el 90-100 % de la composición del pellet final. Actualmente no se emplea de forma comercial astilla de eucalipto para la fabricación de pellets.

La norma europea de cumplimiento para la comercialización de astillas de uso doméstico (aplicaciones en edificios residenciales, edificios comerciales pequeños y edificios públicos) es la UNE-EN ISO 17225-4:2021. Su objetivo es proporcionar principios claros que permitan el comercio eficiente, el buen entendimiento entre comprador y vendedor y una herramienta para la comunicación con los fabricantes de equipos. También facilitan los procedimientos de autorización administrativa y de elaboración de informes.

El único sistema de certificación por tercera parte independiente que se aplica a la astilla de uso térmico doméstico es el SURE, que ha desarrollado REDcert (empresa alemana con experiencia en la certificación de sostenibilidad de biocarburantes) y Bioenergy Europe. Un total de 18 empresas, 3 de ellas en Galicia, contaban con este sistema de certificación en 2023.

En este capítulo se pretenden comparar las propiedades de la astilla de pino radiata con la astilla de eucalipto nitens, con un objetivo doble:

- Comparar ambos materiales como biocombustibles de posible uso directo en instalaciones doméstica, considerando todas las propiedades estudiadas con las marcadas por la UNE-EN ISO 17225-4:2021.
- Caracterizar ambos materiales como materias primas que se emplearán en los siguientes capítulos para la fabricación de pellets de distinta composición.

2.2 Material y métodos

2.2.1 Materia prima

Las materias primas empleadas fueron astilla de pino y de eucalipto, la primera de ellas se obtuvo por aportación directa de una fábrica que emplea esta materia para la producción de pellets, mediante descortezado de troncos y astillado en la propia planta de la rolla descortezada. La granulometría de la astilla es P31S, lo que indica que la fracción principal (mínimo 60 % en masa) presenta partículas inferiores a 3.15 cm.

La astilla de eucalipto nitens se obtuvo a partir de madera de eucalipto procedente de una plantación de 12 años de edad en forma de troncos de 12-15 cm de diámetro que se descortezaron manualmente en el laboratorio.

Tras el descortezado de las trozas, estas se astillaron empleando una biotrituradora Greenmech Arborist 130 con una potencia de 17.15 kW, una productividad de 3 t h^{-1} y un sistema de trituración de 4 cuchillas dispuestas en disco. El astillado permitió obtener 50 kg de material de eucalipto, con una granulometría que permitiría clasificar el material como P31S. Lógicamente este material tuvo que molerse posteriormente para abordar la pelletización, aunque ese proceso se describirá en el siguiente apartado.



Figura 20. Madera de eucalipto con corteza. Fuente: Elaboración propia.

2. POTENCIAL DE LA ASTILLA DE *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*



Figura 21. Madera de eucalipto descortezada. Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Biotrituradora Greenmech Arborist 130. Fuente: Elaboración propia.

2. POTENCIAL DE LA ASTILLA DE *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*



Figura 23. Astilla de eucalipto sin corteza. Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Astilla de pino sin corteza. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Caracterización y análisis de las astillas

La cantidad total de muestra de astilla manejada fue de 100 kg en cada especie.

Las muestras de astilla se secaron en un horno de convección a 105 °C durante 24 h para posteriormente medir propiedades en base seca. Se determinó el contenido de humedad en base húmeda (CH) midiendo el peso inicial de la muestra y el peso final tras el proceso de secado (UNE-EN ISO 18134-1). El contenido de cenizas (A, % en base seca) se determinó tras la combustión a 550 °C según UNE-EN ISO 18122. La materia volátil (MV, %, base seca) se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18123 mediante la calcinación de las muestras en una mufla a 900 °C. El carbono fijado (CF, %, base seca) se obtuvo mediante la diferencia de los contenidos de cenizas y volátiles.

También se determinó la composición elemental para todos los torrefactos y las muestras de control para posteriormente calcular el poder calorífico inferior (neto) en base húmeda. Esta parte analítica se realizó en los Servicios Generales de Apoyo a la Investigación de la USC. Los contenidos de N, C, H y S fueron analizados por combustión en un analizador elemental LECO (modelo Truspec) siguiendo las normas UNE-EN ISO 16948 y UNE-EN ISO 16994. El contenido de oxígeno se calculó por diferencia, con la ecuación 1. Todos los elementos se determinaron en base seca.

$$O = 100 - C - N - H - S - A \quad (1)$$

Las muestras de astillas fueron molidas a una dimensión de partícula inferior a 1 mm y digeridas con HNO₃, HF y H₂O₂ en un horno microondas y las concentraciones de B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn se determinaron mediante ICP-MS (UNE-EN ISO 16967 y UNE-EN ISO 16968).

El poder calorífico superior (tal como se recibió o en base húmeda) (PCS_h) se determinó experimentalmente mediante la combustión de 0.5 g de muestra en un calorímetro de combustión (IKA C5000, Figura 25), bajo una atmósfera de oxígeno (30 bar), siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125. El poder calorífico superior en base seca (PCS₀) se calculó utilizando la ecuación 2:

$$PCS_0 = PCS_h \frac{100}{100 - CH} \quad (2)$$



Figura 25. Calorímetro IKA C5000. Fuente: Elaboración propia.

La humedad para su posterior pelletización fue de entorno al 10-12 % sin embargo para los análisis de las propiedades de esta excepto en el caso de propiedades mecánicas se redujo su humedad al 0 % y su tamaño (<0.5 mm) para estudiar las propiedades en base seca.

También se calcularon los poderes caloríficos inferiores en base seca y húmeda.

$$PCI_0 = PCS_0 - 212.2 H - 0.8 (O + N) \quad (3)$$

$$PCI_h = [PCI_0 (1 - 0.01 CH)] - 24.43 CH \quad (4)$$

La densidad a granel (BD) de la muestra en base húmeda se determinó siguiendo la normativa UNE-EN ISO 17828 introduciendo la muestra en un cilindro y dando golpes para ir rellenando el cilindro y cubriendo los huecos que pueden ir dejando la muestra y pesando finalmente el conjunto, determinando la BD.

Por último, se determina la densidad energética (ED) a partir del producto de la densidad a granel y el poder calorífico inferior en base húmeda.

2.2.3 Análisis estadístico

Los datos fueron procesados para determinar las medias y las varianzas. Se usó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar cualquier cambio significativo en las propiedades de las astillas.

La clasificación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey para determinar todas las diferencias posibles entre las muestras. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson para evaluar las relaciones entre variables. Los resultados de la prueba se consideraron significativos cuando $p < 0.05$. Todos los análisis se realizaron utilizando Rstudio.

2.3 Resultados y discusión

Los valores medios (y desviaciones estándar) obtenidos en el análisis inmediato y los poderes caloríficos brutos (en base seca) y las concentraciones de los elementos más importantes para la materia prima utilizada para fabricar los pellets se muestran en la Tablas 1 y 2.

El contenido de humedad presentó diferencias significativas entre la astilla de pino y eucalipto, con un resultado mayor en la segunda. Esto influye negativamente en el poder calorífico neto de la astilla.

No se encontraron diferencias significativas en las variables determinadas en el análisis inmediato (cenizas, carbono fijo y volátiles). Sin embargo, las astillas de pino poseen un poder calorífico anhidro, que fue 0.2 MJ kg^{-1} mayor que el producido por las astillas de eucalipto.

En cuanto a composición elemental, se observaron diferencias significativas ($p < 0.001$) en las concentraciones de Cl, Na y K, las cuales fueron mayores (al menos 65 %) en las astillas de eucalipto que en las de pino. También se observaron diferencias en otros elementos como el Si, Fe, Mn, Ca, Al y H.

La densidad aparente de la astilla de eucalipto es mayor a la de pino, desencadenando que la densidad energética también sea superior debido a que, en este caso, la influencia de la BD es mayor a la del PCI_h .

Tabla 1. Análisis inmediato, poderes caloríficos y propiedades mecánicas de las astillas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades	Astilla de pino	Astilla de eucalipto
Cenizas (%)	0.65 (0.02) a	0.59 (0.03) a
Volátiles (%)	84.44 (0.18) a	84.23 (0.08) a
Carbono fijo (%)	14.91 (0.16) a	15.18 (0.07) a
CH (%)	15.11 (0.13) b	16.33 (0.10) a
PCS_0 (MJ kg^{-1})	19.16 (0.08) a	18.95 (0.04) b
PCI_h (MJ kg^{-1})	14.70 (0.07) a	14.29 (0.03) b
BD (kg m^{-3})	179 (2) b	195 (3) a
ED (kWh m^{-3})	728.8 (4) b	775.0 (2) a

2 . POTENCIAL DE LA ASTILLA DE *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*

Tabla 2. Análisis elemental de las astillas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades	Astilla de pino	Astilla de eucalipto
N (%)	0.31 (0.02) a	0.31 (0.03) a
C (%)	47.44 (0.21) a	47.24 (0.19) a
H (%)	6.48 (0.03) a	6.41 (0.02) b
S (%)	0.030 (0.004) a	0.030 (0.004) a
O (%)	45.09 (0.23) a	45.42 (0.24) a
Cl (%)	0.022 (0.003) b	0.036 (<0.001) a
B (mg kg ⁻¹)	2.37 (0.20) a	2.20 (0.08) a
Na (mg kg ⁻¹)	55.5 (0.54) b	229.3 (18.59) a
Mg (mg kg ⁻¹)	276.91 (7.14) a	291.09 (30.72) a
Al (mg kg ⁻¹)	145.30 (3.04) a	15.45 (0.84) b
Si (mg kg ⁻¹)	217.32 (10.46) a	25.09 (6.47) b
P (mg kg ⁻¹)	115.94 (1.86) a	108.86 (13.89) a
K (mg kg ⁻¹)	805.2 (13.9) b	1331.0 (84.2) a
Ca (mg kg ⁻¹)	1067.72 (75.91) a	565.62 (78.57) b
Mn (mg kg ⁻¹)	72.57 (2.29) a	14.34 (1.48) b
Fe (mg kg ⁻¹)	161.79 (2.00) a	26.21 (7.79) b
Cu (mg kg ⁻¹)	3.11 (0.32) a	1.05 (0.09) b
Zn (mg kg ⁻¹)	18.34 (0.44) a	4.59 (0.15) b

La normativa relativa a la clasificación de astillas (UNE-EN ISO 17225-4) indica límites para N, S y Cl solo en las astillas de la categoría B debido a que se admiten orígenes y fuentes más diversos que en la categoría A. Ninguna de las muestras supera los límites indicados, quedando para N y S en el entorno del 30 % de los límites. Sin embargo, en el caso del Cl, la astilla de pino queda a un 44 % del máximo de 0.05 % permitido, mientras que la astilla de eucalipto llega a un nivel del 72 % de ese máximo admisible.

En cualquier caso, de las cuatro categorías de clasificación de las astillas de madera (A1, A2, B1 y B2), las empleadas en este estudio cumplen en ambos casos para clasificarse como A1: $A \leq 1.2$ %, $CH \leq 25$ % y $BD \geq 150$ kg m⁻³. Los resultados demuestran la posibilidad de emplear astilla de eucalipto nitens para aplicaciones térmicas domésticas, destino que puede resultar relevante dada la progresiva relevancia de esta especie en las cortas de madera de Galicia.

Los resultados del análisis de muestras de astilla descortezada indican una buena aptitud para su uso térmico doméstico, ya que la astilla de ambas especies podría

clasificarse en la categoría A1, la de mayor calidad. Este resultado deriva sin duda de que el origen del material sería, en aplicación de la norma UNE-EN ISO 17225-1, la categoría 1.1.3.3. (fuste de frondosas sin corteza) para el caso de *E. nitens* y 1.1.3.4. (fuste de coníferas sin corteza) en el caso de pino radiata.

La comercialización actual de astilla para uso térmico doméstico supone a nivel de Galicia una parte de la actividad de al menos 8 empresas ligadas al sector maderero (AVEBIOM, 2023), que tienen capacidad de suministrar unas 80000 t/año de astilla de pino y frondosa autóctona, en su inmensa mayoría no descortezada previamente (Solla, com. per.). Posiblemente solo en el caso de astillado de costeros de aserradero se obtendría astilla de madera previamente descortezada.

En el proceso de producción de las fábricas de pellets en España es habitual, en caso de que la materia prima se adquiera en forma de rolla, aplicar un descortezado previo mediante descortezadora de tambor. El proceso tiene un coste, pero da lugar a astilla de pino descortezada, materia prima óptima para pelletizar, empleándose en paralelo la corteza obtenida para producir energía térmica para el secado de la propia astilla.

Estudios previos indican las diferencias de propiedades energéticas entre la astilla sin descortezar y la descortezada, con tendencia evidente a incrementos del porcentaje de cenizas tanto en coníferas como en frondosas (Vusić et al., 2021). Estos autores indican también una mayor facilidad para pérdida de humedad de la astilla descortezada, tanto en *Abies alba-Picea abies* (mezcla de abeto y picea) como en *Fagus sylvatica* (haya), si bien la mayoría de los lotes cumplieron los estándares, aún en el caso de astilla sin descortezar.

En el mercado español no se emplea para uso térmico doméstico la astilla de eucalipto (ninguna de las especies), habiendo establecido algunos fabricantes de equipos recomendaciones específicas de no utilización, que se basan en los niveles altos de cloro reportados en la literatura (Keipi et al., 2014). Los niveles de cloro en la biomasa dependen lógicamente de las fracciones muestreadas (para restos de corta resulta imposible procesos de descortezado) (Spinelli et al., 2011) y también de la propia edad del arbolado. Los resultados de esta tesis indican sin embargo que la astilla de madera descortezada de *Eucalyptus nitens* obtenida de troncos de 15 años de edad cumpliría con los estándares.

La biomasa de eucalipto sí se emplea en usos industriales, incluso la astilla derivada específicamente de corteza. Para el caso de uso industrial, la norma de aplicación sería la UNE-EN ISO 17225-9, que establece unos límites mucho menos restrictivos para parámetros como la ceniza, el contenido de humedad o el contenido en Cl.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

RESUMEN

En esta parte del trabajo, se mezcló astilla descortezada de *Pinus radiata* con astilla también sin corteza de *Eucalyptus nitens* para producir pellets en tres proporciones diferentes: 100 % pino (100P), 90 % pino y 10 % eucalipto (90P/10E), y 60 % pino y 40 % eucalipto (60P/40E). Los pellets se torrefactaron en una mufla en una atmósfera con oxígeno limitado a diferentes temperaturas (210, 240, 270 y 300 °C) y tiempos de residencia (40 y 60 minutos) con el objetivo de mejorar y determinar sus propiedades energéticas y su composición elemental analizando 18 elementos diferentes.

3.1 Introducción

Los pellets que se fabrican en Europa para la generación de energía térmica para calefacción a nivel doméstica y para su uso en procesos agroindustriales son por lo general de biomasa lignocelulósica.

En el año 2019 el consumo de pellets en la Unión Europea fue de 27.7 millones de toneladas (Bioenergy Europe Statistical Report, 2020), tras la salida de Reino Unido de la UE el consumo en los dos años siguientes (2020 y 2021) pasó a ser de 19.7 (Bioenergy Europe Statistical Report, 2021) y 24.5 millones de toneladas (Bioenergy Europe Statistical Report, 2022) respectivamente. La producción de pellets en la Unión Europea en 2019, 2020 y 2021 fue de 17.8, 18.1 y 20 millones de toneladas respectivamente; los niveles de producción en esos tres años en España fueron de 0.714, 0.616 y 0.624 millones de toneladas (PELLETS, 2022).

La gran mayoría de fábricas producen pellets de alta calidad a partir de madera de pino descortezada, no obstante, existe un gran interés por su producción a partir de mezclas con otras especies alternativas, debido al aumento en la demanda del uso de madera pino en otros sectores como tableros y en la construcción. Los pellets de pino generalmente se clasifican como pellet A1 o I1, de acuerdo con la normativa europea UNE-EN ISO 17225-2 para uso a nivel doméstico e industrial respectivamente. En los estándares actuales también se consideran las categorías A2/I2 y B/I3. La composición química de los biocombustibles sólidos tiene una relación directa con el uso térmico y por tanto con las propiedades establecidas por los estándares. Además, uno de los aspectos más restrictivos de los estándares ISO es la composición elemental de la biomasa: los valores límite del cloro (0.02 %), azufre (0.04 %) y nitrógeno (0.3 %) están muy regulados y estudiados, debido a que

durante la combustión generarían elementos contaminantes que serían liberados a la atmósfera.

Durante el proceso de pelletización también se mejoran las propiedades energéticas, ya que los pellets mantienen ciertas características de la biomasa de la que proceden, tales como un bajo poder calorífico en relación con los combustibles fósiles y una alta higroscopicidad, propiedades que no son deseables en la generación de energía térmica. La importancia y los impactos de la composición elemental a la hora de su utilización para energía térmica se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Importancia y efectos de la composición elemental de los biocombustibles para su aprovechamiento térmico. FAP=partículas de cenizas volantes (elementos volátiles que forman aerosoles). Los límites de las normas se refieren al uso doméstico para las categorías A1, A2 y B. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Efectos	Límites UNE-EN ISO 17225-2 (%)	Referencias
N	Contaminante (NO _x)	$N \leq 0.3, \leq 0.5, \leq 1.0$	Nussbaumer (2003); UNE-EN ISO 17225-2
C	Aumento del poder calorífico		Obernberger et al. (2006)
H	Aumento del poder calorífico superior anhidro, disminuye el poder calorífico inferior en base húmeda		Obernberger et al. (2006)
S	Contaminante (SO _x). El sulfato contribuye a la formación de depósitos Corrosión. Formación de FAP	$S \leq 0.04, \leq 0.05, \leq 0.05$	Miles et al. (1996); Obernberger et al. (2006); UNE-EN ISO 17225-2. (2021)
O	Disminuye el poder calorífico		Obernberger et al. (2006)
Cl	Contaminante (HCl, PCDD/F). Contribuye a la formación de depósitos Corrosión. Formación de FAP	$Cl \leq 0.02, \leq 0.02, \leq 0.03$	Aho and Silvennoinen (2004); Miles et al. (1996); Obernberger et al. (2006); UNE-EN ISO 17225-2
B	Contaminante (H ₃ BO ₃ , B halógenos)		Park and Schlesinger (2002)
Ca, Mg	Formación de cenizas. Aumenta el punto de fusión de las cenizas.		van Loo and Koppejan (2012)
K	Formación de cenizas. Disminuye el punto de fusión de las cenizas. Riesgo de sinterización y escoria relacionado con álcali. Formación de sinterización cuando se combina con Si. Formación de FAP		van Loo and Koppejan (2012); Miles et al. (1996); Obernberger et al. (2006)

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

Na	Formación de cenizas. Disminuye el punto de fusión de las cenizas. Riesgo de sinterización y escoria relacionado con álcali. Corrosión. Formación de FAP		Miles et al. (1996); Obernberger et al. (2006)
Si	Formación de cenizas. Formación de sinterización cuando se combina con K		Obernberger et al. (2006)
Al	Formación de cenizas. Puede prevenir la sinterización y los depósitos de cloro		Aho and Silvennoinen (2004)
Cu	Formación de cenizas. Contaminante del suelo para reciclaje de cenizas	Cu ≤ 10 ppm	UNE-EN ISO 17225-2
Zn	Formación de cenizas. Escoria. Contaminante del suelo para reciclaje de cenizas. FAP	Zn ≤ 100 ppm	Obernberger et al. (2006); UNE-EN ISO 17225-2
P, Fe	Formación de cenizas		Obernberger et al. (2006)
Mn	Menor no volátil, formación de cenizas		Obernberger et al. (2006)

En este capítulo se van a estudiar todas las propiedades energéticas, físico-químicas y mecánicas de pellets de madera de pino puro y pino mezclado con eucalipto, en su estado natural (pellet crudo) o posteriormente torrefactados a diferentes temperaturas y tiempos de residencia. Los pellets de control se analizarán según el estándar de la UNE-EN ISO 17225-2 y los pellets torrefactos con la UNE-EN ISO 17225-8.

3.2 Material y métodos

3.2.1 Biomasa

Las muestras utilizadas en esta parte del estudio son pellets 100 % pino (100P), 90 % pino y 10 % eucalipto (90P/10E) y 60 % pino y 40 % eucalipto (60P/40E). La primera de las muestras se obtuvo de una fábrica de pellets de Galicia dedicada a la producción de biocombustibles a partir de madera descortezada de *Pinus radiata* (Figura 26). La fábrica emplea una pelletizadora de matriz anular con un canal de prensado de 42 mm de longitud. Las otras dos muestras se produjeron en una pelletizadora Amandus Kahl 14-175 en el laboratorio de biomasa de la Universidad de Santiago de Compostela con la misma astilla de *Pinus radiata* mezclada con madera descortezada de *Eucalyptus nitens*. De acuerdo con otros estudios de producción de pellets realizados, la astilla de eucalipto se molió, reduciéndose su granulometría a un tamaño igual o inferior a 4 mm (Figura 27), empleándose un molino de martillos. Previamente a pelletizar la astilla se secó hasta una humedad en basa húmeda de 10-12 %. Tras esto las mezclas de astillas se homogeneizaron

en una mezcladora de la casa Heidolph RZR2 durante aproximadamente una hora y media para asegurar un mezclado óptimo.



Figura 26. Serrín de pino. Fuente: Elaboración propia.



Figura 27. Serrín de eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

3.2.2 Proceso de pelletización

Los pellets se produjeron en una pelletizadora de matriz plana. Esta máquina dispone de dos rodillos de acero que fuerzan que las astilla entre a través de unos orificios cilíndricos de 6 mm de diámetro para formar pellets de una longitud de 20-22 cm. Debido al rozamiento entre la biomasa y la matriz la temperatura de la máquina aumenta hasta alcanzar una temperatura estable, sin exceder los 80 °C, para evitar el desgaste de piezas o problemas de mantenimiento en la pelletizadora. La temperatura durante el proceso de pelletización se mide con una sonda que toca la parte exterior de la matriz plana.

Para la producción de 5 kg de una clase de pellet se invierte 1 hora de tiempo debido a la complejidad de pelletizar madera de eucalipto y la necesidad de calentar la matriz. La tasa de producción de pellets fue de 10 kg h⁻¹ aproximadamente, invirtiéndose media hora en calentar poco a poco la matriz con astilla más húmeda para evitar su bloqueo. A 25 mm de la matriz se sitúan un par de cuchillas que cortan los cilindros que se van extruyendo por los orificios. Los pellets se recogen en un recipiente y se dejan enfriar a temperatura ambiente durante 48 horas para mejorar su durabilidad y reducir su contenido de humedad (García et al., 2019).

Los parámetros de operación para la producción de pellets (contenido de humedad, longitud del canal de la matriz y temperatura de trabajo) se establecieron en base a trabajos previos realizados con la misma pelletizadora de laboratorio (García et al. 2019, 2020; Lavergne et al. 2021) y adaptados a la problemática asociada con la densificación de madera de eucalipto.

Se dispuso de tres matrices con longitudes de canal de 33, 28 y 24 mm, lo que deriva en un rango amplio de relaciones de compresión, siempre manteniendo un diámetro de 6 mm (Figura 28). La matriz de 33 mm (relación de compresión 5.5:1) no resultó útil para la pelletización de ninguno de los materiales, ni siquiera en el caso del pino, por lo que únicamente podría resultar útil para densificar material lignocelulósico todavía más blando.

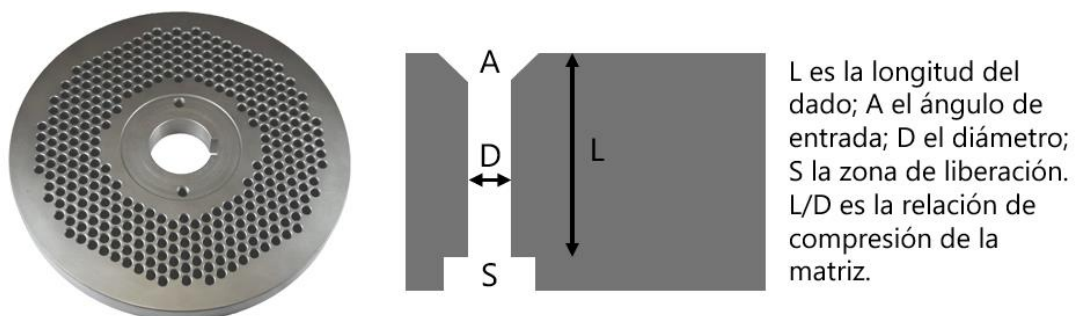


Figura 28. Esquema y dimensiones características de una matriz plana de pelletización. Fuente: Elaboración propia.

Una matriz de 28 mm de longitud de canal (relación de compresión 4.67:1) fue útil para la producción de la mezcla 90P/10E. Sin embargo, esta no se pudo utilizar con

la mezcla 60P/40E debido a que los cilindros se obstruían. Es por ello que se seleccionó una matriz de 24 mm (relación de compresión 4:1) para la mezcla que contenía mayor porcentaje de madera dura.

Esta necesaria adaptación del proceso deriva de la mayor dureza de la madera de *Eucalyptus nitens* en comparación con pino radiata. Si esa propiedad se evalúa con el ensayo de Janka perpendicular a la fibra, la fuerza de penetración necesaria es de 3789 N en muestras de *Eucalyptus nitens* procedentes de plantación (Millaniyage et al., 2022), mientras que para *Pinus radiata* el valor habitualmente considerado es de 3150 N.

En este estudio, se pelletizó con una temperatura media de 65 °C (rango entre 60-70 °C) y la biomasa a la entrada de la pelletizadora presentaba un contenido de humedad en base húmeda del 17-17.5 %. El contenido de humedad de la astilla se ajustó añadiendo agua destilada a la mezcla.

3.2.3 Proceso de torrefacción

Submuestras de 25 g de pellets se torrefactaron en una mufla (modelo J. P. SELECTA) a diferentes temperaturas (210, 240, 270 y 300 °C) y dos tiempos de residencia (40 y 60 minutos) en una atmósfera con oxígeno limitado. Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta la temperatura deseada a una ratio de calentamiento inferior a 15 °C/min. Tras la torrefacción, las muestras se enfriaron en un desecador con silica gel. Este proceso se reprodujo para las tres muestras por triplicado y con un total de 8 tratamientos por mezcla.

La masa de las muestras se registró antes de la torrefacción y después en todos los tratamientos para el cálculo del rendimiento másico (RM). Las muestras de control no se torrefactaron.

3.2.4 Análisis de las propiedades de los pellets

Las muestras de pellets se molieron para hacerlas pasar a través de un tamiz de 0.5 mm antes de realizar los análisis, que se realizaron siguiendo las normas UNE al igual que se hizo con las astillas en el capítulo 2. Añadiendo la determinación del porcentaje de finos (FI) y de la durabilidad mecánica (DU) según la UNE-EN ISO 5370 y la UNE-EN ISO 17831-1, respectivamente. El primer parámetro se mide pesando los pellets antes de pasarlos por un tamiz de 3.15 mm y pesándolos posteriormente; el segundo parámetro se obtiene introduciendo la muestra de pellets que se ha tamizado anteriormente en los dos cajones de los que dispone el durabilímetro (Figura 29). La velocidad de rotación es de 50 rpm y la duración de la prueba de 10 min. Después de la prueba, se extraen los pellets y se pasan por el tamiz de 3.15 mm y se pesan para determinar la durabilidad mecánica de la muestra.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP



Figura 29. Durabilímetro. Fuente: Elaboración propia.

Además, se calculó la relación de liberación de Cl mediante la ecuación 5:

$$R_{Cl}(\%) = \frac{m_{Clc} - m_{Cl_{torr}} * RM}{m_{Clc}} * 100 \quad (5)$$

Siendo m_{Clc} la masa de cloro en las muestras originales, $m_{Cl_{torr}}$ la masa en las muestras torrefactadas y RM el rendimiento másico.

El rendimiento energético de la torrefacción se calculó multiplicando el rendimiento másico por la relación del poder calorífico superior anhidro de la biomasa torrefactada y de la biomasa cruda.

Por último, se determinó el índice de álcali a partir de la composición de las cenizas (ecuación 6).

$$\text{ÁLCALI } (kg \text{ GJ}^{-1}) = \frac{(K_2O + Na_2O)}{PCS_0} \quad (6)$$

Siendo K_2O el contenido de óxido de potasio en las cenizas (tanto por 1), Na_2O el contenido de óxido de sodio y PCS_0 el poder calorífico superior de la biomasa.

3.2.5 Análisis estadístico

Los datos fueron procesados para determinar los valores medios y rangos de variación. Se utilizó un análisis de varianza de dos vías (ANOVA) para determinar cualquier cambio significativo en la composición elemental de los pellets de madera, según el siguiente modelo:

$$E_{i,j,k} = \mu + M_i + S_j + M * S_{i,j} + \varepsilon_{i,j,k} \quad (7)$$

donde $E_{i,j,k}$ es la variable observada, μ corresponde a la media general, M_i es el efecto de la mezcla, S_j el efecto de la severidad de torrefacción y $\varepsilon_{i,j,k}$ el error aleatorio.

Además, se estimaron las variables energéticas considerando la temperatura (T , °C) y el tiempo de residencia (t , min) mediante diversas combinaciones y transformaciones cuadráticas como variables predictivas. Se utilizó un modelo logístico (ecuación 8) para predecir las variables evaluadas como porcentajes (RM, A, CF y MV). Se utilizó un modelo cuadrático para predecir PCS_0 y PCI_h (ecuación 9). Sólo las variables explicativas asociadas a parámetros cuya estimación resultó significativa ($p < 0.05$) se mantuvieron en los modelos. Los modelos predictivos propuestos se utilizaron para construir gráficos de superficie de respuesta tridimensionales.

$$\hat{y} = \frac{100}{1 + e^{(a_0 + a_1T + a_2t + a_3Tt + a_4T^2)}} \quad (8)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1T + b_2t + b_3Tt + b_4T^2 \quad (9)$$

Para evaluar el buen ajuste de los modelos, se utilizó el valor del residuo medio (MRES) como medida de precisión (ecuación 10). Además, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (ecuación 11) y el R^2 ajustado (ecuación 13) se utilizaron para definir la precisión. Se representaron los valores previstos y observados para evaluar visualmente la exactitud y precisión de los modelos.

$$MRES = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (12)$$

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

$$Adj - R^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (13)$$

donde \hat{y}_i representan los datos estimados, y_i son los datos experimentales, \bar{y}_i el valor medio de y_i , n el tamaño de muestra y k el número de variables independientes.

La clasificación de las medias se realizó mediante la prueba de Tukey para examinar todas las diferencias posibles entre mezclas y severidades de torrefacción. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson para evaluar las relaciones entre variables. Los resultados de la prueba se consideraron significativos cuando $p < 0.05$. Todos los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico R.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Rendimiento másico

Los tratamientos de torrefacción y las diferentes mezclas afectaron significativamente el rendimiento másico ($p < 0.001$, Figura 30). El patrón de cambio en esta variable fue similar para las tres mezclas probadas. El límite de severidad de la torrefacción a partir del cual se produjeron cambios significativos en el rendimiento másico fue a partir de los 240 °C.

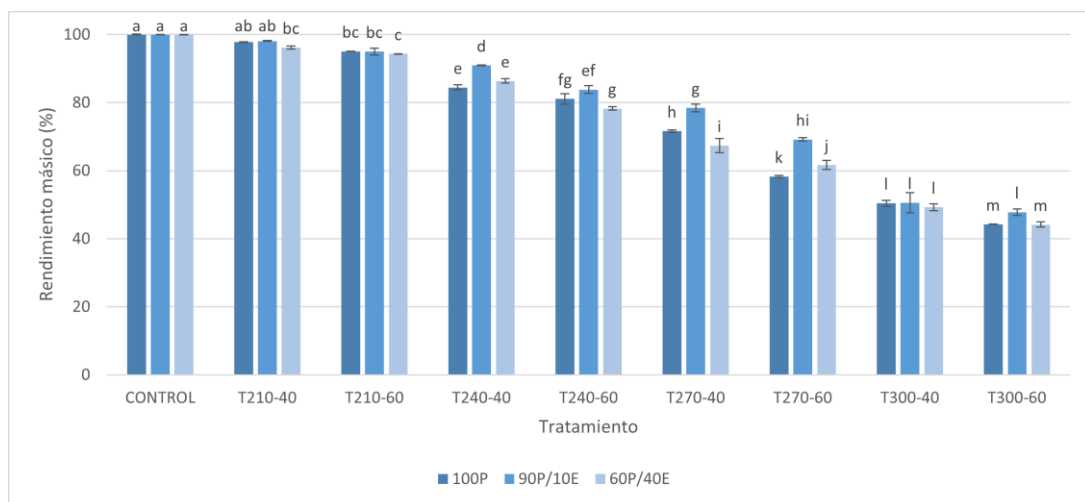


Figura 30. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del rendimiento másico en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

La pérdida de masa está directamente relacionada con la degradación de la hemicelulosa a temperaturas superiores a 200 °C (Bergman et al., 2005; Chen et al., 2021), proceso que afecta principalmente al aspecto exterior de los pellets y que está relacionado con los cambios de color. En cuanto al rendimiento másico, se observaron resultados similares para pellets torrefactos de otras especies para temperaturas y tiempos comparables a los del presente estudio.

3.3.2 Análisis inmediato

En cuanto al análisis inmediato, el contenido de cenizas, volátiles y carbono fijo se refleja en las Figuras 31 a 33. El ANOVA reveló efectos significativos ($p < 0.05$) de la

mezcla para la mayoría de las propiedades analizadas a medida que aumentó la temperatura y el tiempo de residencia.

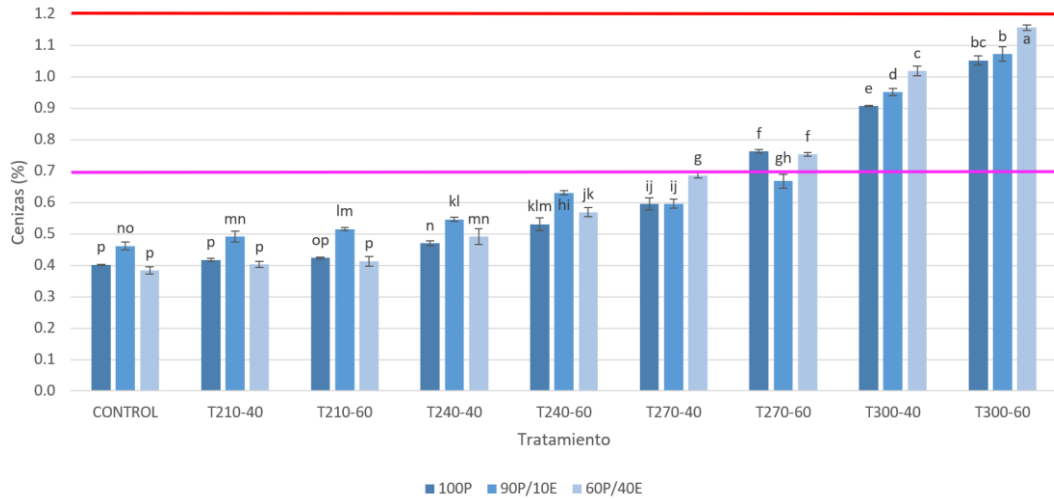


Figura 31. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de cenizas en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. La línea rosa marca el límite para los pellets según la UNE-EN ISO 17225-2 y la línea roja según la UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.

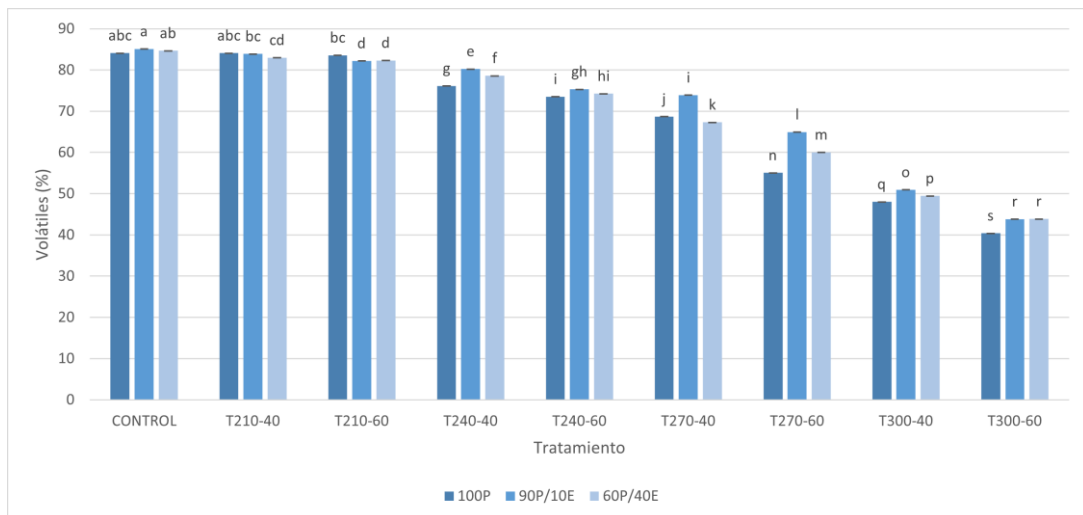


Figura 32. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de volátiles en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

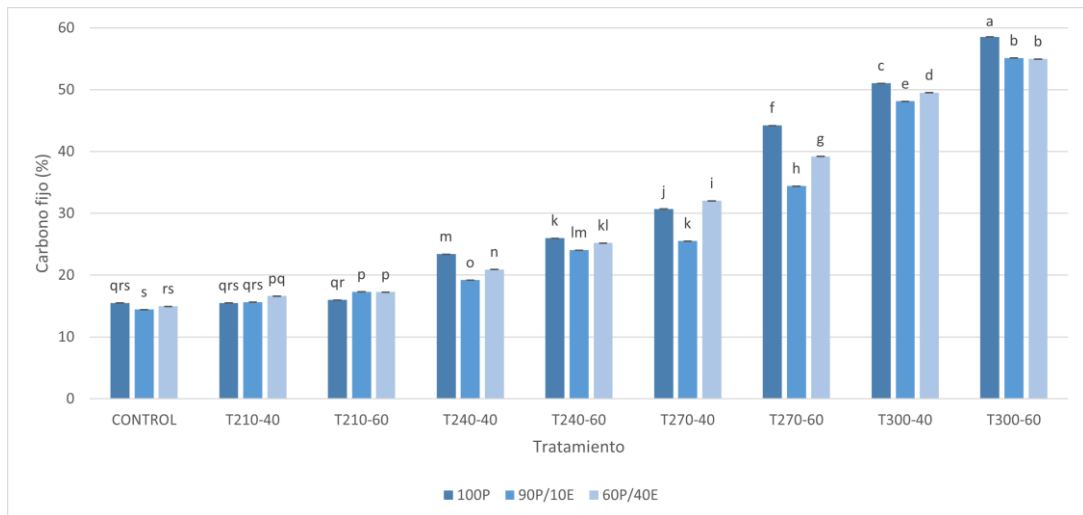


Figura 33. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de carbono fijo en base seca en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

Se observa un claro aumento del porcentaje de cenizas y de carbono fijo en las muestras a medida que la severidad es mayor y una clara disminución del contenido de volátiles. Estas variaciones en la composición de los pellets se deben a la carbonización de la muestra durante el proceso de torrefacción en la que las muestras toman un tono de color más oscuro (de marrón a negro).

El aumento en el porcentaje de cenizas se considera un efecto negativo debido a que es un parámetro muy restrictivo tanto para pellets de madera sin tratamiento térmico (UNE-EN ISO 17225-2) como para pellets tratados térmicamente (UNE-EN ISO 17225-8), el límite para el primer tipo de pellets es 0.7 % y para los segundos 1.2 %. Lo más importante en cuanto a este componente es la problemática que presenta por su acumulación en calderas y hornos ya que puede conllevar a problemas de *slagging* y *fouling* (formación de escoria y depósitos), generando si no se realiza un buen mantenimiento de las instalaciones problemas de desgaste y corrosión.

El descenso en el contenido de los volátiles se debe principalmente a la descomposición de las hemicelulosas contenidas en la biomasa, esta disminución conlleva un efecto positivo reduciendo las emisiones de partículas y dióxido de carbono, ya que un gran contenido de volátiles está directamente relacionado con una mayor emisión de partículas durante su combustión, peores procesos de gasificación, peores procesos térmicos, y mayores emisiones de dióxido de carbono.

Por último, el aumento en el carbono fijo de las muestras es positivo ya que mejora directamente las propiedades energéticas ya que como se comentará posteriormente, este mayor contenido en el contenido de carbono está ligado a un mayor poder calorífico, por tanto, se está obteniendo un biocombustible con mayor energía por kg de muestra.

3.3.3 Análisis elemental

En cuanto a la composición elemental, las concentraciones de los diferentes elementos se muestran en las Tablas 4, 5 y 6. El ANOVA declaró efectos significativos ($p < 0.05$) en la mezcla para la mayoría de los elementos analizados, siendo el patrón de variación particularmente claro para Na, K, Zn, B y Cl, cuyos valores aumentaron con el porcentaje de eucalipto. Considerando todos los niveles de severidad de las torrefacciones, las concentraciones de Na y K fueron 2.8 y 1.4 veces mayores para la mezcla 60P/40E en comparación con el pellet de pino puro (100P), respectivamente. El Zn presentó las diferencias más dramáticas, siendo 2.73 veces mayor si la mezcla es la de 40 % de eucalipto. Las diferencias para Cl y B fueron menos pronunciadas (35 y 13 %, respectivamente). Por otro lado, los valores de Mn fueron un 50 % más bajos en el caso del 100P en comparación con el 60P/40E.

Los niveles de Cl para los pellets fueron entre un 25 y un 50 % más bajos de lo que se podría esperar de la composición elemental de las astillas, lo que significa que se ha producido una reducción derivada de las temperaturas de pelletización. Aun así, el pellet crudo con mayor contenido en eucalipto (60P/40E) tiene niveles superiores al umbral de calidad A2 de la norma UNE-EN ISO-17225-2.

Tabla 4. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Tratamiento	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	Cl (%)
100P	CONTROL	0.20 (0.01) ab	48.4 (0.44) d	6.69 (0.03) a	0.029 (0.004)	44.3 (0.48) ab	0.013 (<0.001) a
	T210-40	0.15 (0.01) d	47.9 (0.19) d	6.53 (0.03) b	0.022 (0.004)	45.0 (0.18) a	0.011 (<0.001) b
	T210-60	0.14 (0.02) d	48.4 (0.09) d	6.46 (0.02) b	0.030 (0.005)	44.6 (0.09) ab	0.010 (<0.001) c
	T240-40	0.15 (0.01) d	51.6 (0.08) c	5.98 (0.02) c	0.021(0.004)	41.7 (0.10) bc	0.007 (<0.001) d
	T240-60	0.15 (0.01) d	52.4 (0.11) c	5.80 (0.02) d	0.019 (0.003)	41.1 (0.11) c	0.006 (<0.001) e
	T270-40	0.15 (<0.01) d	53.6 (0.68) c	5.59 (0.01) e	0.024 (0.006)	40.1 (0.68) c	0.005 (<0.001) f
	T270-60	0.17 (0.01) cd	54.2 (1.82) c	4.68 (0.04) f	0.019 (0.004)	40.2 (1.84) c	0.005 (<0.001) f
	T300-40	0.18 (<0.01) bc	58.6 (2.25) b	4.54 (0.09) g	0.032 (0.007)	35.8 (2.33) c	0.005 (<0.001) f
	T300-60	0.21(0.01) a	64.1 (0.19) a	4.05 (0.01) h	0.030 (0.007)	30.6 (0.18) c	0.005 (<0.001) f

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

90P/10E	CONTROL	0.26 (0.03) ab	47.5 (0.05) f	6.48 (0.02) a	0.025 (0.002)	45.2 (0.04) a	0.019 (<0.001) a
	T210-40	0.26 (0.03) ab	47.5 (0.02) f	6.42 (0.05) a	0.026 (0.002)	45.3 (0.04) a	0.015 (<0.001) b
	T210-60	0.18 (0.03) c	48.6 (0.05) ef	6.20 (0.05) b	0.026 (0.001)	44.5 (0.02) a	0.012 (<0.001) c
	T240-40	0.21 (0.01) abc	49.9 (0.13) de	6.10 (0.02) c	0.029 (0.003)	43.2 (0.15) ab	0.010 (<0.001) d
	T240-60	0.22 (0.02) abc	52.1 (0.02) cd	5.85 (0.01) d	0.029 (0.003)	41.2 (0.01) bc	0.006 (<0.001) e
	T270-40	0.20 (0.03) bc	53.0 (0.08) c	5.75 (0.02) e	0.026 (0.002)	40.4 (0.11) c	0.004 (<0.001) f
	T270-60	0.22 (0.03) abc	56.6 (0.06) b	5.39 (0.04) f	0.028 (0.003)	37.0 (0.07) d	0.004 (<0.001) f
	T300-40	0.25 (0.01) ab	60.7 (0.67) a	5.03 (0.01) g	0.031 (0.006)	33.0 (0.66) e	0.004 (<0.001) f
	T300-60	0.27 (0.02) a	62.5 (2.36) a	4.68 (0.01) h	0.031 (0.004)	31.5 (2.40) e	0.004 (<0.001) f
60P/40E	CONTROL	0.16 (0.02) cde	47.1 (0.26) e	6.45 (0.01) a	0.031 (0.001) a	45.9 (0.27) a	0.021 (<0.001) a
	T210-40	0.14 (<0.01) e	47.7 (0.07) e	6.25 (0.04) b	0.029 (0.001) ab	45.5 (0.08) a	0.017 (<0.001) b
	T210-60	0.18 (0.02) bcd	48.3 (0.10) e	6.20 (0.05) b	0.027 (0.001) abc	44.9 (0.15) a	0.015 (<0.001) c
	T240-40	0.16 (0.01) de	51.0 (0.11) d	5.95 (0.06) c	0.024 (0.004) bc	42.4 (0.15) b	0.010 (<0.001) d
	T240-60	0.16 (0.01) cde	52.2 (0.24) d	5.53 (0.02) d	0.022 (0.001) c	41.5 (0.27) b	0.006 (<0.001) e
	T270-40	0.20 (0.01) bc	55.8 (0.89) c	5.32 (0.04) e	0.024 (0.004) bc	37.9 (0.91) c	0.005 (<0.001) f
	T270-60	0.20 (0.01) bc	56.7 (0.68) c	4.90 (0.01) f	0.023 (0.002) c	37.5 (0.67) c	0.005 (<0.001) f
	T300-40	0.21 (0.02) ab	59.7 (1.06) b	4.48 (0.01) g	0.025 (0.002) bc	34.5 (1.09) d	0.005 (<0.001) f
	T300-60	0.24 (0.01) a	66.5 (0.92) a	3.95 (0.07) h	0.027 (0.003) abc	28.1 (0.90) e	0.005 (<0.001) f

Tabla 5. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Tratamiento	B (mg kg ⁻¹)	Ca (mg kg ⁻¹)	Mg (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Na (mg kg ⁻¹)	Si (mg kg ⁻¹)
100P	CONTROL	1.94 (0.04) e	527.5 (43.2) f	219.8 (22.1) e	675.9 (59.7) g	40.6 (3.8) f	190.7 (13.1) a
	T210-40	2.19 (0.15) de	626.4 (52.9) e	242.7 (15.1) e	733.8 (47.0) fg	51.2 (3.8) de	180.2 (4.5) ab
	T210-60	1.93 (0.03) e	569.4 (7.8) ef	234.6 (3.0) e	664.9 (4.2) g	40.9 (0.1) f	137.2 (7.7) cd
	T240-40	2.38 (0.08) cd	638.9 (14.9) e	254.6 (2.3) e	797.3 (6.5) ef	47.9 (0.2) ef	147.5 (6.1) bcd
	T240-60	2.49 (0.31) cd	743.7 (66.1) d	296.4 (27.9) d	876.1 (85.9) de	55.7 (5.3) d	126.4 (21.9) d
	T270-40	2.63 (0.16) c	787.5 (12.8) d	316.0 (3.8) d	951.0 (7.6) d	70.5 (1.4) c	121.3 (8.2) d
	T270-60	3.36 (0.20) b	905.2 (15.8) c	369.1 (0.6) c	1132.8 (7.5) c	69.8 (0.5) c	116.4 (0.9) bcd
	T300-40	3.60 (0.06) b	1084.7 (12.3) b	433.3 (6.3) b	1303.6 (18.4) b	79.6 (1.5) b	174.2 (23.5) abc
	T300-60	4.83 (0.02) a	1284.7 (18.5) a	508.3 (6.6) a	1520.7 (11.2) a	90.5 (0.6) a	156.0 (5.1) abcd

90P/10E	CONTROL	2.53 (0.42) de	856.4 (171.4) c	273.6 (51.9) de	924.6 (219.4) ef	74.5 (17.9) c	174.7 (69.9)
	T210-40	1.92 (0.47) e	830.7 (11.0) c	262.9 (4.5) e	858.4 (6.2) f	71.4 (0.7) c	185.2 (12.2)
	T210-60	2.35 (0.24) de	800.5 (11.8) c	260.0 (1.9) e	898.1 (16.2) ef	72.5 (3.2) c	138.6 (23.6)
	T240-40	2.81 (0.20) de	974.0 (79.1) bc	319.3 (19.8) de	1115.9 (90.7) def	82.5 (6.2) c	149.8 (6.7)
	T240-60	2.96 (0.14) cd	1038.2 (16.0) bc	338.9 (4.3) de	1174.2 (8.0) de	86.0 (1.5) c	127.8 (26.4)
	T270-40	2.70 (0.21) de	1100.5 (17.3) bc	356.8 (7.5) cd	1261.6 (30.8) d	91.9 (3.0) c	124.0 (1.2)
	T270-60	3.79 (0.38) bc	1345.4 (61.6) b	438.4 (17.1) c	1576.6 (56.3) c	117.3 (3.0) b	146.9 (24.8)
	T300-40	4.52 (0.39) ab	1403.4 (407.5) b	530.3 (62.2) b	1916.4 (144.8) b	147.8 (9.6) a	179.5 (41.9)
	T300-60	5.07 (0.25) a	1894.7 (138.6) a	646.8 (29.4) a	2250.3 (114.4) a	166.5 (8.5) a	203.4 (51.7)
60P/40E	CONTROL	2.14 (0.03) d	620.8 (12.0) g	247.0 (4.9) g	1012.4 (7.1) f	120.3 (1.1) g	150.0 (11.2) cde
	T210-40	2.50 (0.33) cd	634.8 (14.1) fg	255.0 (4.8) g	1066.0 (21.8) f	125.3 (2.5) g	156.4 (3.5) bcd
	T210-60	2.25 (0.34) d	638.2 (8.1) fg	255.7 (4.8) g	1075.2 (7.6) f	125.0 (1.9) g	135.8 (4.8) e
	T240-40	2.58 (0.23) cd	688.0 (20.6) ef	283.6 (4.1) f	1182.8 (13.2) e	138.1 (1.7) f	144.8 (2.7) de
	T240-60	2.96 (0.10) bc	748.0 (5.5) de	311.1 (1.1) e	1306.2 (1.6) d	158.0 (1.0) e	164.3 (5.9) bc
	T270-40	3.39 (0.08) b	783.8 (18.2) d	338.2 (8.3) d	1360.1 (28.7) d	174.9 (4.2) d	146.7 (2.8) de
	T270-60	3.46 (0.05) b	874.7 (38.6) c	369.8 (15.3) c	1504.1 (25.0) c	192.7 (4.6) c	156.1 (2.1) bcd
	T300-40	4.36 (0.31) a	1081.2 (19.8) b	477.1 (9.4) b	1859.9 (15.2) b	237.5 (2.7) b	170.0 (5.4) ab
	T300-60	4.82 (0.32) a	1197.0 (39.6) a	517.1 (17.9) a	2021.7 (54.2) a	256.5 (7.5) a	186.6 (8.3) a

Tabla 6. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets sometidas a los diferentes tratamientos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Tratamiento	Al (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)
100P	CONTROL	73.3 (6.0) ef	1.60 (0.14) f	10.6 (0.9) g	68.0 (7.4) h	68.2 (6.6) e	60.0 (5.0) f
	T210-40	80.2 (5.5) ef	2.25 (0.16) d	12.7 (1.0) ef	84.1 (7.1) fg	97.3 (6.8) d	69.2 (4.6) ef
	T210-60	69.2 (<0.1) f	1.67 (0.02) ef	11.5 (<0.1) fg	71.9 (1.1) gh	76.4 (0.5) e	64.3 (0.5) ef
	T240-40	83.8 (0.9) e	1.89 (0.01) e	13.5 (0.1) e	88.4 (1.3) ef	99.7 (0.4) d	71.1 (0.4) e
	T240-60	100.3 (8.8) d	2.27 (0.21) d	15.5 (1.4) d	100.6 (8.8) de	131.8 (12.5) bc	82.7 (8.1) d
	T270-40	111.4 (0.8) cd	2.37 (0.04) d	16.5 (0.1) d	113.7 (1.8) d	133.4 (1.6) bc	89.1 (0.8) d
	T270-60	116.4 (0.9) c	2.69 (0.01) c	18.9 (<0.1) c	131.0 (0.4) c	123.7 (0.6) c	104.4 (0.6) c
	T300-40	132.7 (1.8) b	3.17 (0.04) b	21.6 (0.4) b	149.7 (1.1) b	143.0 (2.2) b	119.7 (1.8) b
	T300-60	163.6 (2.2) a	3.72 (0.02) a	25.6 (0.2) a	179.3 (1.1) a	171.2 (1.0) a	138.5 (1.5) a

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

90P/10E	CONTROL	140.8 (76.1)	1.53 (0.31)	15.8 (3.8) b	157.9 (41.7) def	147.7 (49.7)	60.8 (9.0) d
	T210-40	127.1 (3.0)	1.69 (0.36)	15.2 (0.4) b	146.8 (2.1) ef	145.6 (3.8)	59.9 (0.6) d
	T210-60	99.2 (3.5)	1.33 (0.06)	14.4 (0.2) b	141.4 (2.0) f	113.6 (7.3)	57.9 (0.4) d
	T240-40	109.9 (9.4)	1.55 (0.09)	17.3 (0.6) b	185.1 (12.5) cdef	134.7 (27.0)	69.5 (3.9) cd
	T240-60	104.6 (17.1)	1.35 (0.46)	18.0 (0.1) b	191.4 (4.8) cde	127.1 (8.6)	74.0 (1.4) bcd
	T270-40	101.9 (18.9)	1.28 (0.41)	19.0 (0.3) b	199.6 (11.8) cd	122.4 (11.6)	81.6 (2.0) bcd
	T270-60	120.4 (14.1)	1.62 (0.47)	21.7 (0.2) ab	231.7 (14.1) c	136.7 (32.8)	97.9 (2.5) bc
	T300-40	84.8 (79.1)	1.23 (0.74)	19.1 (11.1) b	316.1 (10.2) b	96.1 (73.7)	102.2 (27.1) b
	T300-60	158.1 (46.7)	1.60 (1.05)	31.2 (1.9) a	367.2 (6.9) a	163.4 (65.3)	139.3 (7.5) a
60P/40E	CONTROL	63.1 (2.7) c	2.47 (0.76) ab	47.1 (5.2) bc	93.9 (2.7) e	70.1 (5.8) bc	43.3 (1.0) f
	T210-40	64.3 (3.2) c	2.99 (1.38) ab	31.3 (0.9) e	92.6 (2.2) e	73.6 (1.4) bc	45.1 (1.0) ef
	T210-60	63.6 (11.9) c	1.62 (0.04) b	22.9 (1.0) f	95.5 (2.5) e	65.8 (2.5) c	44.4 (0.8) ef
	T240-40	59.6 (0.8) c	1.77 (0.41) ab	39.7 (1.0) cd	102.5 (1.4) e	69.1 (1.0) c	48.6 (0.8) e
	T240-60	66.9 (0.8) c	1.69 (0.08) b	32.1 (0.3) de	116.8 (1.3) d	74.9 (0.7) bc	54.4 (0.2) d
	T270-40	69.0 (4.7) c	1.96 (0.26) ab	55.0 (1.2) a	157.8 (5.4) c	76.4 (1.0) bc	57.7 (1.4) d
	T270-60	71.7 (1.9) bc	2.01 (0.07) ab	54.2 (2.6) ab	168.7 (8.1) c	84.7 (2.0) b	63.3 (3.3) c
	T300-40	84.8 (1.6) ab	2.75 (0.38) ab	56.8 (0.7) a	211.3 (4.9) b	108.7 (1.3) a	82.1 (0.8) b
	T300-60	90.7 (3.3) a	3.59 (0.90) a	61.6 (5.0) a	228.8 (7.8) a	123.4 (14.3) a	90.6 (2.8) a

El efecto de la severidad de la torrefacción también fue significativo para la mayoría de los elementos, junto con la interacción con la mezcla. Esto llevó a la necesidad de analizar los patrones de variación que agrupan los elementos. La mayoría de ellos (C, Mg, Al, P, Ca, Fe, Cu) muestran una tendencia creciente con severidad, independientemente de la mezcla. Los porcentajes de incremento variaron desde +35 % en el caso del C hasta 218, 226 y 250 % para Ca, Mg y P, respectivamente. Dos elementos muestran tendencias decrecientes con un patrón también independiente de la mezcla: H y O disminuyeron ambos 35 % con la severidad de la torrefacción. El Cl mostró una tendencia decreciente que pudo compensar las diferencias entre las mezclas, siendo las concentraciones de Cl un 60 % mayores para los pellets crudos 60P/40E en comparación con los 100P. Cinco elementos muestran una tendencia creciente con la severidad, pero manteniendo las diferencias entre mezclas: B, Na, K, Zn y Mn. No hubo tendencias claras para las concentraciones de S y N dependiendo de la severidad de la torrefacción (Tablas 4, 5 y 6).

El patrón pronunciado de disminución de las concentraciones de Cl con la severidad de la torrefacción significa que el Cl se libera por efecto del

calentamiento. La Figura 34 muestra que la relación de liberación de cloro ya es evidente para la temperatura de torrefacción más baja. Tanto la temperatura como el tiempo de residencia tuvieron efectos claros sobre la relación de liberación. Los niveles de severidad más altos proporcionaron sólo incrementos marginales de la tasa de liberación. Como también se puede observar en la Tabla 4, una combinación de T240-60 es suficiente para mantener los niveles de Cl en el 30 % del primer umbral de calidad del pellet para cualquier mezcla analizada.

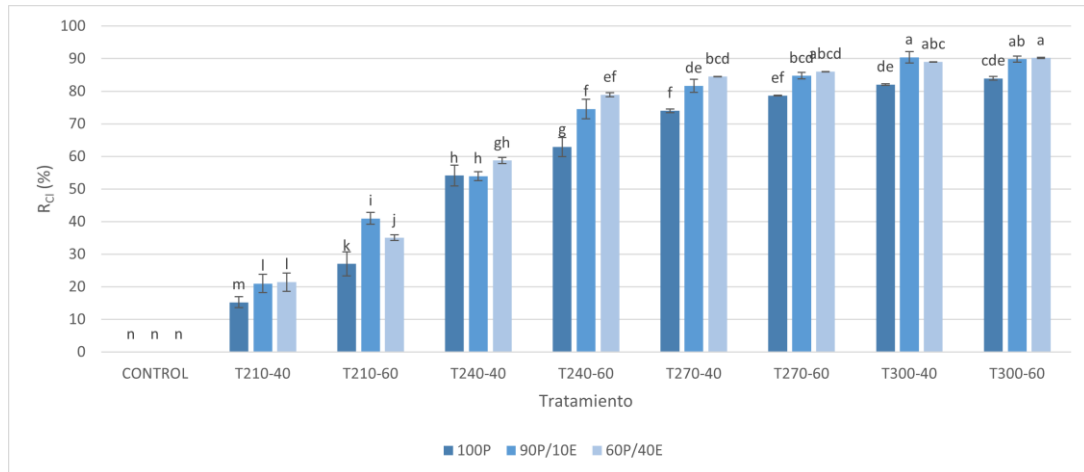


Figura 34. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la tasa de liberación de cloro en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

Se hace evidente que el contenido de Cl es el factor más limitante para mezclar astillas de eucalipto con astillas de pino, y un porcentaje tan bajo como 10 % podría derivar en concentraciones de Cl cercanas al 0.02 %. Anteriormente se han reportado niveles de Cl relativamente altos incluso para madera sin corteza (Keipi et al., 2014) y se propuso la torrefacción como un tratamiento previo capaz de disminuir las concentraciones de Cl a límites aceptables (Romão et al., 2023; Sá et al., 2020). En la mayoría de los casos, los estudios reportan valores promedio de varios componentes, cuya abundancia relativa depende del tamaño de los árboles muestreados. En este estudio, las concentraciones de Cl se refieren específicamente al componente de madera, considerando así que los troncos de eucalipto tendrían que ser descortezados antes de su astillado en la fábrica de pellets (junto con los troncos de pino).

Otro factor relevante a tener en cuenta es la reducción en la concentración de Cl observada por el propio proceso de pelletización, con emisiones estimadas entre un 25 y un 50 % en comparación con las astillas de madera utilizadas como materia prima.

El patrón de liberación de Cl observado con la severidad de torrefacción en este estudio reporta un rango más completo que el cubierto en la literatura. Keipi et al. (2014) lograron una liberación de Cl del 90 % en muestras de eucalipto con 60 minutos de residencia a 260 °C. Romão et al. (2022) reportaron información sobre

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

tres combinaciones de severidades de torrefacción (T240-30, T260-30 y T260-60), obteniendo liberaciones del 88-96 %, con poco efecto (influencia) del tiempo de residencia. Algunos de los estudios de la literatura podrían haber tenido problemas de determinación de este parámetro, ya que Sá et al. (2020) obtuvieron una cantidad total de Cl para muestras torrefactadas a 240 °C, pero reportaron un problema con el procedimiento realizado. También los valores obtenidos por De Oliveira Araújo et al. (2017) con un promedio de 0.29 % de concentración de Cl en 8 muestras de madera de eucalipto sin tratar parecen demasiado altos en comparación con los valores habituales. Estos autores obtuvieron tasas de liberación moderadas (25-50 %) para temperaturas de torrefacción de 160-230 °C.

En el presente trabajo, los valores de liberación observados son claramente inferiores a los reportados en la literatura para el mismo rango de severidad de torrefacción, con un efecto evidente del tiempo de residencia para temperaturas de 210 y 240 °C. Aun así, el pretratamiento logró reducir las concentraciones de Cl a niveles la mitad de los primeros umbrales de las normas ya para la combinación T240-40, incluso para la mayor proporción de eucalipto en la mezcla.

Aunque todavía no se sabe claramente cómo se une el Cl a la madera, se ha propuesto que el K puede formar partículas discretas de KCl en la matriz orgánica (Jensen et al., 2000). Los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con los reportados por Saleh et al. (2014), quienes estudiaron diferentes especies, incluida la picea como conífera: i) se libera una mayor fracción de Cl de las muestras con menor contenido de cloro y ii) la fracción de cloro liberado disminuye con el contenido de potasio de la biomasa.

En el presente estudio, las muestras con mayor contenido de Cl o K son las que tienen mayor proporción de eucalipto. Jensen et al. (2000) demostraron que el 60 % del Cl se libera a temperaturas de 200 a 400 °C durante la pirólisis de la paja. El Cl se libera en forma de KCl y CH₃Cl (Saleh et al., 2014), mientras que el K puede volver a depositarse como partículas de KCl y K₂CO₃ (Jensen et al., 2000). La formación de depósitos de KCl puede explicar la relación negativa mencionada anteriormente, aunque, por otro lado, la liberación de cloro puede derivarse de la reacción entre KCl y grupos carboxílicos (Zintl et al., 1998). A temperaturas inferiores a 200 °C no se liberan cantidades significativas de cloro (Björkman y Strömberg, 1997; Jensen et al., 2000).

Paralelamente a los niveles de concentración de Cl y sus cambios con la severidad de la torrefacción, el presente estudio informa los niveles más altos en la madera de eucalipto de varios elementos que pueden liberar material formador de cenizas en partículas finas: K, Na y Zn (Sippula et al., 2008). La torrefacción de los pellets aumenta adicionalmente estas concentraciones, siguiendo un patrón paralelo al rendimiento másico de este pretratamiento.

Estos elementos son causa de deposición y corrosión en calderas y otros sistemas de calefacción (Benson et al., 1996). Aun así, los índices de álcali obtenidos para las mezclas que contienen 40 % de eucalipto y con mayor severidad de torrefacción son cercanos a 0.10 kg GJ⁻¹, aún inferiores al límite (0.17) propuesto por Miles et al. (1995) para la probabilidad de incrustación. Estos niveles más altos de elementos alcalinos en la madera de eucalipto se han informado anteriormente (Saddawi et al., 2011) y se sabe que son más altos en la madera dura que en la madera blanda (UNE-EN ISO 17225-1), incluso algunos estudios como el de Zhang et al. (2022) reportaron valores para pellets de pino puro muy superiores a los obtenidos en el presente estudio para la mezcla 60P/40E (×2, ×8, ×3 y ×3 para K, Ca, Mg y Na, respectivamente). Saddawi et al. (2011) propusieron un pretratamiento de lavado para eliminar iones de metales alcalinos y cloruro para producir biocombustibles torrefactos de alta calidad. Los resultados de este estudio son consistentes con los reportados por Singh et al. (2020) con respecto al aumento en las concentraciones de elementos formadores de cenizas durante el proceso de torrefacción. Las altas temperaturas de torrefacción provocan un aumento en el contenido de cenizas, ya que los componentes principales de las cenizas son metales alcalinos y alcalinotérreos, incluidos K, Na y Mg (Cen et al., 2021).

En el presente trabajo, se informa el patrón de reducción del contenido de H y O en paralelo al aumento del contenido de C reportado anteriormente en la torrefacción de biomasa (Bridgeman et al., 2008). Los resultados obtenidos en este estudio se compararon con los de varios estudios en los que se estudió la torrefacción del eucalipto. Las ganancias y pérdidas de C, H y O se resumen en la Tabla 7. En general, el patrón de ganancias de C y pérdidas de O y H dependen de la severidad de la torrefacción, siendo los valores obtenidos en el presente estudio para T240-60 (ganancia de C 9-11 %, pérdida de H 10-14 %, pérdida de O 7-10 %) menores que las reportadas por Lu et al. (2012) y Cardona et al. (2019) para T250-60. Para el tratamiento T270-60, la ganancia de C (12-20 %) y la pérdida de O (9-19 %) de este estudio fueron inferiores a los valores informados por Romão et al. (2020), mientras que la pérdida de H (17- 30 %) fue claramente superior.

Tabla 7. Datos de diferentes estudios en los que se determinaron propiedades del eucalipto torrefactado producido en diferentes condiciones. Los valores negativos de pérdida de H indican una ganancia. Los datos se transformaron a base seca cuando fue necesario. Fuente: Elaboración propia.

Severidad	Muestras	Atmósfera	Ganancia de C (%)	Pérdida de H (%)	Pérdida de O (%)	Referencia
T240-30			12.26	11.02	9.80	
T240-60	Astilla de eucalipto	Nitrógeno	8.57	9.42	5.55	Romão et al. (2020)
T260-30			14.76	8.47	22.02	
T260-60			25.53	15.02	20.94	
T280-30			18.52	9.74	19.68	
T250-60	Hojas, corteza y madera de eucalipto	Gas inerte con alto contenido de nitrógeno	21.15	-17.51	21.31	Cardona et al. (2019)
T275-60			27.79	-16.71	25.40	
T300-60			42.47	-16.83	39.75	
T265-15	Madera de eucalipto	Nitrógeno	12.45	12.89	20.72	Rodrigues et al. (2018)

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

T250-15	Astilla de eucalipto	Nitrógeno	4.52	5.82	7.43	Arteaga-Pérez et al. (2015)
T250-30			6.22	5.97	7.94	
T280-15			9.71	11.49	15.96	
T280-30			14.96	10.60	18.81	
T250-60			13.78	3.92	16.10	
T275-60	Madera de eucalipto	Nitrógeno	17.52	7.84	19.73	Lu et al. (2012)
T300-60			34.25	17.65	38.10	
T325-60			47.64	29.41	52.38	
T350-60			47.83	29.41	52.15	
T250-60			19.29	17.65	20.63	
T275-60	Aire	Aire	35.83	41.18	37.19	
T300-60			40.35	56.86	40.36	
T325-60			44.09	70.59	43.31	
T350-60			47.05	76.47	46.26	

3.3.4 Poder calorífico y rendimiento energético

Se observó un efecto significativo tanto en los tratamientos de torrefacción como de las mezclas sobre el poder calorífico ($p < 0.001$). La mezcla 60P/40E mostró los valores más bajos para todo el rango de severidad de torrefacción. Como se esperaba, el poder calorífico superior (PCS₀) aumentó debido al proceso de torrefacción (Figura 35), al igual que lo hizo el poder calorífico inferior en base húmeda (PCI_h, Figura 36). Este aumento fue paralelo al aumento en el contenido de carbono y la disminución de la relación atómica H:C y O:C y fue particularmente marcado a temperaturas más altas. El PCS₀ y PCI_h fue mucho mayor en las muestras T300-60 y T300-40, seguidas por las muestras T270-60, que en la biomasa cruda (control) y los pellets torrefactos a 210 °C.

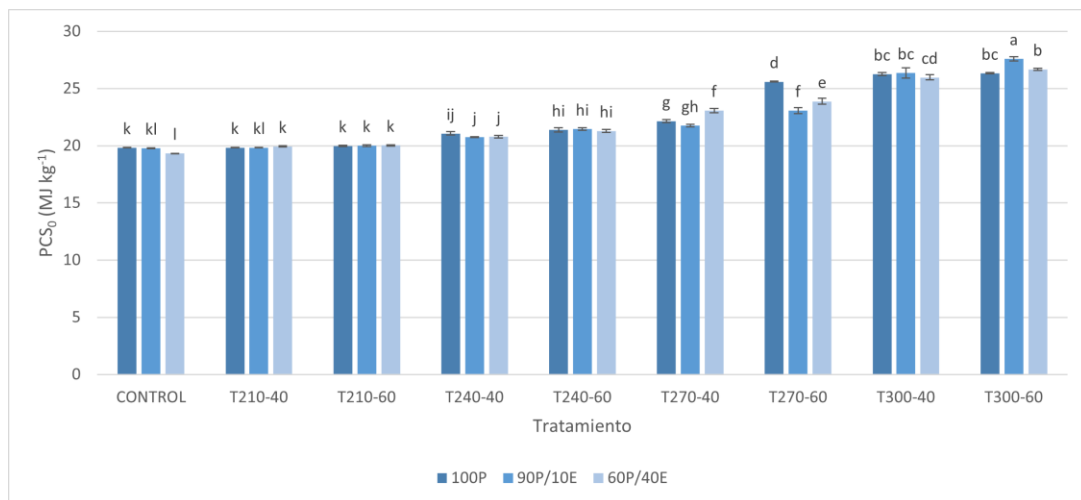


Figura 35. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico superior anhidro en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

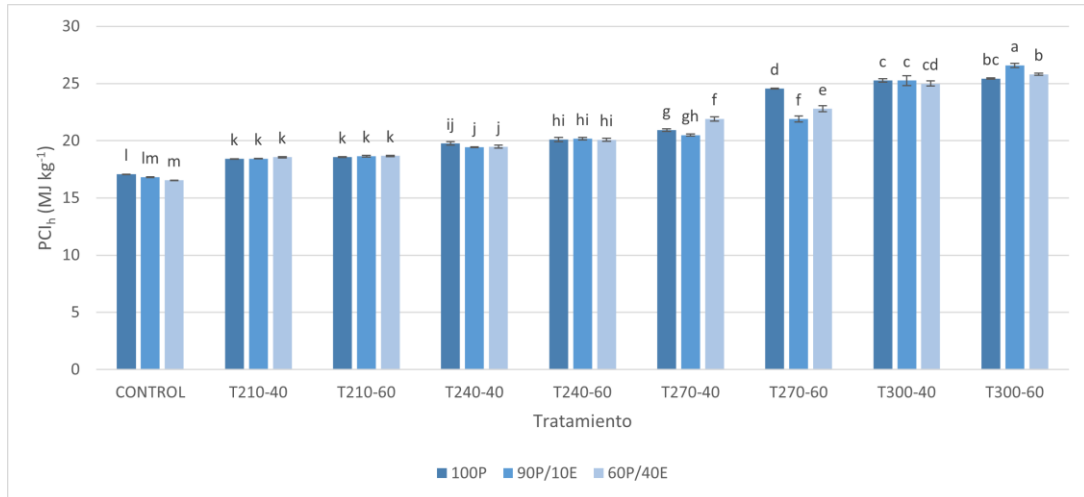


Figura 36. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico inferior en base húmeda en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

Otro parámetro evaluado es el rendimiento energético (Figura 37), que se ve afectado directamente por el rendimiento másico y la relación entre el poder calorífico superior anhidro de la biomasa torrefactada y la biomasa cruda.

En la Figura 37 se observan diferencias significativas tanto en los tratamientos de torrefacción como de las mezclas ($p < 0.001$). Cuando la severidad de torrefacción es mayor y por tanto el rendimiento másico disminuye se observa que el rendimiento energético disminuye a pesar de que el cociente entre poder calorífico del pellet torrefacto y el pellet de control sea mayor.

Se puede concluir que es más influyente el rendimiento másico que el aumento que se puede obtener con el poder calorífico, ya que a severidades de torrefacción bajas los valores del rendimiento energético son cercanos al 100 % y cuando se trabaja con torrefacciones a alta temperatura esta propiedad disminuye por debajo del 70 %.

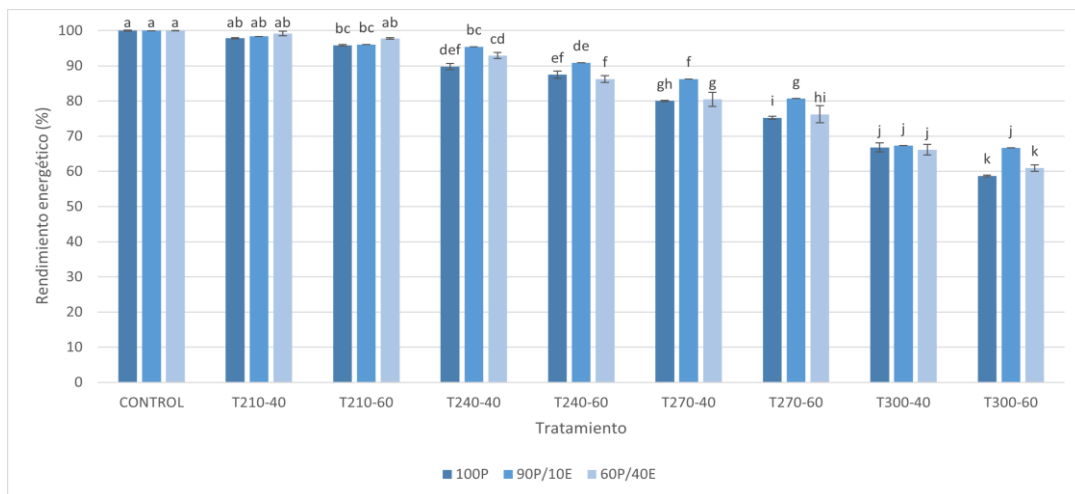


Figura 37. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del rendimiento energético en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey para la severidad y la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

Las relaciones atómicas H:C y O:C se utilizan comúnmente como indicadores de densificación de energía durante el proceso de torrefacción. El diagrama de van Krevelen (Figura 38) mostró que la mayoría de las muestras tratadas y los pellets crudos están incluidos en el rango de biomasa, excepto las muestras sometidas a los tratamientos T270-60, T300-40 y T300-60. Los pellets torrefactados a 210 °C y los de control aparecen relativamente juntos en el diagrama porque el proceso de torrefacción no afectó en gran medida los contenidos de hidrógeno, carbono u oxígeno. Estas proporciones fueron menores a temperaturas y contenidos de carbono más altos. Las muestras sometidas a los tratamientos T300-40 y T300-60 están cerca de la zona de turba y lignito, lo que indica que el poder calorífico superior es mayor y, por tanto, el poder calorífico inferior también es mayor, tal y como se pudo observar en las Figuras 35 y 36.

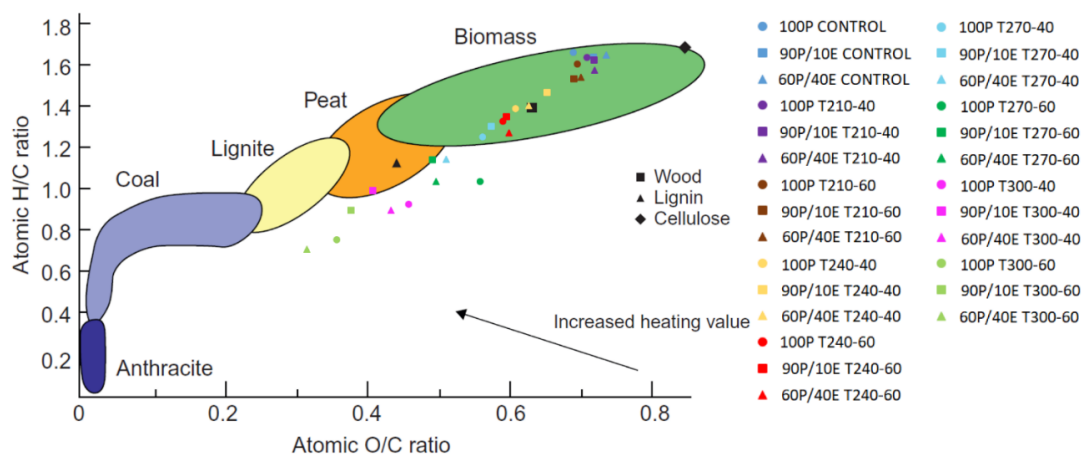


Figura 38. Diagrama de van Krevelen adaptado de Basu et al. (2013) para los datos de este estudio. La reproducción de la imagen ha sido autorizada.

Las menores relaciones de H/C y O/C en los pellets torrefactos están relacionadas con los procesos de deshidratación, descarbonilación y desmetilación que ocurren durante la torrefacción (Chen et al., 2021). Estos procesos conducen a la eliminación de grandes cantidades de oxígeno y a un gran aumento del contenido de carbono de la biomasa (Zhang et al., 2022). El primer proceso que ocurre durante la torrefacción es la eliminación de las moléculas de agua no unidas; a temperaturas más altas (150-160 °C) se elimina el agua unida y comienza la formación de CO₂. A 180 °C comienza la descomposición de la hemicelulosa y el cambio de color en la biomasa. Las siguientes reacciones ocurren durante la torrefacción (200-300 °C): desvolatilización y carbonización de hemicelulosa, despolimerización y desvolatilización de la lignina y la celulosa. La torrefacción de materiales lignocelulósicos da como resultado la descomposición de más hemicelulosas que lignina y celulosa. Estas reacciones de descomposición condujeron a la eliminación de grupos hidroxilo (OH), aumentando el poder calorífico específico y la hidrofobicidad del combustible (Hakkou et al., 2006; Tumuluru et al., 2011).

3.3.5 Índice de álcali

Respecto al índice de álcali, la Figura 39 muestra un efecto significativo de las condiciones de torrefacción y las mezclas sobre este parámetro ($p < 0.001$). Se muestra que un aumento en el porcentaje de eucalipto induce un aumento del índice de álcali, además el aumento de la temperatura y el tiempo de residencia es negativo debido crecimiento de este parámetro. Miles et al. (1995) indicaron que un índice superior a 0.17 kg GJ^{-1} indica que es probable que se produzcan incrustaciones y que un índice superior a 0.34 kg GJ^{-1} ciertamente dará lugar a problemas de incrustaciones. Estos niveles aún están lejos de alcanzarse con el rango analizado en este estudio.

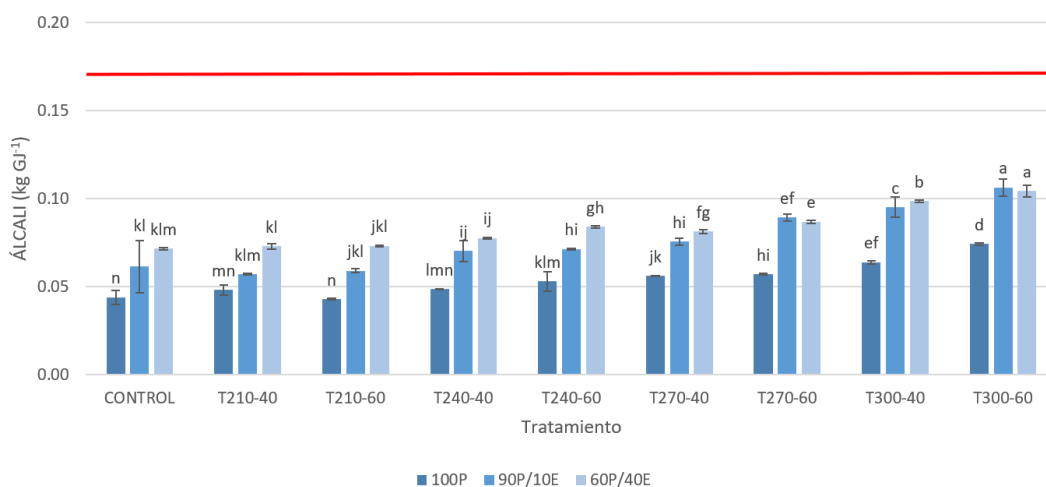


Figura 39. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del índice de álcali en los diferentes tratamientos y mezclas. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Esta propiedad está íntimamente relacionada con el mantenimiento de las instalaciones por lo tanto a pesar de no ser un parámetro que está limitado directamente por la normativa.

3.3.6 Superficies de respuesta

La aplicación de los modelos (8) y (9) al conjunto de datos puso de manifiesto importantes sesgos en las estimaciones derivadas de la presencia de eucalipto. Para los pellets de mezcla de pino y eucalipto, las estimaciones derivadas de modelos generales resultaron en particular en estimaciones sesgadas para las cenizas y el poder calorífico inferior. Por ese motivo se decidió elaborar modelos por separado para pellet de pino puro y pellet de mezcla (en este último caso, con independencia del porcentaje de eucalipto en la mezcla).

Pellet de pino puro P100

Los resultados del análisis de regresión y la relación entre los valores observados y predichos para pellet P100 ($n=36$) se muestran en la Tabla 8 y la Figura 40, respectivamente. El parámetro a_0 en la regresión logística (ecuación 8) no fue significativo para ninguna de las variables predichas. Entre las variables evaluadas

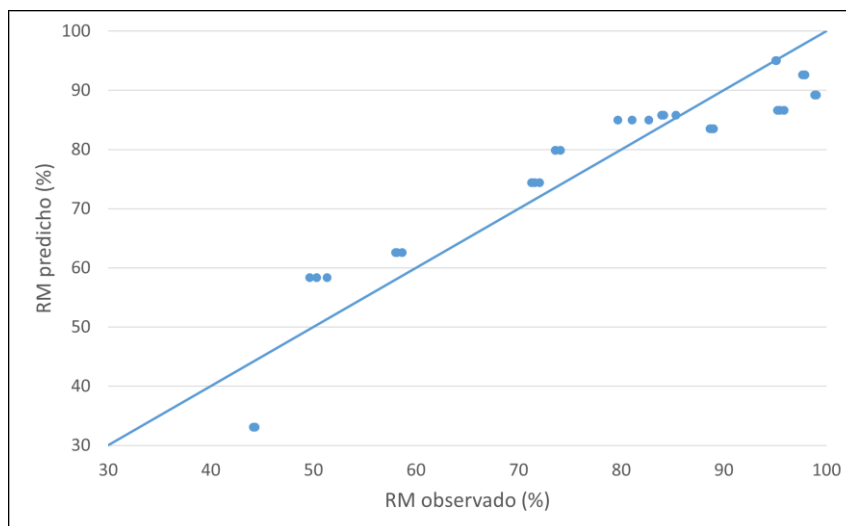
3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

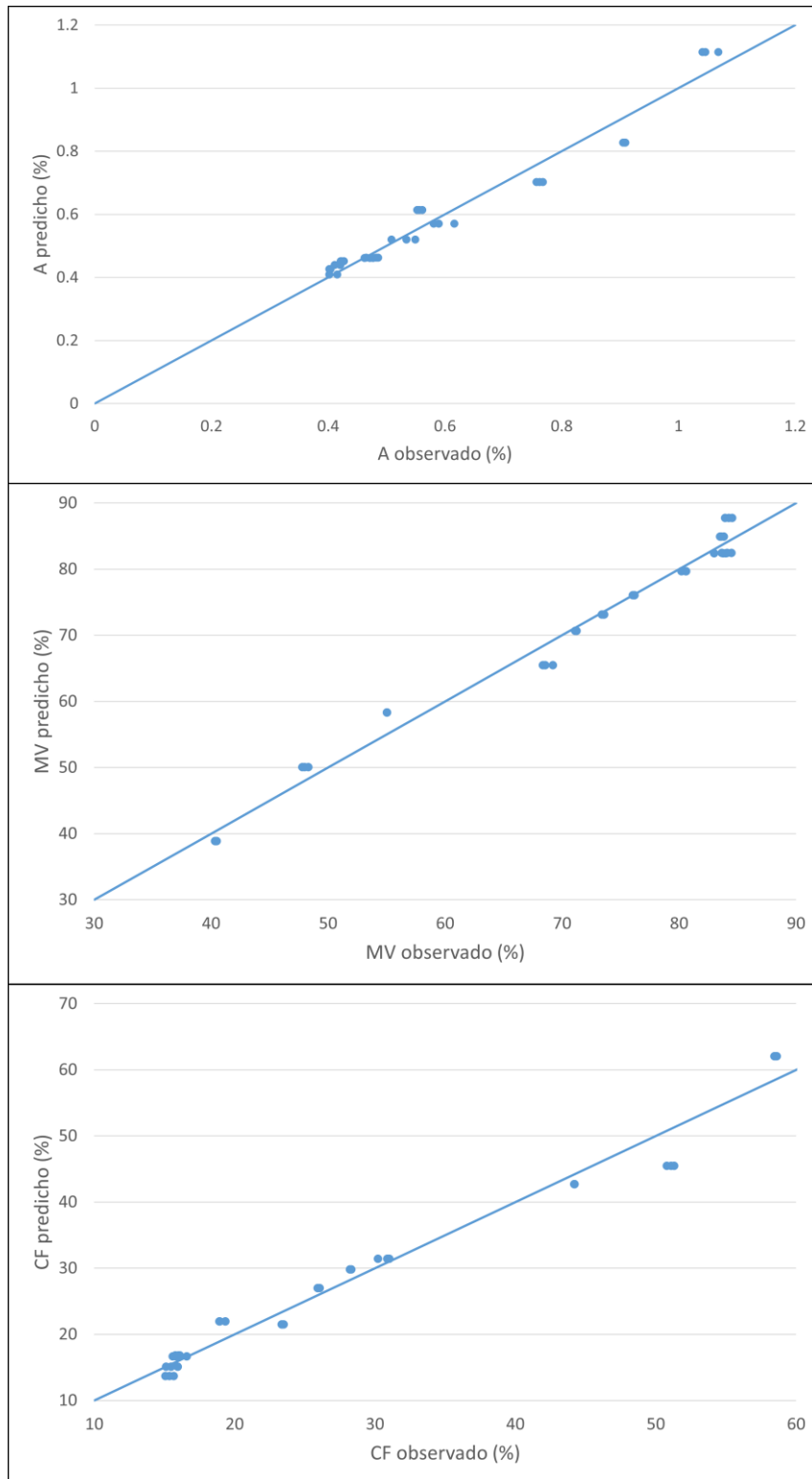
como porcentajes, RM fue la más difícil de modelar y los valores predichos tendieron a subestimarse. En este caso, el parámetro a_4 , que afecta a la temperatura de torrefacción al cuadrado, no fue significativo. La regresión logística permitió una predicción particularmente precisa e insesgada de A, pero también tendió a subestimar los valores de CF (Figura 40).

La estimación de MV utilizando el modelo propuesto en la Tabla 8 no aseguró la aditividad de la composición, es decir, la suma de las predicciones de A, CF y MV sería diferente de 100. Alternativamente, VM podría estimarse como una diferencia para asegurar la aditividad $\widehat{MV} = 100 - \widehat{A} - \widehat{CF}$. Este enfoque aumentaría el RMSE a 2.385 (aumento del 1 %), generando también un MRES de 0.028, denotando así una ligera sobreestimación de los valores.

Tabla 8. Resultados del análisis de regresión que muestran las estimaciones de parámetros y las medidas de exactitud y precisión de los modelos para muestras de pellet P100. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Ecuación	Parámetros estimados					RMSE	MRES	Adj-R ²
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄			
RM (%)	8	ns	-0.00806	-0.1912	8.108 10 ⁻⁴	ns	6.446	1.1643	0.862
A (%)	8	ns	0.04509	0.03029	-1.511 10 ⁻⁴	-9.044 10 ⁻⁵	0.042	-0.0001	0.953
CF (%)	8	ns	0.01918	0.05925	-3.097 10 ⁻⁴	-4.696 10 ⁻⁵	2.358	-0.0277	0.969
MV (%)	8	ns	-0.01885	-0.06055	3.153 10 ⁻⁴	4.609 10 ⁻⁵	2.362	0.0518	0.970
			b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄		
PCS ₀ (MJ kg ⁻¹)	9	19.83	ns	-0.3047	0.001427	ns	0.706	-0.0012	0.907
LHV _h (MJ kg ⁻¹)	9	18.34	ns	-0.3258	0.001533	ns	0.732	-0.0032	0.914





3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

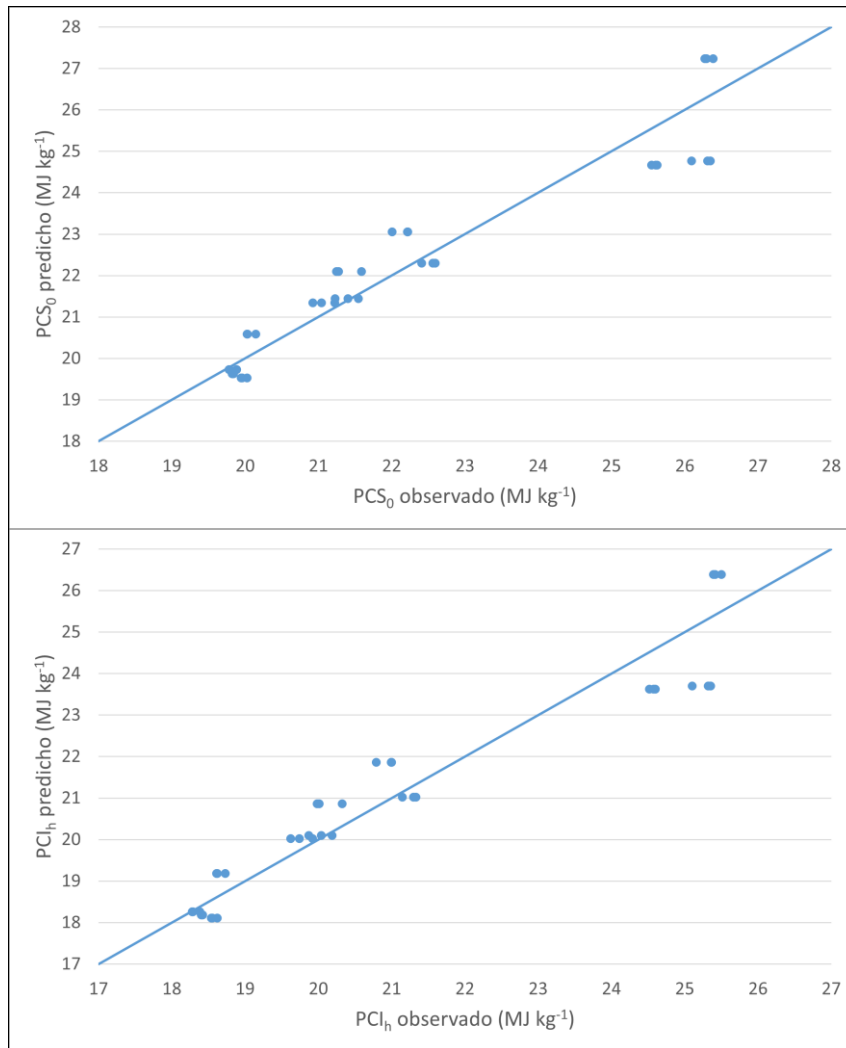
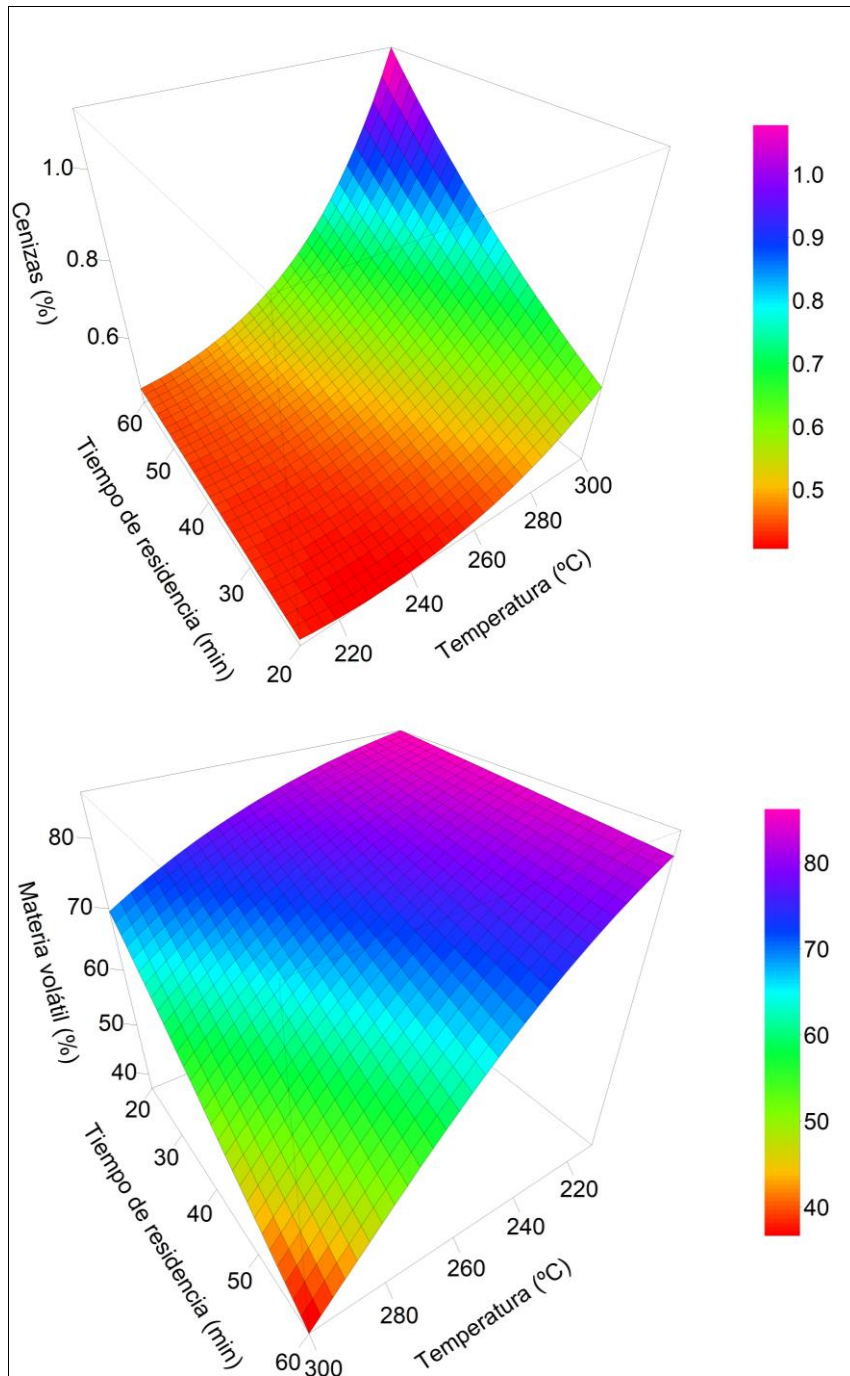


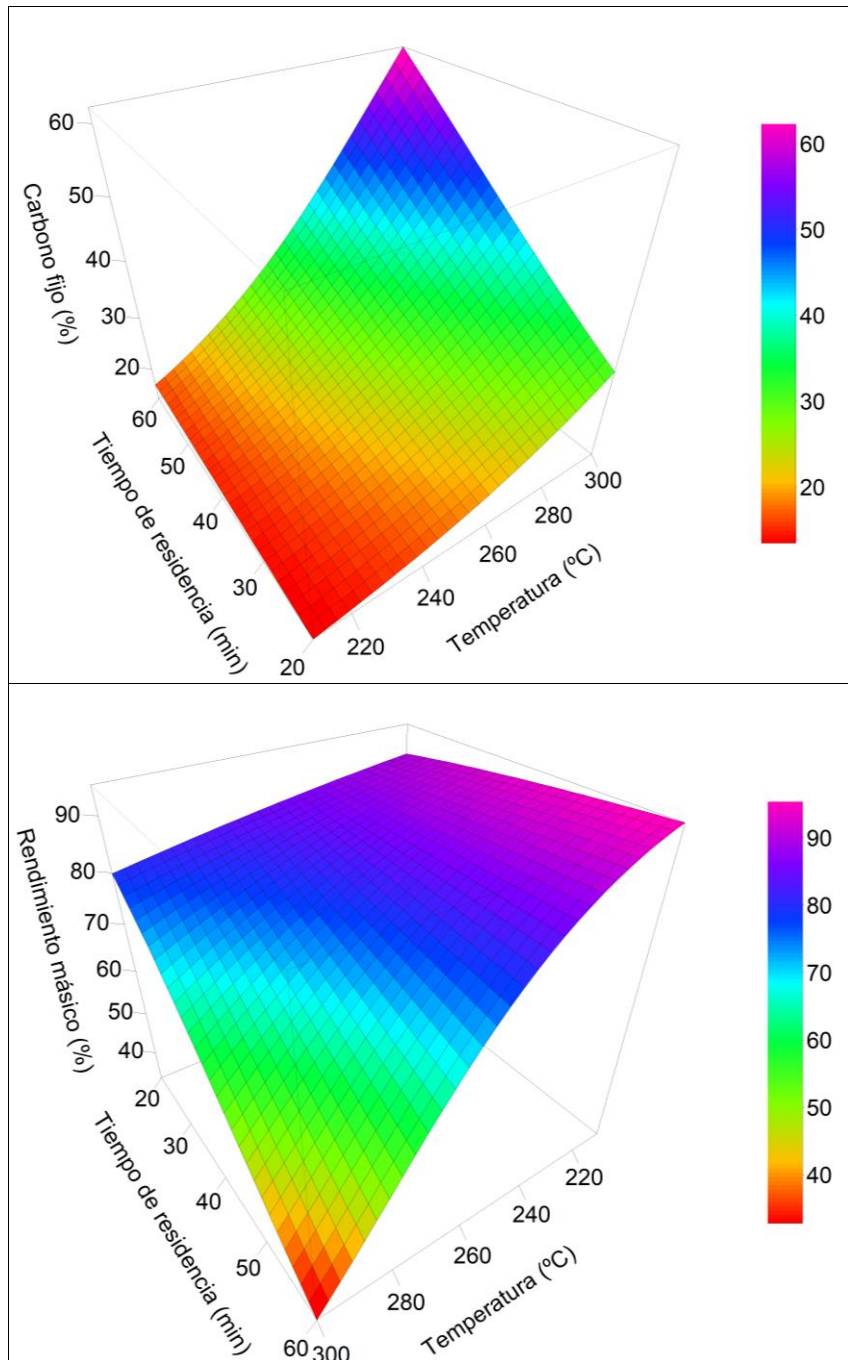
Figura 40. Valores observados versus valores predichos para las seis variables en estudio, en comparación con la línea objetivo Predicho = Observado. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los poderes caloríficos, sólo tres estimaciones de parámetros fueron significativas: las que afectan al tiempo de residencia y al producto del tiempo de residencia por la temperatura, junto con el intercepto. La precisión fue menor en este caso, pero el coeficiente de determinación ajustado fue >0.9 tanto para el PCS_0 como para el PCI_h . Los valores de RMSE obtenidos para ambas variables (Tabla 8) representan 3.2 % y 3.5 % en términos relativos.

La influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en las respuestas variables se evaluaron trazando gráficos tridimensionales de la superficie de respuesta (Figura 41).



3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP



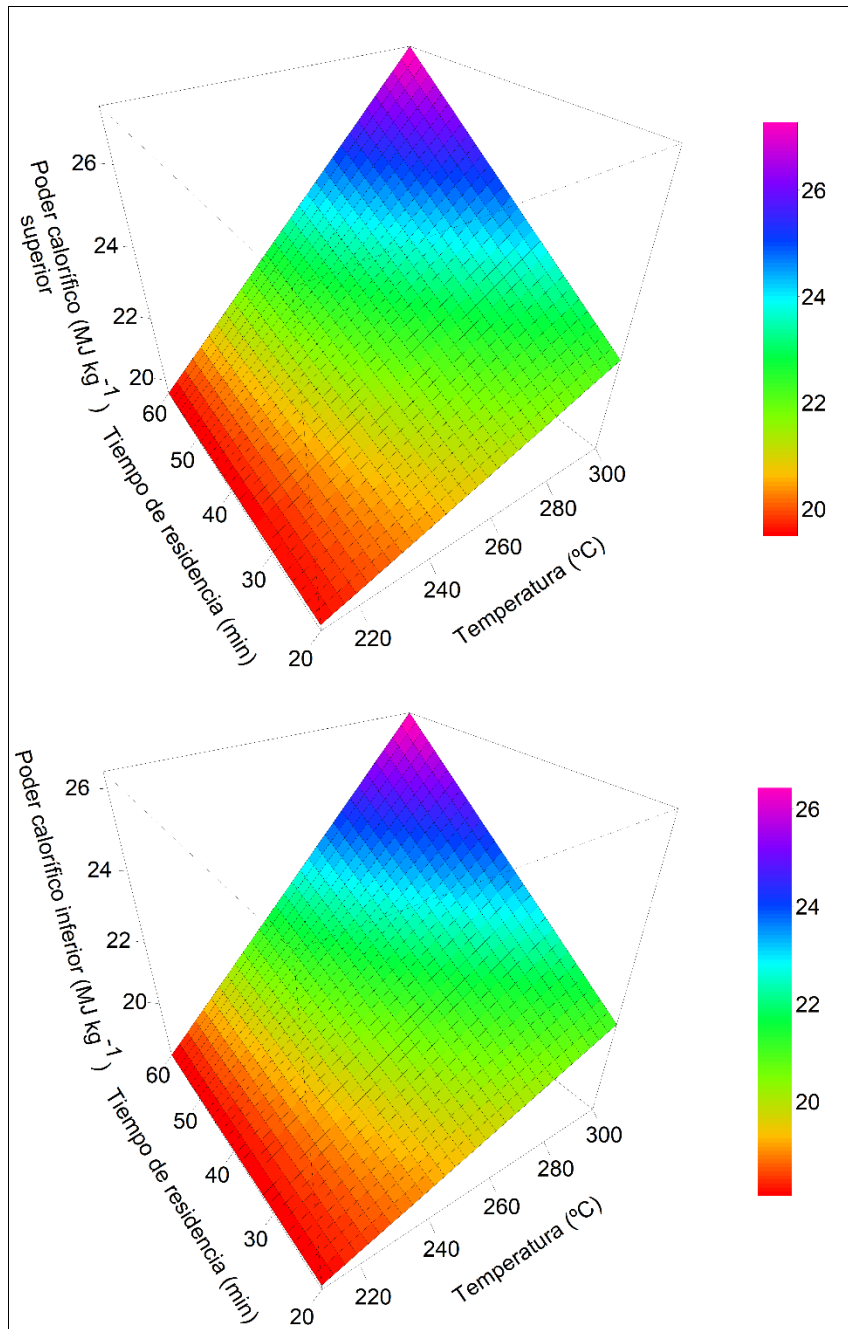


Figura 41. Superficies de respuesta de cenizas, volátiles, carbono fijo, rendimiento en masa y poderes caloríficos superior e inferior para los pellets de pino puro P100. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos propuestos permiten la definición de la severidad de la torrefacción, como una combinación de t y T , que proporciona los valores deseados de las propiedades energéticas. Una aplicación gráfica de los modelos ajustados para A y PCI_h puede proporcionar isóneas para ambas variables al trazar la temperatura de torrefacción (T , °C) en el eje X y el tiempo de residencia (t , min) en el eje Y. Si se consideran valores constantes para A y PCI_h , resolver t proporciona isóneas que podrían obtenerse analíticamente (ecuaciones 14 y 15).

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

$$t = \frac{\ln\left(\frac{100-A}{A}\right) - 0.04509T + 9.044 \cdot 10^{-5}T^2}{0.03029 - 1.511 \cdot 10^{-4}T} \quad (14)$$

$$t = \frac{PCI_h - 18.34}{-0.3258 + 0.001533 T} \quad (15)$$

La Figura 42 muestra las isóneas obtenidas para tres valores constantes del contenido de cenizas: el umbral UNE-EN ISO 17225-2 para la clase de calidad A1 de pellets de madera ($A=0.7\%$) y 0.6 y 0.5% . En cuanto a las isóneas para PCI_h , se consideró un objetivo de 22 MJ kg^{-1} (correspondiente a un aumento del 30% con respecto a los pellets crudos), y se definieron dos isóneas más por debajo de ese valor (21 y 20 MJ kg^{-1}). Por lo tanto, el uso de los modelos produce isóneas que pueden usarse para definir las combinaciones óptimas de t y T para otra biomasa torrefactada, al menos para el rango de severidad de torrefacción cubierto por los datos.

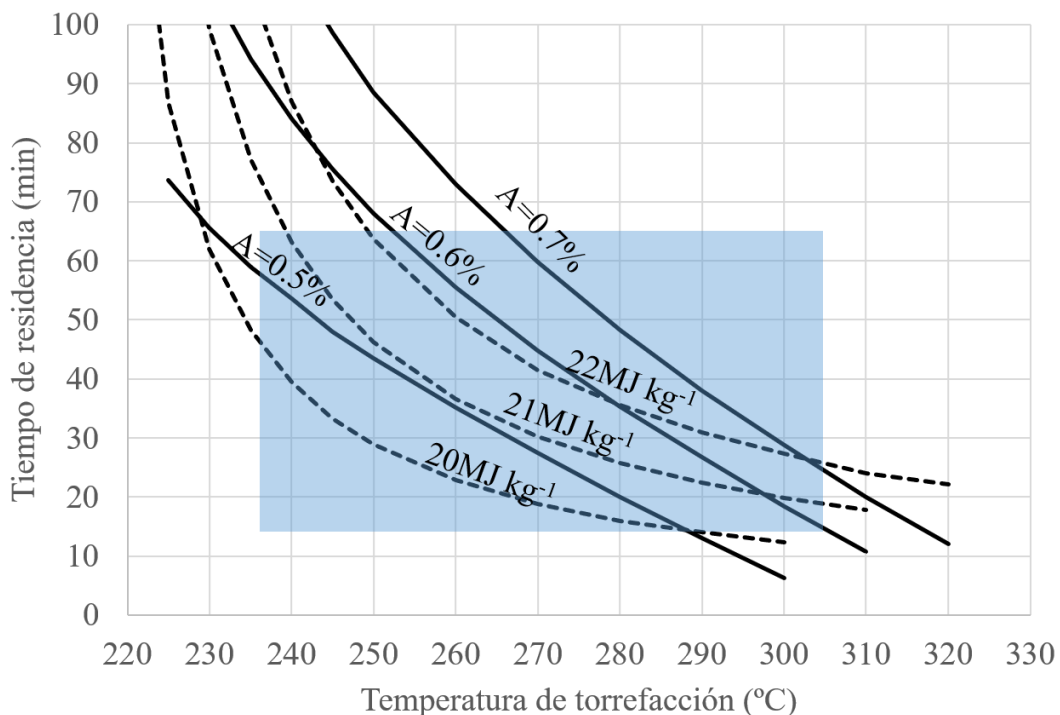


Figura 42. Isóneas para el contenido de cenizas (líneas continuas, A , %) y poder calorífico neto (líneas de puntos, PCI_h , MJ kg^{-1}) derivado de los modelos de regresión obtenidos para pellet de pino puro. El área sombreada se refiere a las combinaciones de temperatura de torrefacción ($^{\circ}\text{C}$) y tiempo de residencia (min) cubiertos por los datos, donde el modelo podría proponerse para predicciones. Fuente: Elaboración propia.

Considerando los modelos que se deben utilizar en el área cubierta por los datos utilizados para la regresión, se puede proponer un rango de temperaturas de entre 260 y $270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y tiempos de residencia de 50 a 60 min como las combinaciones que más probablemente producirían pellets torrefactos con las propiedades deseadas.

Además, el estudio anterior también se realizó con las mezclas con eucalipto tomando $n=48$.

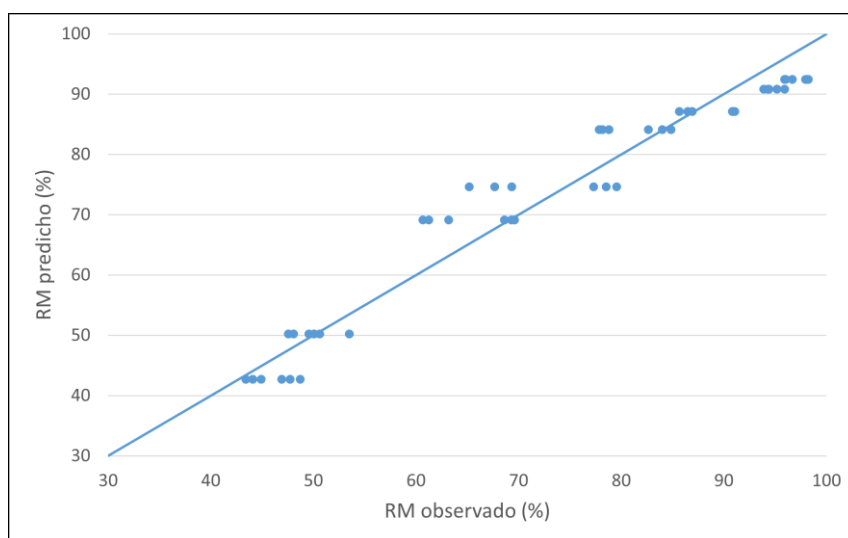
Pellet de mezcla pino-eucalipto P90/E10 y P60/E40

Los resultados de los ajustes para estas muestras (n=48) para los modelos (8) y (9) se muestran en la Tabla 9. La relación entre los valores observados y predichos se representa en la Figura 43.

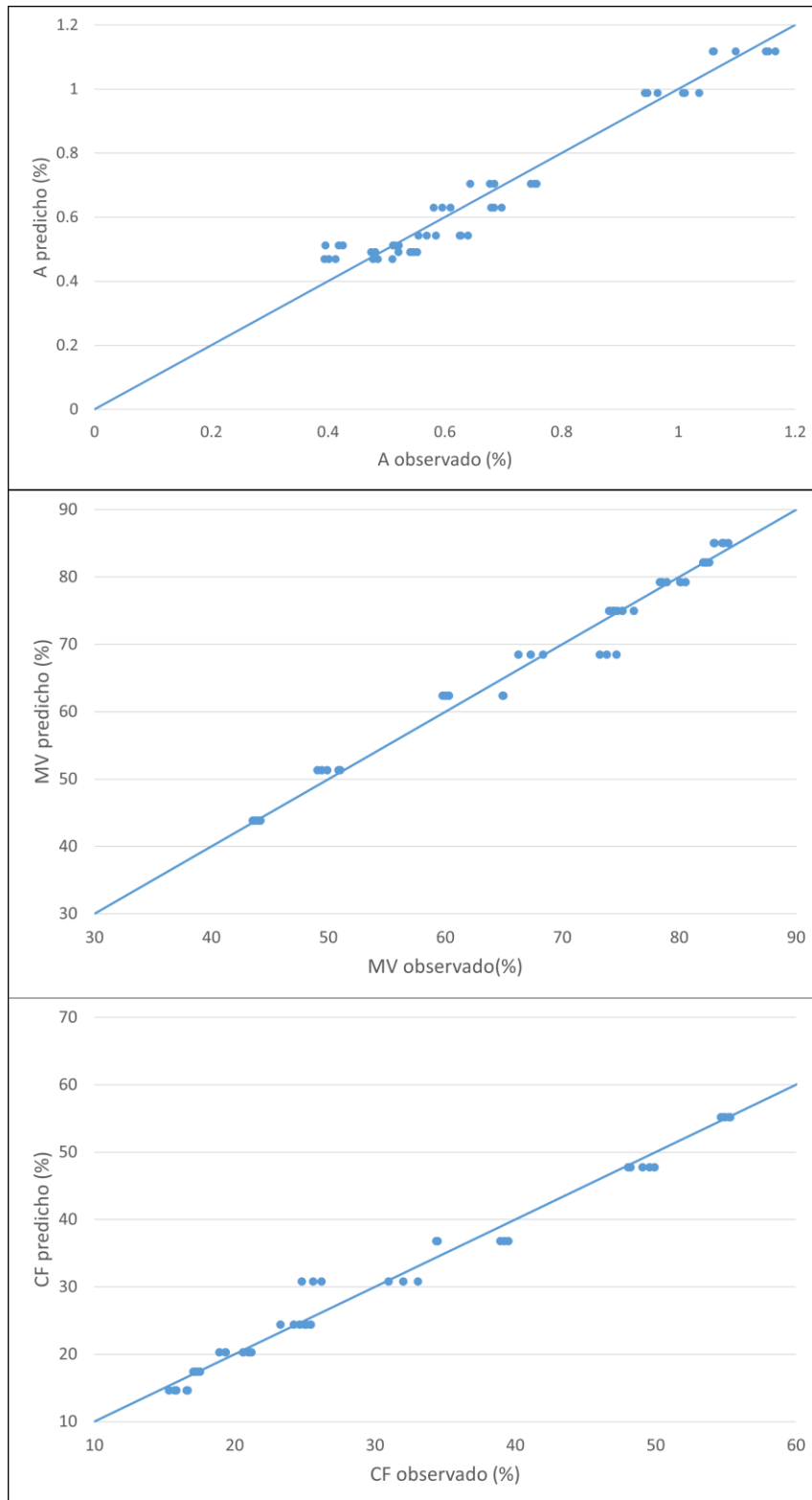
La estimación de MV utilizando el modelo propuesto en la Tabla 9 no aseguró la aditividad del análisis inmediato, es decir, la suma de las predicciones de A, CF y MV sería diferente de 100. Alternativamente, VM podría estimarse como una diferencia para asegurar la aditividad $\widehat{MV} = 100 - \widehat{A} - \widehat{CF}$. Este enfoque aumentaría el RMSE a 0.100 generando también un MRES de 0.018, denotando así una ligera sobreestimación de los valores.

Tabla 9. Resultados del análisis de regresión que muestran las estimaciones de parámetros y las medidas de exactitud y precisión de los modelos (8) y (9) para muestras de mezcla de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Ecuación	Parámetros estimados					RMSE	MRES	Adj-R ²
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄			
RM (%)	8	ns	-0.04169	ns	5.067 10 ⁻⁵	1.321 10 ⁻⁴	4.270	0.571	0.943
A (%)	8	ns	0.05003	ns	-2.081 10 ⁻⁵	-1.128 10 ⁻⁴	0.051	0.003	0.948
CF (%)	8	ns	0.02931	ns	-4.979 10 ⁻⁵	-9.006 10 ⁻⁵	1.825	0.034	0.981
MV (%)	8	ns	-0.02920	ns	5.023 10 ⁻⁵	9.005 10 ⁻⁵	1.866	-0.055	0.981
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄			
PCS ₀ (MJ kg ⁻¹)	9	20.92	ns	-0.3296	0.001428	ns	0.819	0.002	0.896
PCI _h (MJ kg ⁻¹)	9	19.54	ns	-0.3468	0.00151	ns	0.845	-0.002	0.901



3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP



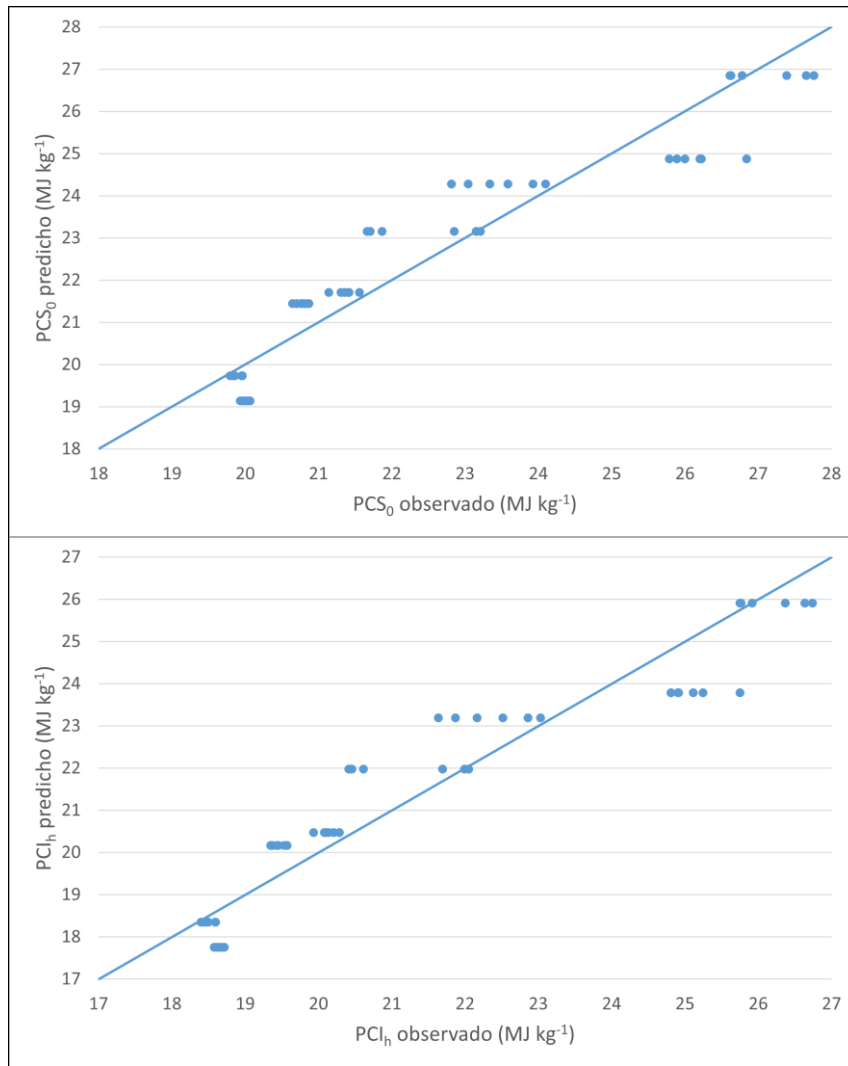
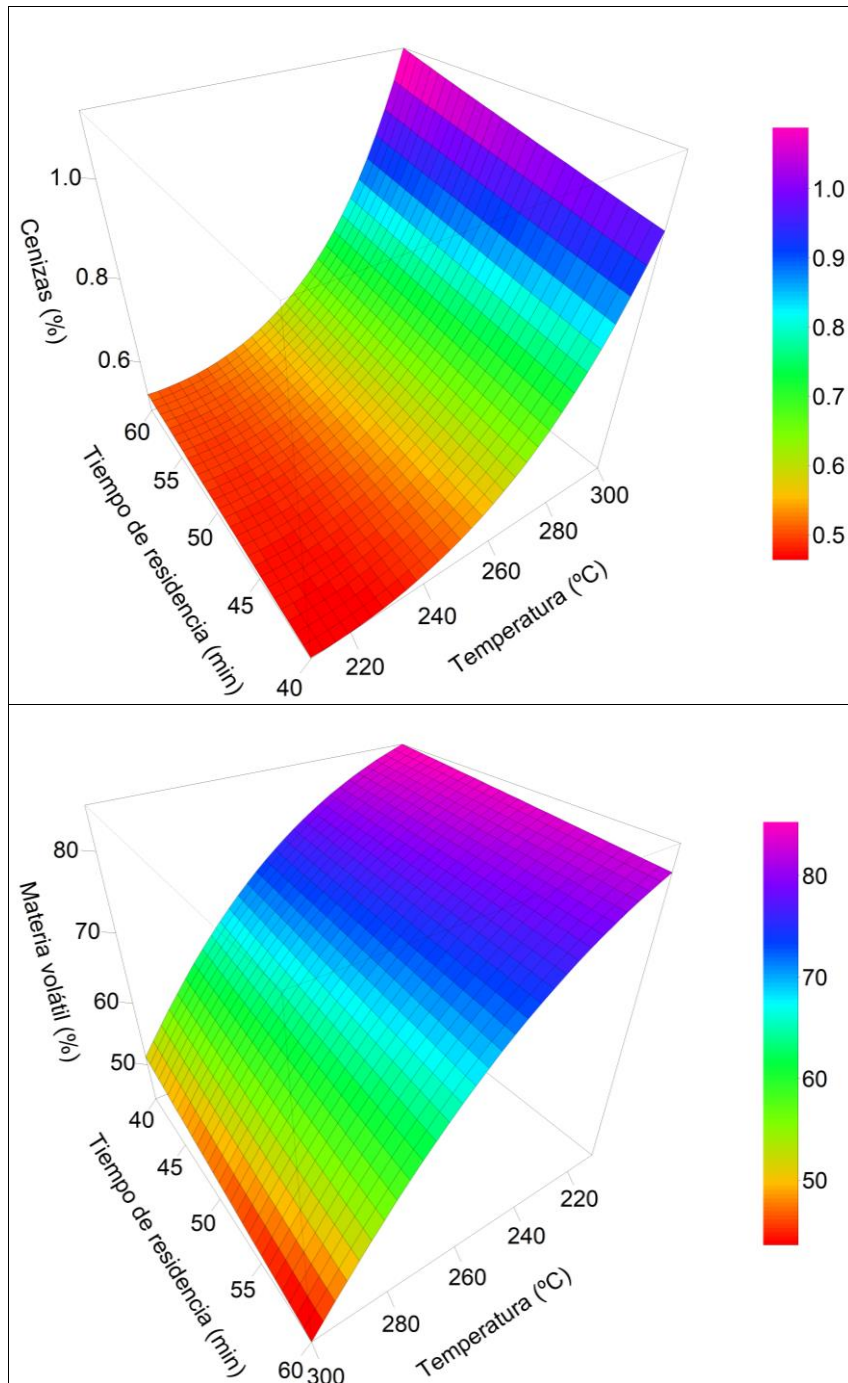


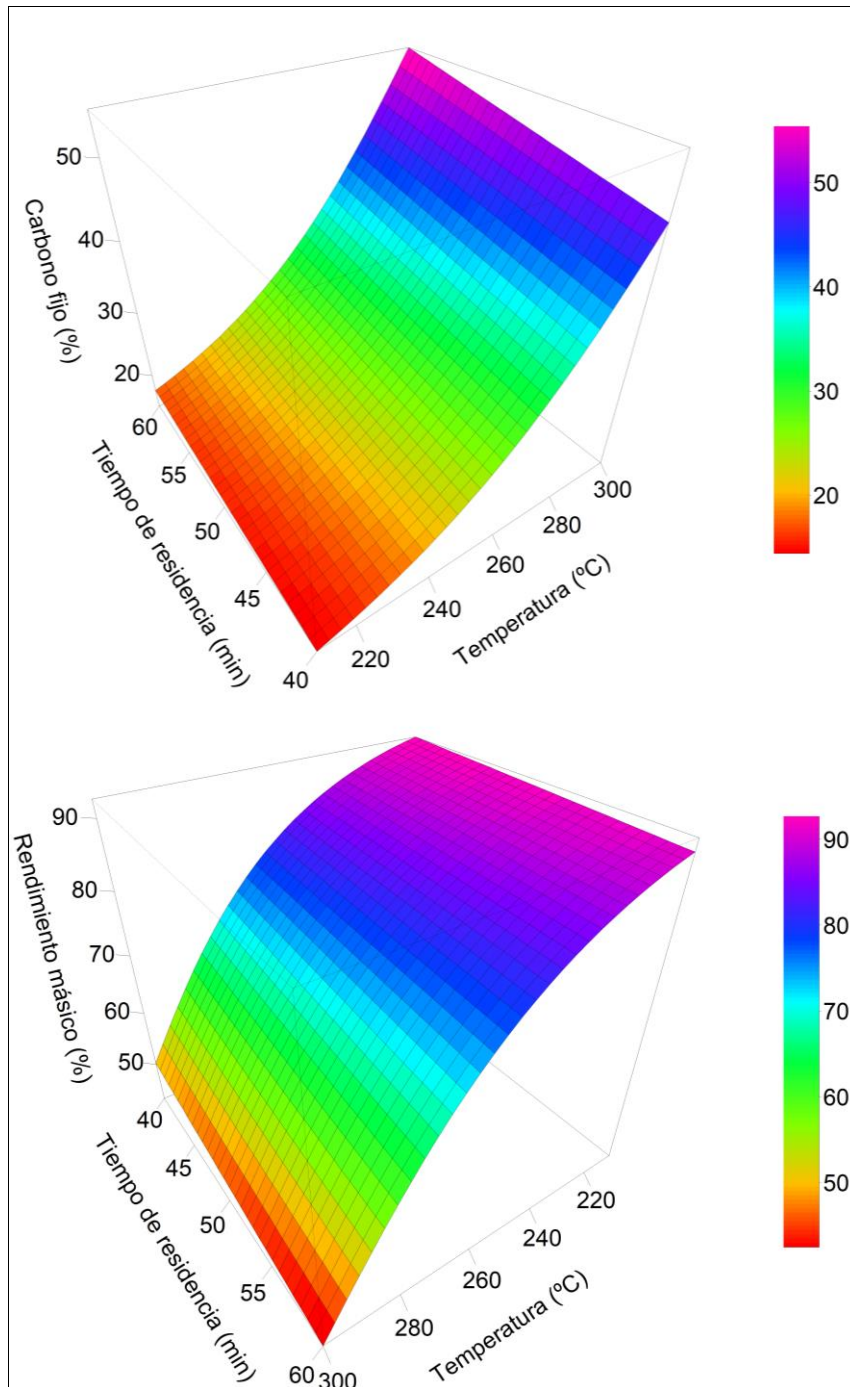
Figura 43. Valores observados versus valores predichos para las seis variables en estudio, en comparación con la línea objetivo Predicho = Observado. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los poderes caloríficos, al igual que con los pellets de pino, sólo tres estimaciones de parámetros fueron significativas: las que afectan al tiempo de residencia y al producto del tiempo de residencia por la temperatura, junto con el intercepto.

La influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en las respuestas variables se evaluaron trazando gráficos tridimensionales de la superficie de respuesta (Figura 44).

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP





3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

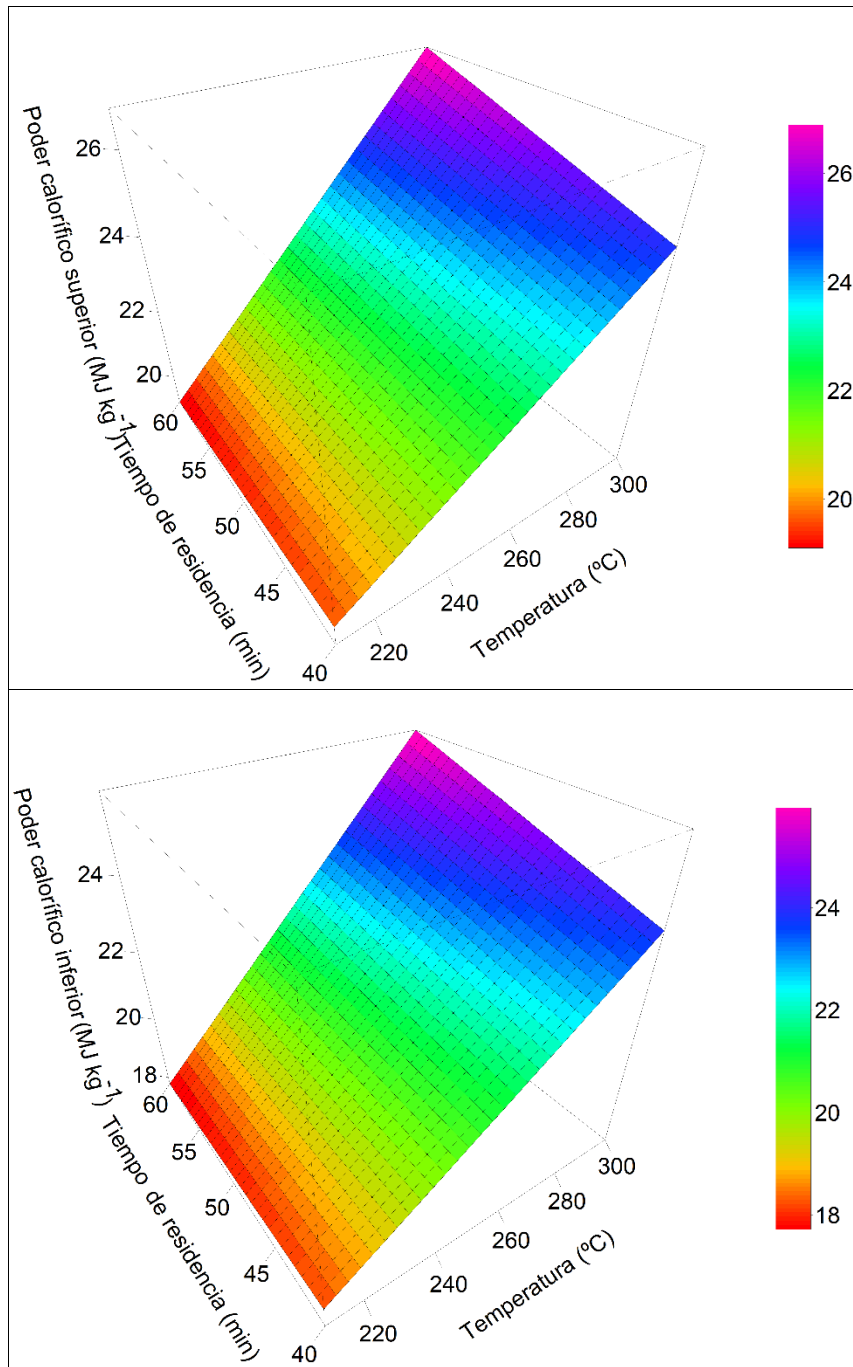


Figura 44. Superficies de respuesta de cenizas, volátiles, carbono fijo, rendimiento en masa y poderes caloríficos superior e inferior para los pellets con mezcla de eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que con los pellets de pino los modelos propuestos permiten la definición de la severidad de la torrefacción, como una combinación de t y T , que proporciona los valores deseados de las propiedades energéticas. Una aplicación gráfica de los modelos ajustados para A y PCI_h puede proporcionar isóneas para ambas variables al trazar la temperatura de torrefacción (T , °C) en el eje X y el tiempo de residencia (t , min) en el eje Y. Si se consideran valores constantes para A y PCI_h , resolver t proporciona isóneas que podrían obtenerse analíticamente (ecuaciones 16 y 17).

$$t = \frac{\ln\left(\frac{100-A}{A}\right) - 0.05003T + 1.128 \cdot 10^{-4}T^2}{-2.081 \cdot 10^{-5}T} \quad (16)$$

$$t = \frac{PCI_h - 19.54}{-0.3468 + 0.00151T} \quad (17)$$

La Figura 45 muestra las isóneas obtenidas para tres valores constantes del contenido de cenizas y para tres valores de poder calorífico inferior en base húmeda al igual que la Figura 42.

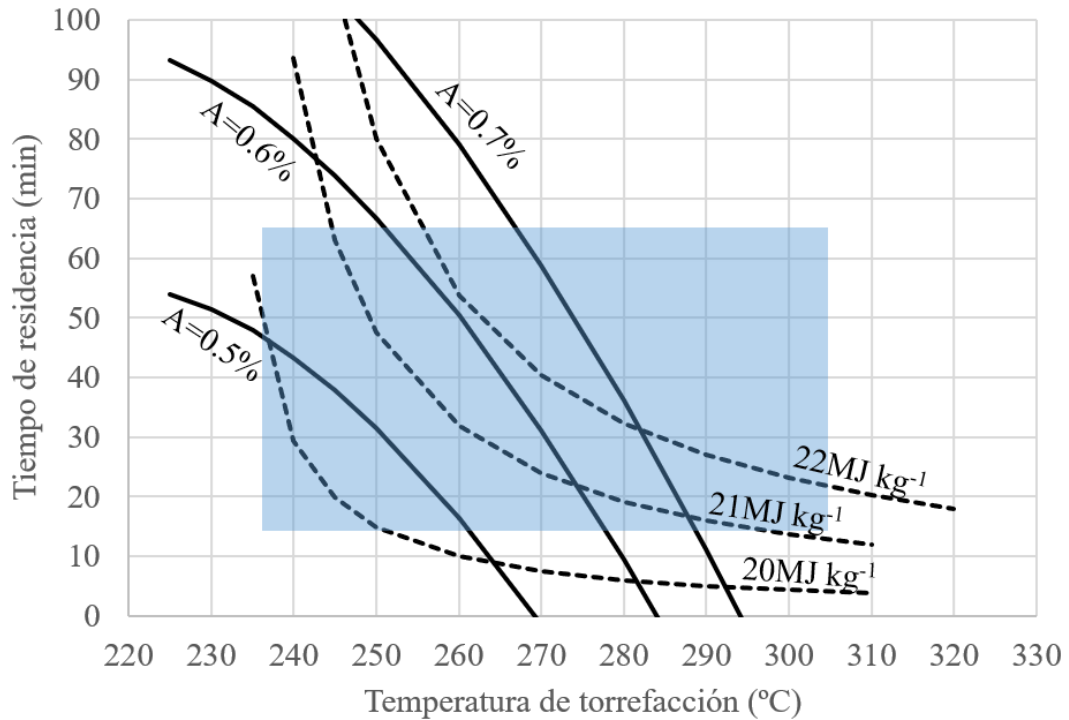


Figura 45. Isóneas para el contenido de cenizas (líneas continuas, A, %) y poder calorífico neto (líneas de puntos, PCI_h , $MJ\ kg^{-1}$) derivado de los modelos de regresión obtenidos para pellet de mezcla pino y eucalipto. El área sombreada se refiere a las combinaciones de temperatura de torrefacción ($^{\circ}C$) y tiempo de residencia (min) cubiertos por los datos, donde el modelo podría proponerse para predicciones. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que con los pellets de pino, se puede proponer un rango aproximado de temperaturas de entre 260 y 270 $^{\circ}C$ y tiempos de residencia de 50 a 60 min como las combinaciones que más probablemente producirían pellets torrefactos con las propiedades deseadas.

3.3.7 Propiedades mecánicas y densidad energética

En este apartado se van a mostrar los resultados de las propiedades mecánicas de los pellets crudos estudiados y de los pellets TAP 240-40 para las tres mezclas ya que se han considerado los más interesantes debido a que a este temperatura y tiempo es cuando se empieza a notar grandes cambios significativos en las propiedades energéticas de los pellets. Además, otra razón por la que únicamente se estudia un rango de temperatura y tiempo se debe al equipamiento disponible y

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

a la gran cantidad de pellets crudos que se necesitarían, y por tanto material y tiempo inasumible en este trabajo.

Las propiedades mecánicas que se han estudiado han sido la densidad del pellet (ρ), la densidad a granel (BD), la durabilidad mecánica (DU) y el porcentaje de finos (FI) (Tablas 10 y 11).

Tabla 10. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets de control. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	ρ (kg/m ³)	BD (kg/m ³)	DU (%)	FI (%)
100P	1154 (23) b	628 (2) b	98.46 (0.12) a	0.35 (0.03) a
90P/10E	1130 (36) b	620 (2) c	98.54 (0.14) a	0.24 (0.02) b
60P/40E	1210 (35) a	639 (2) a	98.30 (0.18) a	0.26 (0.01) b

Tabla 11. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	ρ (kg/m ³)	BD (kg/m ³)	DU (%)	FI (%)
TAP 100	1012 (59) a	560 (2) b	96.04 (0.55) a	0.21 (0.01) a
TAP 90/10	995 (79) a	550 (2) c	97.65 (0.22) a	0.14 (0.01) b
TAP 60/40	1017 (35) a	574 (1) a	96.53 (0.34) a	0.15 (0.02) ab

Se observa claramente que la densidad del pellet y la densidad a granel aumentaron de manera significativa en la muestra de pellet crudo con mayor contenido en eucalipto. No hay diferencias significativas en la durabilidad mecánica de los pellets de madera sin tratamiento térmico ni en los torrefactos. Por último, los finos en las muestras con eucalipto son menores a los pellets únicamente hechos de pino.

Respecto a los pellets TAP, cabe destacar la disminución tanto de densidad de pellet y densidad a granel, además de la reducción de durabilidad mecánica y del contenido de finos. Estos cambios negativos en las propiedades se deben

principalmente a la pérdida de estructura que sufren los pellets durante la torrefacción, que conlleva a la pérdida de masa y dureza del biocombustible.

La última propiedad estudiada fue la densidad energética (ED) (Figuras 46 y 47) a partir de los valores de densidad a granel y poder calorífico inferior en base húmeda, este parámetro nos aporta la energía que produce un volumen determinado de pellets, por tanto, cuanto mayor sea esta energía mayor calidad del biocombustible.

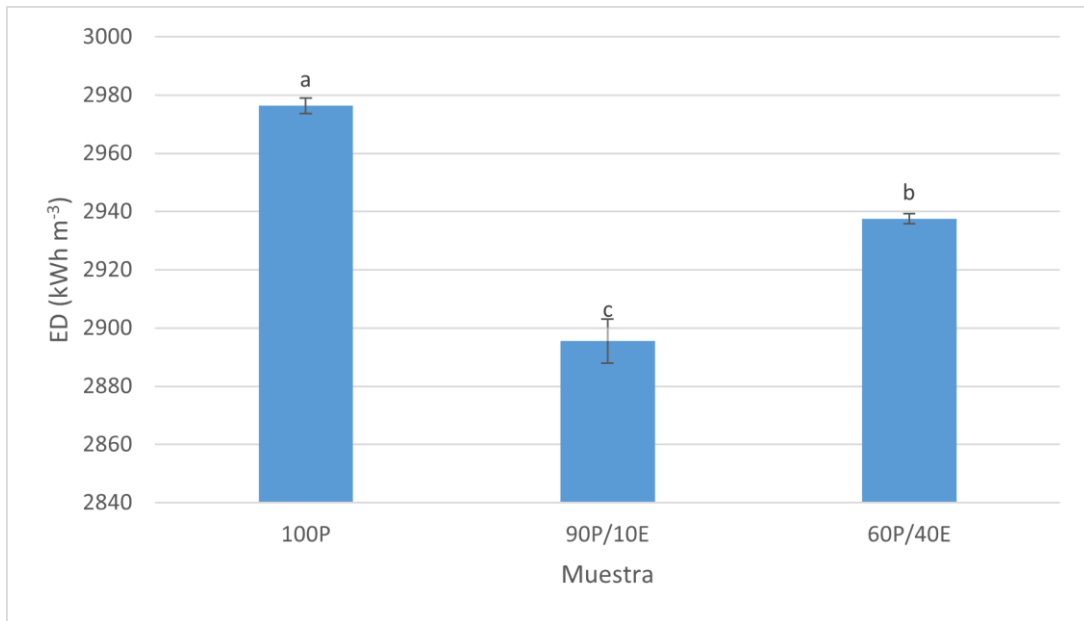


Figura 46. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets crudos. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

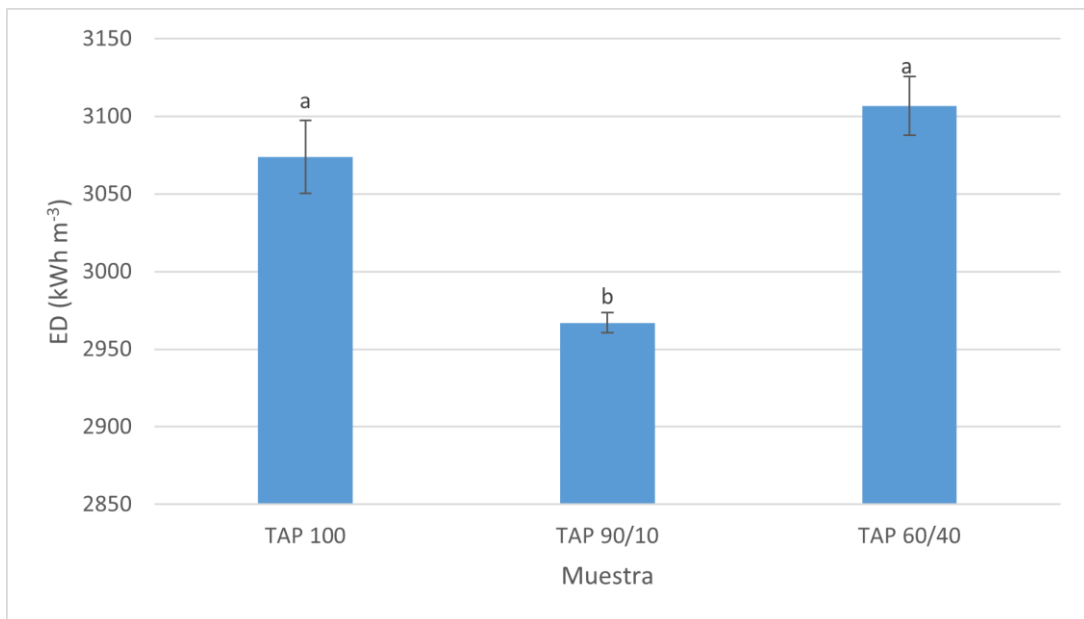


Figura 47. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

Los resultados obtenidos en este estudio se compararon con los de varios estudios en los que se aplicó el proceso TAP. Las combinaciones óptimas de temperatura y tiempo de residencia concluidas en los diferentes estudios se resumen en la Tabla 12. Es importante destacar que, en cuanto a la comparación directa, algunos de los estudios no especificaron el material crudo del que se hicieron los pellets y otros no identificaron las especies dentro del género *Pinus* (Tabla 12). Además, la base de cálculo para las propiedades porcentuales o los valores de poder calorífico no siempre es evidente. Solo unos pocos estudios informaron sobre todo el rango de propiedades determinadas en el presente estudio.

Tabla 12. Diferentes estudios en los que las propiedades de pellets torrefactos producidos bajo diferentes condiciones fueron determinadas. Se muestran las condiciones óptimas de torrefacción de cada estudio. Fuente: Elaboración propia.

Autores	Especies	Condiciones óptimas de torrefacción	Aumento de PCS ₀ (%)	A (%)	DU (%)	RM (%)
Zhang et al. (2020)	Paja de soja	250 °C, 45 min	8.38	4.20	92.78	75.00
	Serrín de pino	300 °C, 45 min	14.52	3.80	87.53	60.50
Ghiasi et al. (2014)	Abeto de douglas	260 °C, 15min	17.65	-	97.00	-
Yu et al. (2021)	Caragana	275 °C, 20 min	9.44	4.17	-	71.07
Shang et al. (2012)	Pino silvestre	250 °C, 60 min	16.22	-	95.00	87.25
Setkit et al. (2020)	Leucaena	260 °C, 30 min	21.20	5.60	-	77.90
Chicaiza & Palacios (2020)	Mangle rojo	230 °C, 60 min	26.40	14.08	-	75.94
Manouch ehrenejad & Mani (2018)	Pino amarillo	250 °C, 30 min	12.67	0.83	86.90	85.20
	Mezcla	250 °C, 30 min	14.41	1.70	83.70	77.79
	White pellet (pellet blanco)	270 °C, 30 min	20.54	-	-	83.06
Peng et al. (2014)	Brown pellet (pellet marrón)	270 °C, 30 min	15.34	-	-	82.47
	Pino	270 °C, 30 min	13.83	-	-	79.11
Yu et al. (2019)	Desconocida	250 °C, 30 min	22.38	3.05	-	76.11
Manatura et al. (2016)	Cáscara de arroz	250 °C, 60 min	7.33	16.98	-	62.00
	Miscanthus	270 °C, 45 min	-	-	95.00	80.00
Gilvari et al. (2020)	Chopo	285 °C, 45 min	-	-	89.00	75.00

	Madera de tronco (Píceas de Noruega)	275 °C, 30 min	8.04	0.36	97.08	77.40
Wang et al. (2020)	Corteza (Píceas de Noruega)	275 °C, 30 min	11.82	4.18	96.08	71.30
	Residuos forestales (Píceas de Noruega)	275 °C, 30 min	12.08	3.14	96.00	70.80
Este estudio	Pino radiata	240 °C, 40 min	6.30	0.47	96.04	84.47

Las condiciones de torrefacción más comúnmente propuestas como óptimas en estudios anteriores son 250-275 °C durante 30-45 minutos, combinaciones que son diferentes a las condiciones óptimas recomendadas en el presente estudio. Los aumentos porcentuales en el PCS₀ son mayores que los valores obtenidos en el presente estudio, aunque la comparación se restringe a pellets de madera de coníferas. Los aumentos en el poder calorífico para pellets de pino (*Pinus sylvestris* y otras especies no especificadas, Tabla 12) son mayores que los observados en el presente estudio para pellets de *Pinus radiata* (Zhang et al., 2020). Sin embargo, se obtuvieron resultados similares para madera de tronco de pícea de Noruega (Wang et al., 2020). Aunque varios estudios han reportado PCS y PCI, los estudios que especifican si los cálculos de estas variables se expresan en base seca o en base según se recibe (húmeda) son escasos.

El contenido de humedad de los pellets torrefactos no se reporta generalmente en la literatura relevante. En el presente estudio, todos los tratamientos de torrefacción presentaron humedad cero. La biomasa con baja humedad es muy estable durante el almacenamiento y es menos probable que se deteriore. Además, el transporte de biomasa torrefactada es más barato que el transporte de biomasa cruda higroscópica debido a la naturaleza hidrofóbica del producto torrefacto (Chen et al., 2015). No obstante, para su aplicación práctica, las condiciones de almacenamiento y transporte inducirían cierta rehidratación. Dado que la energía de combustión disminuye considerablemente con el aumento del contenido de humedad, el efecto de la torrefacción en los valores de poder calorífico se indica mejor mediante el PCI_h.

3.3.8 Absorción de humedad

La hidrofobicidad de los pellets torrefactados, o capacidad de repeler el agua, es un atributo significativo que los distingue de los pellets convencionales, los cuales tienden a ser más hidrofílicos, es decir, a absorber agua. Este fenómeno se debe a las modificaciones estructurales y químicas que experimenta la biomasa durante el proceso de torrefacción, lo que resulta en un producto final con propiedades físicas mejoradas, incluida una mayor resistencia a la absorción de humedad.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

En este trabajo se ha realizado durante un año un ensayo de reabsorción de humedad por parte de los pellets, comparándose el material sin torrefactar con distintas composiciones (100P, 90P/10E y 60P/40E) con los pellets torrefactados (TAP 100P, TAP 90P/10E y TAP 60P/40E). Una muestra de 15 g de pellets de cada composición se mantuvo en el exterior, pero resguardado de la lluvia en el Campus Vida de la Universidad de Santiago de Compostela desde noviembre de 2022 a noviembre de 2023. El peso de cada muestra se obtuvo con una periodicidad diaria, determinándose la evolución del contenido de humedad en base húmeda una vez que se secaron las muestras en estufa para obtener el peso seco.

El contenido de humedad inicial de las muestras fue nulo en el caso de pellets torrefactados (TAP, torrefaction after pelletization), mientras que los pellets sin torrefactar presentaron niveles iniciales que oscilaron entre 6.24 y 7.45 %, según la composición. Adicionalmente, se han tomado los valores de humedad relativa media del aire a 1.5 m de altura (HRM1.5) de la estación meteorológica de Santiago EOAS, que dista 200 m de la ubicación del ensayo. Los datos disponibles para periodicidad diaria se exportaron de la web: www.meteogalicia.es y los valores obtenidos se han representado en la Figura 48.

Los resultados de la evolución del contenido de humedad se muestran en las figuras 49 y 50 para pellet sin torrefactar y para TAP, respectivamente. Se aprecia para el pellet sin torrefactar una buena estabilidad del contenido de humedad, que sube muy ligeramente durante el primer invierno, sin superar prácticamente un nivel del 8 % de humedad. Debe tenerse en cuenta que, durante el primer mes de mantenimiento en condiciones externas, noviembre de 2022, el valor medio de HRM1.5 fue de 87.2 %, con un mínimo de 69 %. Las pautas de variación que se observan en la Figura 48 son paralelas entre las 3 composiciones.

A diferencia de los pellets sin torrefactar, en los pellets TAP se observa un claro aumento de su contenido de humedad en el primer mes de toma de datos. Se trata de pellets completamente secos que alcanzan en las primeras semanas de exposición un contenido de humedad próximo a 5.5 %. A partir de ese momento la humedad de los pellets se estabiliza y varía conforme lo hace el valor de la humedad ambiental al igual que los pellets no torrefactados, aunque se mantiene una diferencia entre ambos que oscila entre 1 y 2.5 %, siempre favorable a los TAP.

Según diversos estudios, la torrefacción conlleva una disminución en la capacidad de los pellets para absorber agua, lo que se traduce en una mayor estabilidad dimensional y una mejor conservación de la calidad del pellet a lo largo del tiempo. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Wang et al. (2020) demostraron que la torrefacción de pellets de madera reduce significativamente su capacidad de absorción de agua en comparación con los pellets convencionales (de madera sin torrefactar).

Autores como Chen et al. (2015) han señalado que, durante el proceso de torrefacción, la estructura porosa de la biomasa se modifica, disminuyendo los grupos hidroxilos que son responsables de la interacción con el agua. Esto resulta en una superficie menos polar y más resistente a la humedad. Además, Niu et al. (2019) han destacado que la descomposición de la hemicelulosa, la celulosa y la lignina durante la torrefacción reduce la capacidad de los pellets para retener el agua, lo que contribuye a su hidrofobicidad.

En resumen, la hidrofobicidad de los pellets torrefactados, resultado de la modificación estructural y química durante la torrefacción, representa una ventaja significativa al ofrecer una mayor estabilidad dimensional y una mejor conservación de la calidad del pellet en comparación con los pellets convencionales, lo que los hace más adecuados para aplicaciones donde la resistencia a la humedad es crucial.

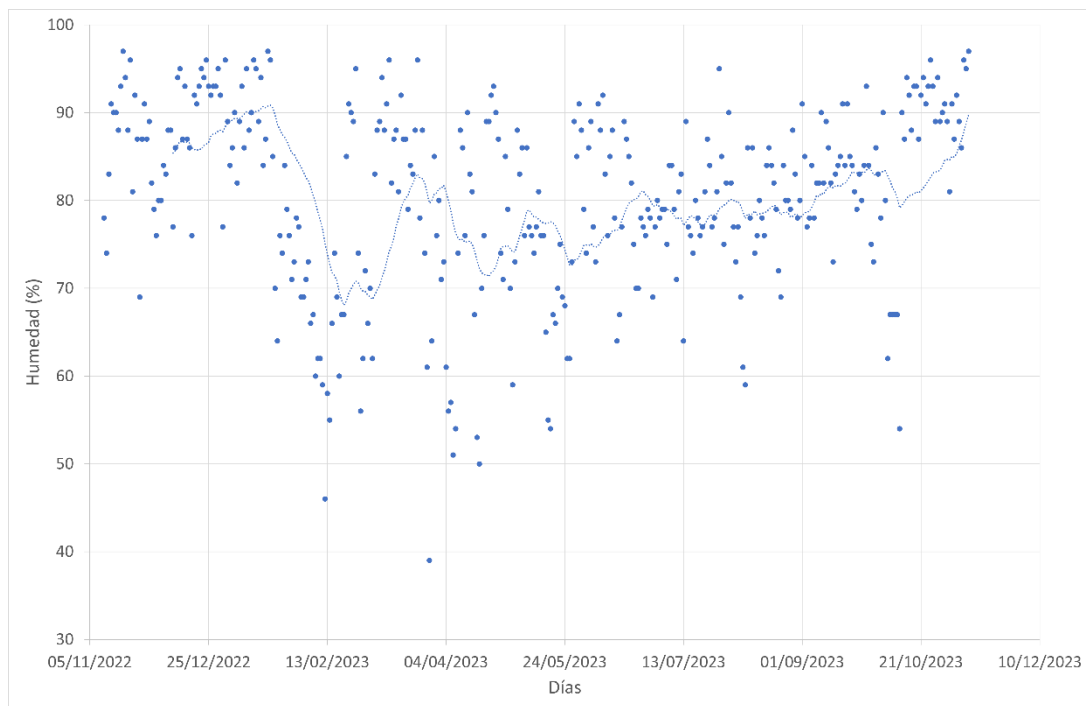


Figura 48. Humedad relativa media del aire a 1.5 m de altura de noviembre de 2022 a noviembre de 2023.
Fuente: Elaboración propia.

3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS SOBRE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE DIVERSAS MEZCLAS DE PELLETS: PROCESO TAP

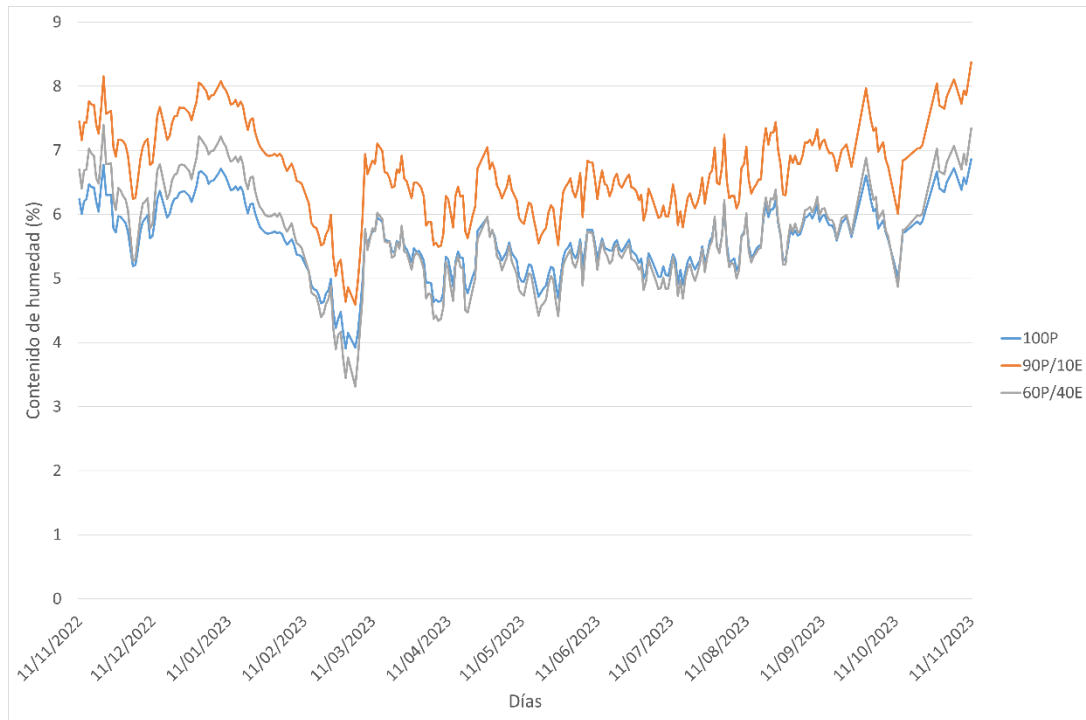


Figura 49. Evolución de la humedad de los pellets de control durante un año. Fuente: Elaboración propia.

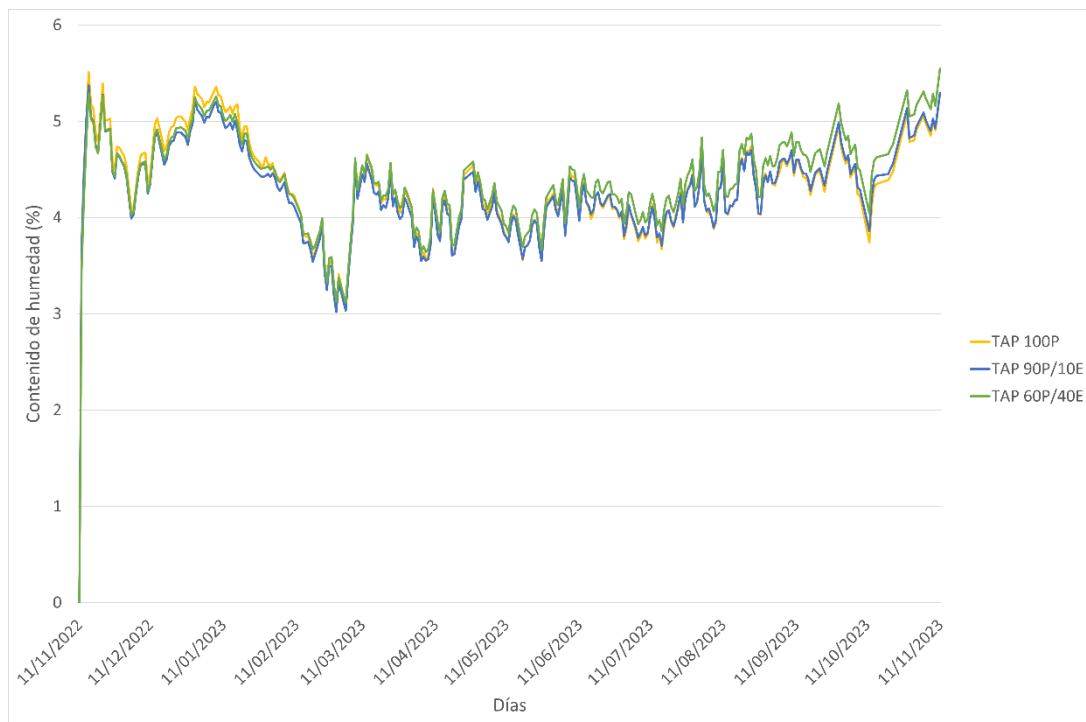


Figura 50. Evolución de la humedad de los pellets TAP durante un año. Fuente: Elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

RESUMEN

En esta parte del trabajo, se escogió la severidad de torrefacción 240 °C y 40 minutos para torrefactar astilla de pino y de eucalipto y posteriormente pelletizarlas utilizando un 2 % de aglutinante (almidón de maíz) para realizar tres mezclas 100P, 90P/10E y 60P/40E. Al igual que en el capítulo anterior se determinaron las propiedades energéticas y la composición elemental analizando 18 elementos diferentes de los pellets producidos a partir de madera previamente torrefactada.

4.1 Introducción

Los pellets de biomasa obtenidos a partir de astilla de madera torrefactada (proceso TOP, Torrefaction before Pelletization) han evolucionado considerablemente en la última década, representando una innovación significativa en el ámbito de las fuentes de energía renovable. Esta transformación ha dado lugar a un producto final con propiedades mejoradas y una gama de beneficios prácticos y medioambientales que los distinguen de los pellets convencionales de biomasa (Agar, 2017).

En el estado actual, los pellets producidos mediante astilla de madera torrefactada han generado un gran interés en la industria energética debido a sus características mejoradas. La densificación de la biomasa torrefactada supone modificaciones de la estructura y propiedades que producen finalmente combustibles con una densidad energética, contenido de humedad y contenido en carbono fijo similares a los de carbones minerales de bajo grado (Butler et al., 2023).

Uno de los aspectos más destacados de estos pellets es su mayor densidad energética y poder calorífico en comparación con los pellets convencionales. Este incremento en la densidad de energía se traduce en una mayor eficiencia y rendimiento en aplicaciones de combustión, como la generación de calor y energía en instalaciones residenciales, industriales y comerciales (Michel et al., 2011a, 2011b).

Asimismo, los pellets de madera torrefactada exhiben propiedades de resistencia a la degradación biológica y a condiciones climáticas exteriores que son superiores respecto del pellet sin tratamiento térmico (van der Stelt et al., 2011). Sin embargo, la degradación térmica de la lignina durante la torrefacción reduce su capacidad ligante, lo que se traduce en una menor durabilidad de este tipo de pellets si no se emplean agentes aglutinantes adicionales (Butler et al., 2023). Una buena elección del agente aglutinante resulta por tanto esencial para obtener mayor resistencia al almacenamiento, transporte y manipulación. Una mayor durabilidad mecánica es necesaria para aplicaciones donde la estabilidad física es esencial.

Otro aspecto que destacar es su menor contenido de humedad y mayor resistencia a la absorción de agua, lo que los hace más estables y menos propensos a la degradación debido a la humedad ambiental. Esta hidrofobicidad los convierte en una opción más confiable y de almacenamiento más prolongado en comparación con los pellets tradicionales (van der Stelt et al., 2011).

Además, la producción de pellets a partir de astilla de madera torrefactada se ha perfilado como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El uso de biomasa proveniente de fuentes renovables contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, por tanto, a la mitigación del impacto ambiental.

4.2 Material y métodos

4.2.1 Biomasa

Las muestras estudiadas en esta parte de la tesis son las astillas de pino y eucalipto torrefactas y los posteriores pellets producidos con dichas astillas en tres mezclas y una severidad (240 °C/40 min): 100 % pino (100P), 90 % pino y 10 % eucalipto (90P/10E) y 60 % pino y 40 % eucalipto (60P/40E).

4.2.2 Proceso de torrefacción

Se torrefactaron 30 kg de cada tipo de astilla de granulometría <4 mm en una atmósfera con oxígeno limitado. Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta la temperatura deseada a una ratio de calentamiento inferior a 15 °C/min al igual que con los pellets en el capítulo anterior. Tras la torrefacción, las muestras se enfriaron en un desecador con sílica gel y se almacenaron en botes cerrados herméticamente para evitar la posible absorción de humedad de las muestras, para su posterior análisis.

4.2.3 Proceso de pelletización

El proceso de producción de pellets a partir de madera torrefacta de pino y eucalipto es un procedimiento que involucra pasos clave para transformar esta materia prima tratada en pellets compactos y uniformes. La torrefacción de la madera a 240 °C durante 40 minutos modifica sus características físicas y químicas, reduciendo su contenido de humedad y volátiles, lo que mejora su densidad y poder calorífico, sin embargo, esto puede dificultar su pelletización. Para superar este desafío, se ha agregado un 2 % de almidón de maíz (mezclado con agua) con el fin de mejorar la aglutinación y facilitar la formación de los pellets en la pelletizadora Amandus Kahl 14-175.

El almidón y la lignina son los aglutinante más comunes y conocidos a la hora de pelletizar materia torrefacta. Butler et al. (2023), estudiaron las diferencias entre emplear diferentes aglutinantes orgánicos, inorgánicos y de origen petroquímico, entre los que se encontraban los dos anteriormente mencionados y además otra serie de productos como lignosulfatos, proteína, melazas, aceites y grasas, aceite de resina, entre otro muchos.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

Concluyeron que en general, los aglutinantes orgánicos muestran un mayor potencial de uso en pellets torrefactos. Esto se debe a la falta de información sobre posibles mejoras en la durabilidad al usar aglutinantes inorgánicos, el reducido poder calorífico, la toxicidad que generalmente es mayor y el aumento de cenizas y contaminantes. Además, los aglutinantes más prometedores son la lignina, el *biomass tar*, el *tall oil pitch* y la cal. Debido a la naturaleza altamente competitiva de los productos energéticos, es esencial que el coste del aglutinante sea bajo.

Los pellets se produjeron en una pelletizadora de matriz plana de longitud de canal de compresión de 24 mm (relación de compresión 4:1). Con la ayuda de los rodillos (con una velocidad media de giro de 1650 rpm) se presiona la mezcla que pasa por unos orificios cilíndricos de 6 mm de diámetro formando los pellets de madera torrefacta con una longitud de 20-22 cm.

Al igual que con los pellets de madera sin tratamiento se evita alcanzar los 80 °C de temperatura media en la matriz para evitar posibles daños en la maquinaria. Para la producción de 5 kg de una clase de pellet se invierte más de 1 hora de tiempo debido a la complejidad de pelletizar madera torrefacta de pino y eucalipto y la necesidad de calentar la matriz, ya que al estar completamente deshidratada debe irse humectando poco a poco con agua destilada para conseguir que los pellets resbalen a través de los orificios obteniendo pellets compactos y de buena dureza.

La tasa de producción de pellets fue de 8 kg h⁻¹ aproximadamente, se emplea media hora en calentar la matriz y tras alcanzar el rango de temperaturas requerido (60-70 °C) se añade la mezcla de madera torrefacta de manera pausada para evitar el bloqueo de la matriz ya que con este tipo de biomasa se atasca de manera muy fácil. Un par de cuchillas cortan los cilindros (pellets) que se van extruyendo por los orificios. Los pellets se recogen en un recipiente y se dejan enfriar a temperatura ambiente durante 48 horas para mejorar su durabilidad y reducir su contenido de humedad al igual que con los pellets de madera sin torrefactar (García et al., 2019).

La mezcla de madera torrefacta con almidón (previamente homogeneizada durante 90 minutos en una mezcladora) tenía una humedad del 14-15 %. La presión y la temperatura aplicadas en la matriz ayudan a compactar y formar los pellets, y en especial el almidón de maíz que es un aglutinante natural que facilita el proceso de pelletización de la madera que ha perdido la estructura al ser sometida a la torrefacción.

Durante el proceso de pelletización, se ajustaron los parámetros como la temperatura y la velocidad de giro para lograr la mejor calidad de pellets en cada una de las tres mezclas: 100 % pino, 90 % pino y 10 % eucalipto, y 60 % pino y 40 % eucalipto.

4.2.4 Análisis de las propiedades de las astillas y de los pellets

Se analizaron tanto las muestras de astillas torrefactas como las muestras de pellets, ambas se molieron para pasar a través de un tamiz de 0.5 mm al igual que en el capítulo anterior y se siguió el mismo procedimiento.

Se midió el contenido de humedad (CH) midiendo el peso inicial de la muestra y el peso final tras el proceso de secado (UNE-EN ISO 18134-1). El contenido de cenizas se determinó tras la combustión a 550 °C siguiendo la UNE-EN ISO 18122. La materia volátil (MV, %, base seca) se determinó según la norma UNE-EN ISO 18123 mediante la calcinación de las muestras en una mufla a 900 °C. El carbono fijo (CF, %, base seca) se obtuvo mediante la diferencia de los contenidos de cenizas y volátiles.

También se determinó la composición elemental para las astillas y los pellets TOP para posteriormente calcular el poder calorífico inferior en base húmeda. Los contenidos de N, C, H y S fueron analizados por combustión en un analizador elemental LECO (modelo Truspec) siguiendo las normas UNE-EN ISO 16948 y UNE-EN ISO 16994. El contenido de oxígeno se calculó por diferencia. Todos los elementos se determinaron en base seca.

Las muestras fueron digeridas con HNO₃, HF y H₂O₂ en un horno microondas y las concentraciones de B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn se determinaron mediante ICP-MS (UNE-EN ISO 16967 y UNE-EN ISO 16968).

El poder calorífico superior (tal como se recibió o en base húmeda) se determinó experimentalmente mediante la combustión de 0.5 g de muestra en un calorímetro de combustión (IKA C5000), bajo una atmósfera de oxígeno (30 bar), siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125. El poder calorífico superior en base seca y los poderes caloríficos inferiores fueron calculados para su posterior estudio.

Por último, se determinaron las propiedades mecánicas de los pellets: densidad de pellet, densidad a granel, durabilidad mecánica y porcentaje de finos. Además, también se calculó un parámetro muy importante a nivel industrial: la densidad energética.

4.2.5 Análisis de las propiedades de las astillas y de los pellets

Los datos fueron analizados para determinar las medias y las varianzas. Se usó un ANOVA de una vía para determinar cualquier cambio significativo en las propiedades de las astillas torrefactas y los pellets TOP.

La clasificación de medias se realizó mediante el test de Tukey para determinar todas las diferencias posibles entre las muestras. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson para evaluar las relaciones entre variables. Los resultados de la prueba se consideraron significativos cuando $p < 0.05$. Todos los análisis se realizaron utilizando el paquete de estadística de Rstudio.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Análisis de las astillas torrefactas

Los valores medios (y desviaciones estándar) obtenidos en el análisis inmediato y los poderes caloríficos brutos (en base seca) y las concentraciones de los elementos más importantes para la materia prima utilizada para fabricar los pellets se muestran en la Tablas 13 y 14.

No se encontraron diferencias significativas en el contenido de volátiles y carbono fijo, a diferencia de las cenizas en las que sí hay una gran diferencia significativa entre la astilla torrefacta de pino y la de eucalipto, siendo en esta última 1.5 veces mayor a la de pino. Las astillas de pino destacan por poseer un poder calorífico superior anhidro, que fue 1.2 MJ kg^{-1} mayor que el producido por las astillas de eucalipto. En el caso de los PCI_h no se observaron diferencias significativas entre las astillas estudiadas.

La densidad a granel de la astilla torrefacta de eucalipto fue 15 kg m^{-3} mayor a la torrefacta de pino, también lo fue la densidad energética (72 kWh m^{-3} superior).

No se observaron diferencias significativas en los rendimientos máxicos y energéticos de las muestras.

Se observaron diferencias significativas ($p < 0.001$) en las concentraciones de Cl, N, Mn y Zn. Cabe destacar que la humedad de ambas astillas tras la torrefacción fue del 0 %.

Tabla 13. Análisis inmediato, poderes caloríficos y propiedades mecánicas de las astillas torrefactas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades	Astilla torrefacta de pino	Astilla torrefacta de eucalipto
Cenizas (%)	0.47 (0.02) b	0.71 (0.01) a
Volátiles (%)	79.05 (0.38) a	78.21 (0.37) a
Carbono fijo (%)	20.47 (0.36) a	21.08 (0.38) a
PCS_0 (MJ kg^{-1})	20.14 (0.07) a	19.99 (0.05) b
PCI_h (MJ kg^{-1})	18.91 (0.07) a	18.80 (0.05) a
BD (kg m^{-3})	204 (1) b	219 (2) a
RM (%)	90.78 (0.68) a	91.59 (0.41) a
RE (%)	95.40 (1.06) a	96.89 (0.66) a
ED (kWh m^{-3})	1072 (4) b	1144 (3) a

Tabla 14. Análisis elemental de las astillas torrefactas de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades	Astilla torrefacta de pino	Astilla torrefacta de eucalipto
N (%)	0.20 (0.01) a	0.19 (0.02) a
C (%)	51.37 (0.43) a	52.05 (0.34) a

H (%)	5.60 (0.08) a	5.48 (0.02) a
S (%)	0.025 (0.001) a	0.025 (0.001) a
O (%)	42.33 (0.37) a	41.56 (0.35) a
Cl (%)	0.006 (<0.001) b	0.012 (<0.001) a
B (mg kg ⁻¹)	2.70 (0.33) a	3.04 (0.36) a
Na (mg kg ⁻¹)	31.09 (3.03) b	337.83 (20.61) a
Mg (mg kg ⁻¹)	418.32 (65.02) a	412.25 (39.38) a
Al (mg kg ⁻¹)	44.21 (4.03) a	111.52 (62.00) a
Si (mg kg ⁻¹)	39.00 (3.57) a	141.15 (78.14) a
P (mg kg ⁻¹)	108.37 (17.61) a	138.04 (28.37) a
K (mg kg ⁻¹)	1588.12 (221.11) a	1946.44 (149.97) a
Ca (mg kg ⁻¹)	757.89 (140.27) a	562.15 (98.95) a
Mn (mg kg ⁻¹)	100.23 (19.25) a	25.47 (9.46) b
Fe (mg kg ⁻¹)	19.83 (0.24) a	54.35 (31.72) a
Cu (mg kg ⁻¹)	1.27 (0.10) a	1.31 (0.28) a
Zn (mg kg ⁻¹)	15.78 (2.25) a	6.22 (1.74) b

4.3.2 Análisis inmediato

En la Figura 51 se observa el contenido de humedad de los tres pellets estudiados. Se observa que no hay diferencias significativas entre las tres muestras, obteniendo valores entre entorno al 6 %, estos son muy similares a los contenidos de humedad de pellets convencionales de madera sin tratamiento térmico.

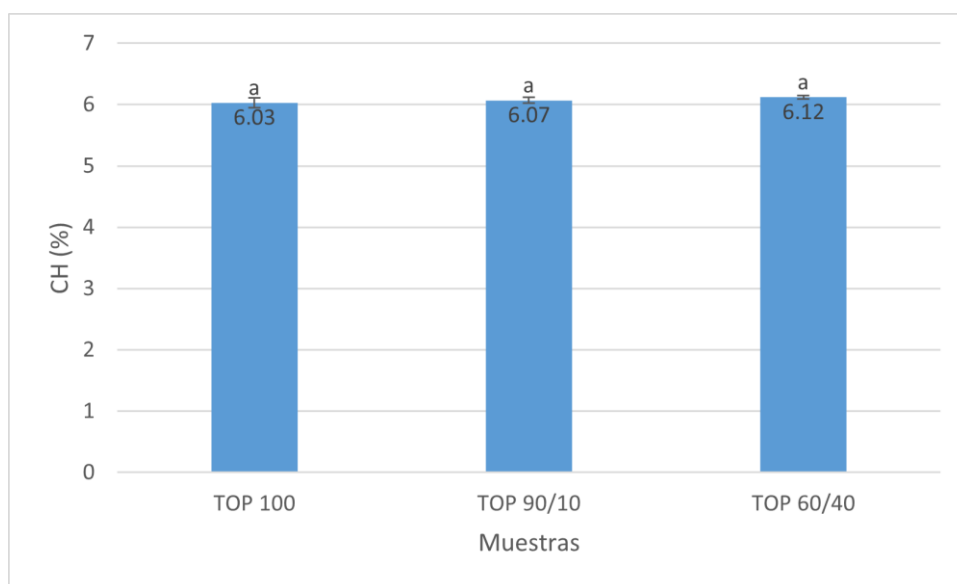


Figura 51. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de humedad en base húmeda. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

En cuanto al contenido de cenizas, volátiles y carbono fijo se refleja en las Figuras 52 a 54. El ANOVA reveló efectos significativos ($p < 0.001$) para las diferentes muestras.

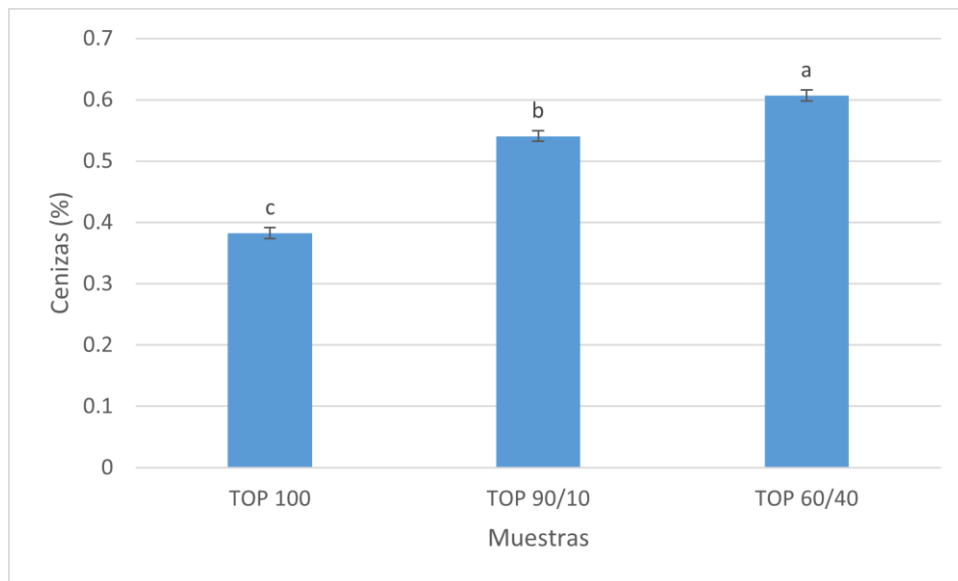


Figura 52. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de cenizas en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

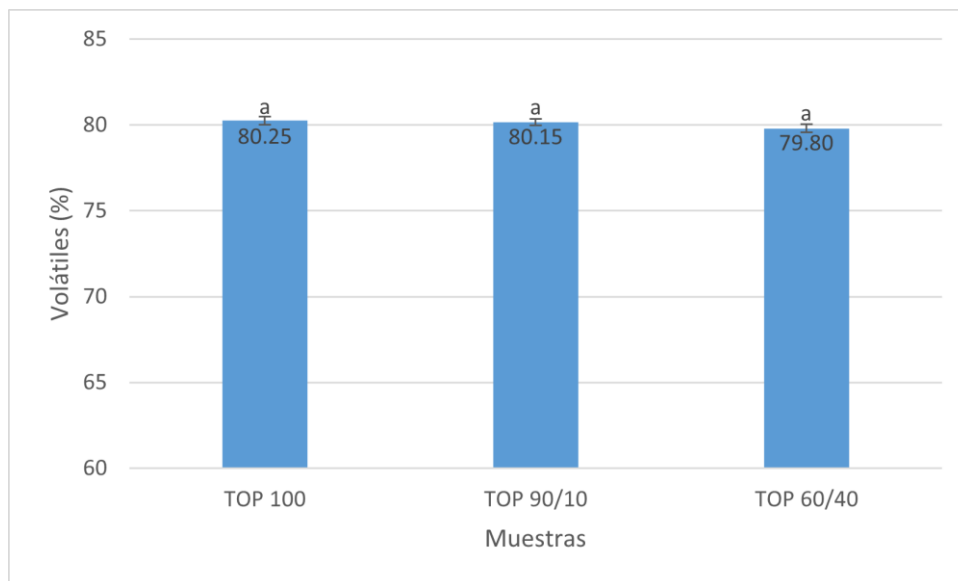


Figura 53. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del contenido de volátiles en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

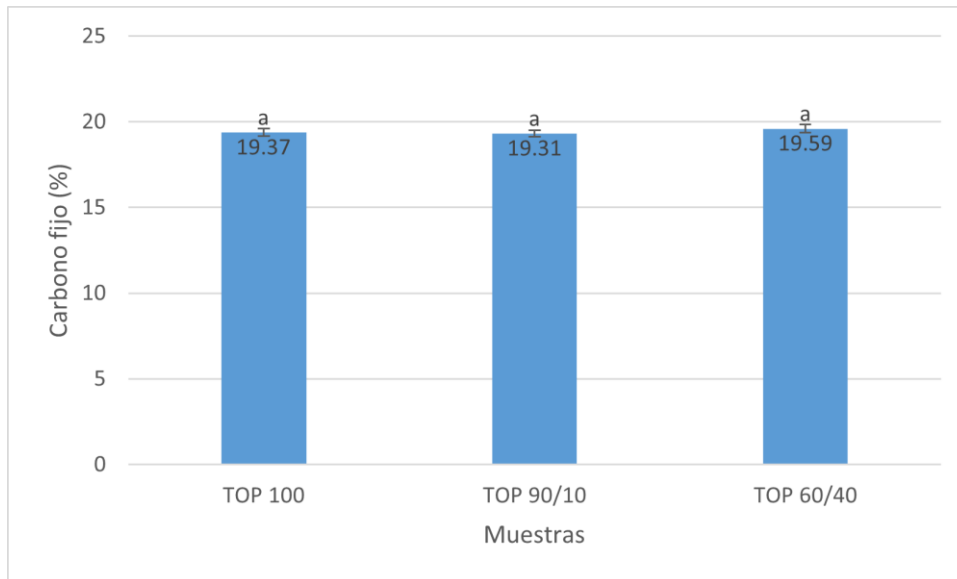


Figura 54. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del carbono fijo en base seca. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar el aumento del contenido de cenizas a medida que se aumenta el porcentaje de astilla de eucalipto torrefacto en la muestra, eso se justifica debido a que como se observó en la Tabla 13 el contenido de cenizas del eucalipto torrefacto es mucho mayor a la del pino, por tanto a medida que se añade el contenido de volátiles y carbono fijo disminuye aunque las diferencias observadas de estas variables no son significativas, al igual que no lo fueron en el análisis de propiedades de las astillas.

4.3.3 Análisis elemental

En cuanto a la composición elemental de los pellets TOP se refleja en las Tablas 15, 16 y 17. El ANOVA reveló efectos significativos ($p < 0.001$) para las diferentes muestras para la gran parte de los elementos analizados, siendo el patrón de variación particularmente claro para C, H, B, Ca, Mg y K cuyos valores aumentaron con el porcentaje de eucalipto torrefacto.

Los niveles de Cl para los pellets fueron muy inferiores a los limitados por la normativa, por lo que los pellets TOP presentan una gran ventaja frente a los pellets crudos estudiados en el capítulo anterior.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

Tabla 15. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	Cl (%)
TOP 100	0.18 (0.01) a	48.3 (0.21) b	6.25 (0.11) a	0.026 (0.001) a	44.8 (0.33) a	0.007 (<0.001) c
TOP 90/10	0.14 (0.03) a	48.6 (0.45) b	6.21 (0.03) a	0.024 (0.001) a	44.5 (0.49) a	0.007 (<0.001) b
TOP 60/40	0.18 (0.02) a	50.0 (0.13) a	5.74 (0.02) b	0.024 (0.001) a	43.5 (0.10) b	0.009 (<0.001) a

Tabla 16. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	B (mg kg ⁻¹)	Ca (mg kg ⁻¹)	Mg (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Na (mg kg ⁻¹)	Si (mg kg ⁻¹)
TOP 100	2.02 (0.42) b	602.6 (44.1) b	235.0 (13.6) b	908.0 (62.3) b	19.1 (0.9) c	81.8 (7.4) a
TOP 90/10	2.19 (0.20) b	616.8 (128.8) ab	248.0 (31.6) b	1005.1 (91.4) b	46.5 (7.7) b	52.3 (14.4) b
TOP 60/40	3.07 (0.33) a	801.9 (14.7) a	406.4 (5.2) a	1654.2 (27.9) a	137.4 (1.5) a	45.8 (1.6) b

Tabla 17. Valores medios (y desviaciones estándar) de las concentraciones de los diferentes elementos determinados en muestras de pellets. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Al (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)
TOP 100	30.6 (2.2) a	1.63 (0.80) a	13.0 (0.4) a	90.3 (9.1) b	28.6 (2.9) a	66.3 (4.3) a
TOP 90/10	20.2 (9.1) a	1.37 (0.40) a	22.0 (6.4) a	83.3 (18.4) b	29.4 (12.1) a	60.2 (9.2) a
TOP 60/40	28.2 (0.8) a	1.27 (0.01) a	22.2 (0.2) a	170.1 (3.1) a	27.7 (0.8) a	52.05 (0.5) a

4.3.4 Poder calorífico

Se observó un efecto significativo en las diferentes muestras para el poder calorífico ($p < 0.001$). La mezcla 60/40 mostró el valor más bajo. Como se esperaba, el poder calorífico superior (PCS₀) disminuyó a medida que se añadió astilla de eucalipto torrefacto (Figura 55), ya que como se observó en la Tabla 13 esta posee menos

energía por kilogramo que la de pino, asimismo el poder calorífico inferior húmedo (PCI_h) también disminuyó (Figura 56).

Sin embargo, los pellets TOP muestran peor poder calorífico superior anhidro y poder calorífico inferior en base húmeda que los pellets TAP para la misma temperatura y tiempo de residencia. Aunque los contenidos de carbono de los pellets TOP y TAP son muy similares, la diferencia en los poderes caloríficos recae principalmente al menor contenido de H y O de los pellets TAP (menor relación atómico H:C y O:C) y a la pérdida de humedad total estos frente a los TOP que contienen humedad.

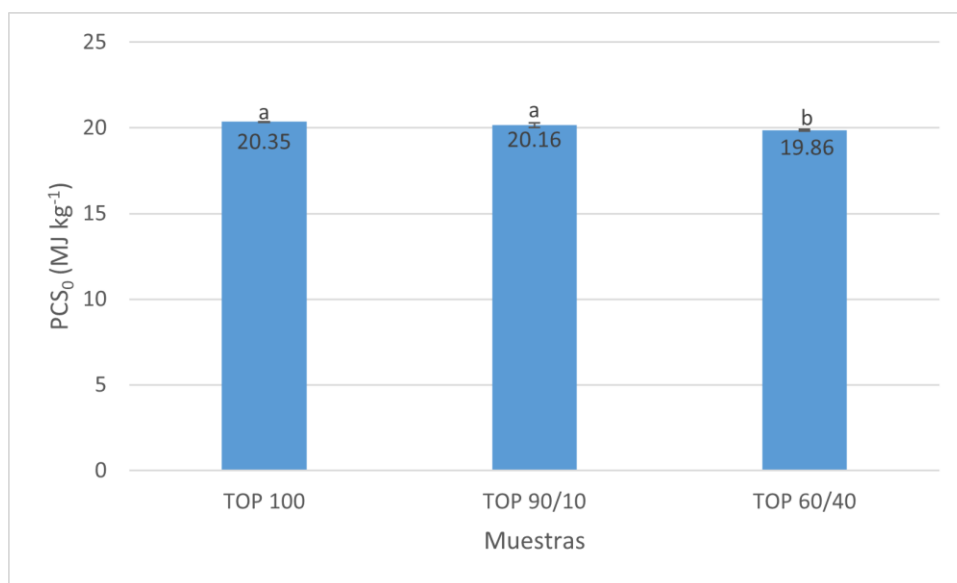


Figura 55. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico superior anhidro. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

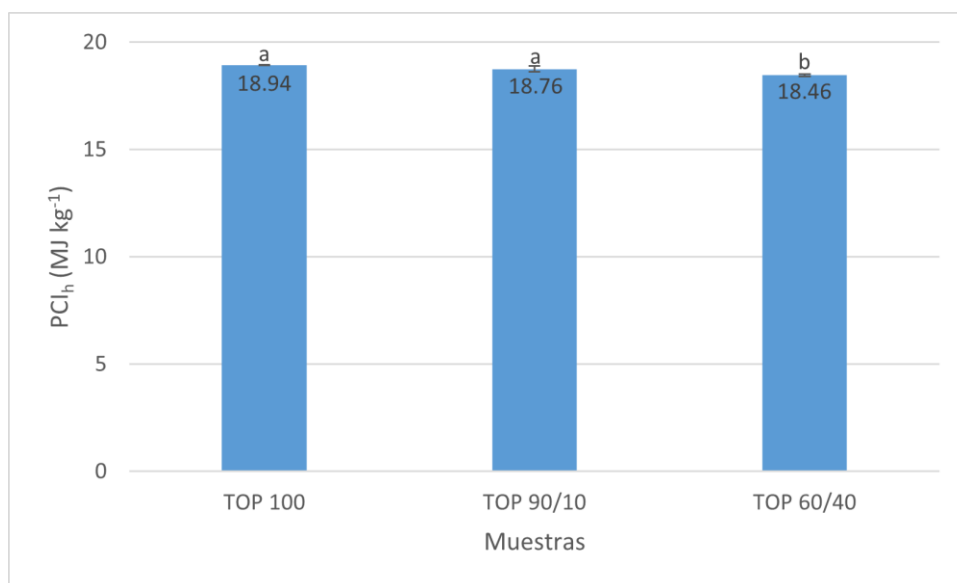


Figura 56. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del poder calorífico inferior en base húmeda. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

En cuanto a la norma UNE-EN ISO 17225-8, a la hora de comparar los poderes caloríficos netos de los TOP y TAP, se observa que los pellets TAP cumplirían para ser clasificados como TW2 y los TOP estarían al límite, pero no cumplirían.

El diagrama de van Krevelen (Figura 57) muestra que los tres pellets TOP se encuentran en el rango de biomasa. Estas muestras se encuentran en la misma zona que los TAPS 240-40 lo cual nos indica que para alcanzar zonas de mayores poderes caloríficos las temperaturas deben ser mayores para así aumentar el contenido de carbono y disminuir el de hidrógeno y oxígeno, de este modo las relaciones atómicas disminuirían.

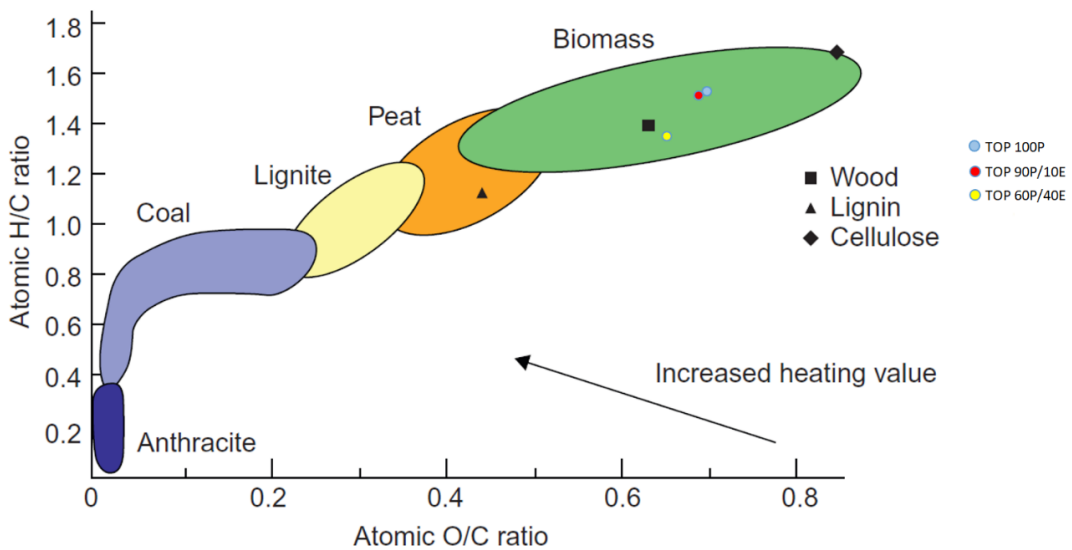


Figura 57. Diagrama de van Krevelen adaptado de Basu et al. (2013) para los datos de este estudio. La reproducción de la imagen ha sido autorizada.

4.3.5 Índice de álcali

Respecto al índice de álcali, la Figura 58 se muestra que un aumento en el porcentaje de astilla torrefacta de eucalipto induce un aumento del índice de álcali. Además, se observan diferencias significativas entre las muestras, sin llegar a superar el límite de 0.17 kg GJ^{-1} reportado por Miles et al. (1995).

Al igual que en los pellets TAP 240-40 se observa que el aumento de eucalipto es un claro indicativo de aumento del índice de álcali, por lo tanto se puede concluir que el límite de adición de eucalipto en la mezcla es un parámetro muy importante a la hora de evitar problemas de incrustaciones en las instalaciones.

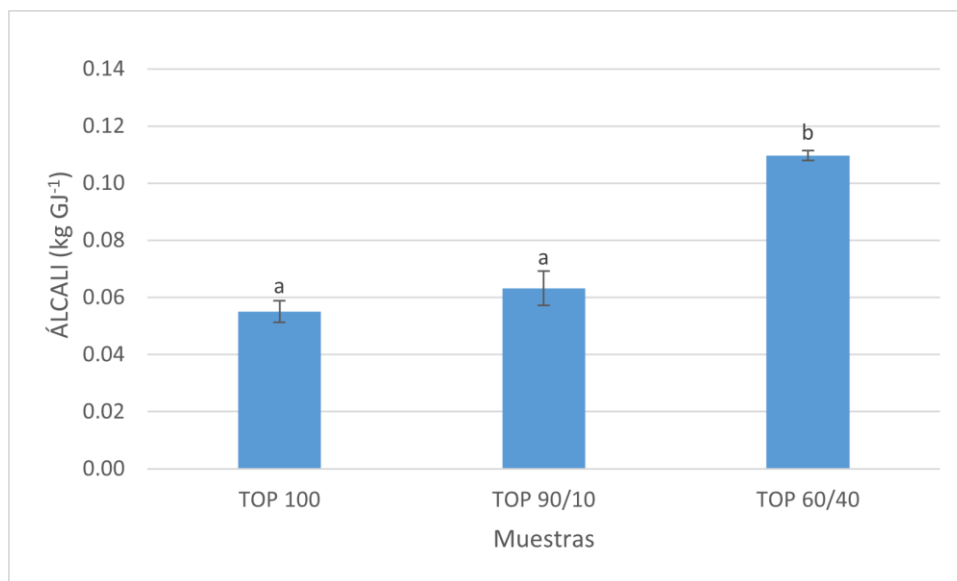


Figura 58. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) del índice de álcali. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

4.3.6 Propiedades mecánicas y densidad energética

Al igual que en capítulo anterior se han medido las propiedades mecánicas: densidad del pellet (ρ), la densidad a granel (BD), la durabilidad mecánica (DU) y el porcentaje de finos (FI) (Tabla 18).

Tabla 18. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	ρ (kg/m ³)	BD (kg/m ³)	DU (%)	FI (%)
TOP 100	1139 (60) b	625 (1) c	98.72 (0.10) a	0.22 (0.02) a
TOP 90/10	1206 (42) a	632 (1) b	98.67 (0.08) a	0.21 (0.04) a
TOP 60/40	1225 (31) a	643 (3) a	98.85 (0.06) a	0.22 (0.01) a

La densidad del pellet y la densidad a granel aumentaron significativamente ($p < 0.001$) con el aumento de la proporción de astilla torrefacta de eucalipto. Por el contrario, no se observaron diferencias significativas para la durabilidad mecánica y la cantidad de finos entre las diferentes muestras.

Comparando los procesos de torrefacción TOP y TAP (Tabla 19), cabe resaltar que pelletizar primero y después torrefactar muestra mejores propiedades mecánicas que el proceso inverso: mayor densidad de pellet y densidad a granel, durabilidad mecánica y menor porcentaje de finos. Estas diferencias fueron estudiadas previamente y reportadas por Ghiasi et al. (2014).

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

Tabla 19. Valores medios (y desviaciones estándar) de las propiedades mecánicas de los pellets TAP-TOP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA	ρ (kg/m ³)	BD (kg/m ³)	DU (%)	FI (%)
TOP 100	1139 (60) a	625 (1) a	98.72 (0.10) a	0.22 (0.02) a
TAP 100	1012 (59) b	560 (2) b	96.04 (0.55) b	0.21 (0.01) a
TOP 90/10	1206 (42) a	632 (1) a	98.67 (0.08) a	0.21 (0.04) a
TAP 90/10	995 (79) b	550 (2) b	97.65 (0.22) b	0.14 (0.01) b
TOP 60/40	1225 (31) a	643 (3) a	98.85 (0.06) a	0.22 (0.01) a
TAP 60/40	1017 (35) b	574 (1) b	96.53 (0.34) b	0.15 (0.02) b

En cuanto a la norma UNE-EN ISO 17225-8, únicamente los pellet TOP cumplirían las especificaciones en cuantos a densidad a granel ($BD \geq 600$) para ser clasificados como TW2, los TAP no cumplen ni para TW1 ni TW2. A lo que respecta a la durabilidad mecánica todos los pellets TOP y el TAP 90/10 cumplirían el límite para ser clasificados como TW1 y TW2. Por último, todos los pellets cumplirían el límite de finos.

La última propiedad al igual que en el apartado anterior fue la densidad energética (ED, Figura 59). Cabe destacar que no se observaron diferencias significativas para este parámetro en las tres muestras estudiadas.

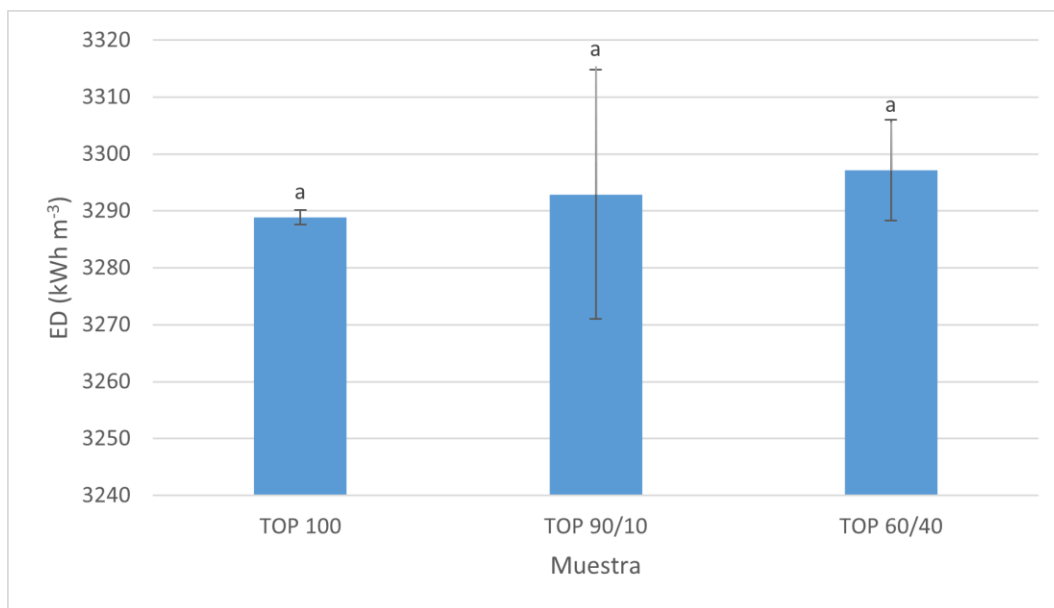


Figura 59. Valores medios (con las desviaciones estándar mostradas como barras de error) de la densidad energética de los pellets TOP. Las letras indican la clasificación media según la prueba de Tukey. Fuente: Elaboración propia.

En trabajos como el de Arteaga-Pérez et al. (2017), se estudió la pelletización de astilla de *Eucalyptus globulus* torrefactada a 255 y 265 °C y 22 minutos de tiempo de residencia empleando almidón como aglutinante. Los pellets resultantes tenían una humedad de 13.6 % y 11.9 % valores superiores a los restringidos por la normativa, al igual que el contenido en cenizas que fue bastante alto 9.9 y 4.2 % respectivamente. Por el contrario, la durabilidad mecánica varió entre 98.8 y 98.5 % para los pellets de 255 y 265 °C respectivamente, valores muy similares a los obtenidos en este estudio, la densidad a granel fue superior a la reportada en este trabajo con valores de 671 y 715 kg m⁻³ y por último la densidad energética que obtuvieron fue de 13.6 GJ m⁻³ (3778 kWh m⁻³) y 14.8 GJ m⁻³ (4111 kWh m⁻³), lo cual demuestra que la temperatura influye claramente en este parámetro y que al obtener una mayor densidad a granel con la astilla torrefactada a mayor temperatura y el poder calorífico va a ser mayor se pueden obtener densidades energéticas mayores.

García et al. (2019), estudiaron la pelletización de pino torrefactado a 280 °C durante 60 minutos con glicerol, orujo de uva y astilla de pino sin tratar. Obtuvieron durabilidades menores en la gran mayoría de mezclas a las obtenidas en este estudio. Sin embargo, los valores de las densidades a granel son mayores. Las cenizas que obtuvieron en sus pellets de pino torrefacto son muy similares al valor obtenido para el TOP 100. Todo lo anteriormente mencionado nos indica que hay posibilidad de mejora en nuestro estudio en cuanto a conseguir una mayor densidad de pellet.

4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS POR EL PROCESO TOP

291-315 °C y tiempo entre 6-12 min, para posteriormente hacer regresiones y superficies de respuestas de diferentes propiedades.

Pirraglia et al. (2012), estudiaron las astillas de *Eucalyptus benthamii* y *Eucalyptus macarthurii* y su posterior torrefacción a 280 °C y un tiempo de residencia de 3 minutos. Únicamente pelletizaron material torrefacto de *Eucalyptus benthamii* con granos de destilación secos y soja, obteniendo un 11 % más de carbono fijo respecto al pellet del mismo tipo de biomasa sin torrefactar (27 % de carbono fijo en los torrefactos) y un 14 % menos de material volátil (69 % en los torrefactos).

Además, comparando la biomasa original con los pellets torrefactos, éstos presentaron un aumento considerable en el contenido de carbono y nitrógeno, una pequeña disminución en el contenido de hidrógeno y una gran bajada del contenido de oxígeno.

En el estudio de Peng et al. (2015) se estudió la pelletización de astilla torrefacto de pino a 280 °C y 52 min, 290, 300, 330 y 450 °C durante 30 minutos de tiempo de residencia añadiendo serrín de pino como aglutinante en los tres primeros rangos de temperatura, lignina, almidón y serrín en 330 °C y ningún aglutinante en 450 °C.

Se concluyó que la adición de serrín de pino influyó negativamente en el poder calorífico de los pellets, sin embargo, la adición de este aglutinante mejoró la densidad y la densidad a granel de los pellets. Además, el consumo de energía en la producción de los pellets también fue menor a los pellets sin aglutinante.

En el caso del pellet de 330 °C, los que presentaron mayor densidad y densidad aparente fue el que se aglutinó con un 10 % de almidón, este también fue el de mayor densidad energética. Sin embargo, la producción de pellets torrefactos con almidón fue la de mayor consumo energético frente a los producidos con lignina y serrín de pino.

Shang et al. (2013) torrefactaron astilla de *Pinus sylvestris* a 250 y 280 °C durante un tiempo de residencia de una hora. Además, estudiaron cinco temperaturas de pelletización diferentes (125, 155, 160, 165 y 190 °C) y tres niveles de humedad (0.5, 5 y 10 %). Únicamente añadieron aceite de colza como lubricante a las muestras con 5 % de humedad.

Se observó que la densidad de los pellets fue mayor cuando la temperatura de pelletizado aumentó. Los pellets con 2 % de lubricante presentaron una humedad final de 3.5 y 3.4 % para el de 250 y 280 °C respectivamente y unos valores de cenizas de 1.4 y 1.6 %. Los valores de durabilidad mecánica presentados fueron inferiores a la norma 91.44 y 89.91 % lo cual es un efecto negativo para el transporte de este biocombustible.

Tabla 20. Revisión bibliográfica del uso de aglutinantes en pellets TOP de pino y eucalipto. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia.

Especie	Severidad	Uso de aglutinante	Tipo de aglutinante	Referencias
Eucalyptus globulus	255 y 265 °C, 22 min	Sí	Almidón	Arteaga-Pérez et al. (2017)
Pino	280 °C, 60 min	Sí	Glicerol, orujo de uva y astilla de pino	García et al. (2019)
Pinus sylvestris	291-315 °C, 6-12 min	No	-	Rudolfsson et al. (2017)
Eucalyptus benthamii	280 °C, 3 min	Sí	Granos de destilación secos (DDG) y soja	Pirraglia et al. (2012)
Pino	280 °C 52 min y 290, 300, 330 y 450 °C, 30 min	Sí	Lignina, almidón y serrín de pino	Peng et al. (2015)
Pinus sylvestris	250 y 280 °C, 60 min	Sí	Aceite de colza	Shang et al. (2013)

4.3.7 Absorción de humedad

Por último, cabe destacar que la absorción de humedad para los pellets TOP, medida durante un año (Figura 60), se vio afectada principalmente por la humedad ambiente, evolucionando al igual que los pellets crudos de pino y pino-eucalipto. Los pellets TOP se diferencian de los TAP en que estos últimos, durante los primeros días de exposición a la humedad ambiental, absorbieron humedad desde el 0 % hasta estabilizarse, tras lo cual siguieron el mismo patrón que los demás.

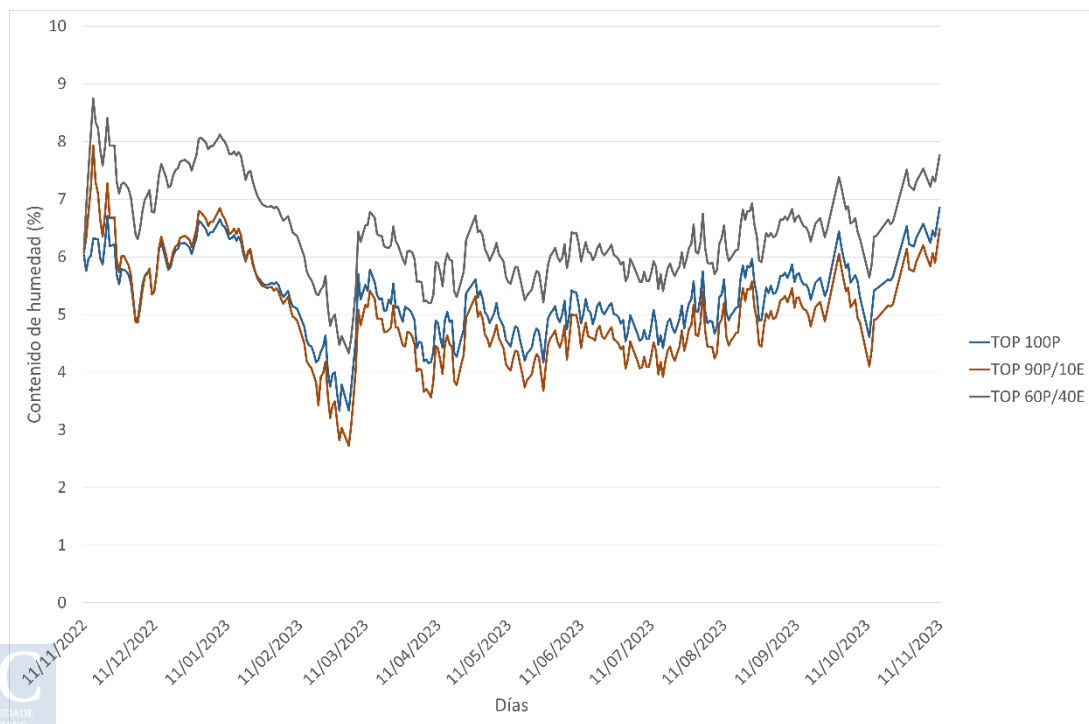


Figura 60. Evolución de la humedad de los pellets TAP durante un año. Fuente: Elaboración propia.

5. DISCUSIÓN GENERAL

En la presente tesis se presentan y analizan los resultados de las propiedades físicas, energéticas, análisis inmediato y composición elemental de pellets en crudo y torrefactos preparados mediante dos procedimientos (torrefacción después y antes de pelletizar, TAP y TOP, respectivamente) y considerando tres composiciones de biomasa: pino puro o mezclas de pino y eucalipto, con proporciones de este último de 10 y 40 % (100P, 90P/10E y 60P/40E) (Figura 61).

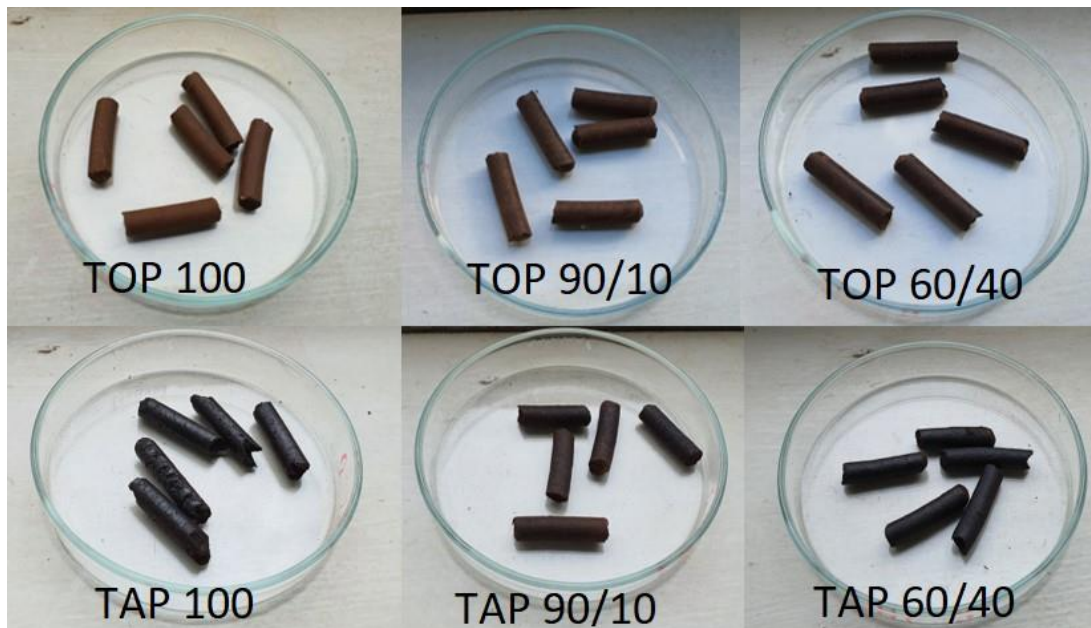


Figura 61. Imágenes de los tres pellets TOP y TAP estudiados (severidad 240 °C 40 min). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos con el proceso TAP, que se han tratado en el capítulo 3, confirman la calidad del pellet crudo de pino puro que, en aplicación de la norma UNE-EN ISO 17225-2 puede clasificarse en la categoría A1, siempre considerando que el material de partida corresponde a fuste descortezado procedente de puntal de poca dimensión, situación habitual en las plantas de pellets españolas.

La producción de pellet nacional ha oscilado en los últimos 3 años entre un mínimo de 641000 t hasta un máximo en 2023 próximo a las 800000 t, con una importante cantidad destinada a la exportación a distintos países europeos (Hernández, 2024). El principal destino de este material en España es básicamente para las distintas instalaciones domésticas con potencia máxima de 200 a 300 kW. A niveles superiores de potencia su utilización como combustible no sería adecuada y por lo tanto no competiría con biocombustibles como la astilla.

La posible dificultad de acceso a la materia prima de puntal de pino para descortezar abre un rango de posibles materiales a pelletizar. Entre ellos se encontrarían los fustes sin descortezar, los restos de corta o la biomasa de cultivos de corta rotación (Fuertes et al., 2023; Pegoretti et al., 2021), materiales que no se

han ensayado en esta tesis, pero con cuya mezcla podría mantenerse el alto nivel de calidad indicado para pellet puro de pino.

En este trabajo las mezclas se han realizado considerando el eucalipto nitens, en concreto madera de fuste descortezado, como material adicional. Galicia cuenta con vastas extensiones de terreno forestal, donde tanto el eucalipto como el pino son especies predominantes. Sin embargo, el eucalipto nitens ha cobrado relevancia en la región debido a su rápido crecimiento y capacidad para adaptarse a diferentes condiciones climáticas (Pérez-Cruzado et al., 2012; Picos, 2023), lo que lo convierte en una materia prima atractiva para la producción de pellets.

Para pellet crudo o sin torrefactar elaborado con mezclas de pino y eucalipto se aprecian cambios en varias características de la materia prima y del propio pellet producido. La dureza de las partículas de eucalipto molido supuso una resistencia a la hora de extruir el material a través de la matriz que obligó a un cambio a una longitud de canal inferior. **Este es un primer aspecto muy relevante y a destacar que puede condicionar la adaptación de las fábricas que actualmente usan pino al empleo de mezclas, sobre todo con proporciones de eucalipto próximas al 40 %.**

El pellet crudo de mezcla alcanzó valores de PCI_h claramente inferiores a los de pino puro, con cifras para la mezcla 60P/40E solo muy ligeramente por encima (50 J kg^{-1} , en concreto) del mínimo requerido para cualquier categoría de pellet leñoso de uso doméstico en aplicación de la norma UNE-EN ISO 17225-2 (16.5 MJ kg^{-1}). Debe indicarse asimismo que las especificaciones para pellet industrial, disponibles en la misma norma, consideran el mismo límite. **Este hecho impone como requisito de viabilidad que la mezcla debe ir ligada necesariamente a algún tratamiento que mejore el poder calorífico, como es el caso de la torrefacción.**

Pero, el aspecto más limitante de las mezclas con eucalipto es el alto contenido de cloro resultante en los pellets, incluso empleando madera descortezada y procedente de plantaciones con edad madura para los estándares de gestión de esta especie (Pérez-Cruzado et al., 2011), como se ha aplicado en esta tesis. Así, los niveles medios tanto del pellet 90P/10E como 60P/40E están muy próximo a 0.02 %, precisamente el valor límite que recoge la norma UNE-EN ISO 17225-2. Varias de las repeticiones analizadas estaban lógicamente por encima de ese valor. Este extremo ya se había recogido en bibliografía, indicando la torrefacción como un posible tratamiento para reducir dichos niveles (Romão et al., 2020; De Oliveira et al., 2017), si bien en esta tesis se cuantifica un rango de condiciones más amplio, aplicando técnicas de determinación de cloro muy sólidas.

Parece destacable indicar que los límites de Cl establecidos por la misma norma UNE-EN ISO 17225-2 para pellet de uso industrial son claramente superiores, admitiéndose incluso un 0.1 % para la categoría B. **Esto nos indica que el pellet de mezcla pino-eucalipto podría tener cabida en ese ámbito industrial,**

condicionado actualmente por los requerimientos de descarbonización (ver Foro Biomasa, 2024). Si bien la mayoría de las empresas gallegas que han dado pasos decididos en ese sentido (CEAMSA, COREN, Estrella de Galicia o varias industrias forestales) emplean preferentemente biomasa en forma de astilla industrial para sus calderas, no es descartable que **por necesidades de espacio puedan optar por densificados de uso industrial.**

El proceso de torrefacción ha emergido como una prometedora tecnología en el panorama energético mundial, especialmente en el contexto de la transición hacia fuentes renovables y sostenibles usando la biomasa como recurso principal (Mamvura & Danha, 2020; Olugbade & Ojo, 2020). La torrefacción generalmente implica someter la biomasa a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que da como resultado pellets con propiedades mejoradas. **De los resultados de la presente tesis se desprende que la torrefacción de pellets puros de pino puede resultar una alternativa para la puesta en el mercado de un producto premium, con mejoras de poder calorífico neto que llegarían al 50 % para la mayor severidad ensayada.**

El posible ámbito de utilización de ese pellet mejorado de pino sería el de calderas domésticas, ya que las instalaciones podrían beneficiarse de un nivel superior de poder calorífico y de densidad energética, a pesar de la pérdida de masa que se produce en el proceso. **Sin embargo, los equipos deberían de estar adaptados a esas condiciones del combustible empleado,** ya que se producen cambios de composición elemental que requieren regular la entrada de aire de combustión o los sistemas de retirada de cenizas, entre otras adaptaciones (Lasek et al., 2023).

Para las mezclas de pino y eucalipto, **la torrefacción se ha mostrado como un proceso estrictamente necesario para permitir la comercialización de los pellets en un ámbito distinto del industrial. El efecto de la torrefacción sobre el pellet de mezcla de pino con eucalipto resulta muy relevante tanto en la subida del poder calorífico neto como en la tasa de liberación de cloro.**

Las dos alternativas de producción, TAP y TOP, arrojan sin embargo resultados dispares. El principal problema **de los pellets TAP es la disminución de la resistencia al golpeteo y abrasión que arrojan los tests de durabilidad.** La bibliografía indica que esa disminución viene condicionada por la temperatura de torrefacción, al menos para pellet de pino (Dyjakon et al., 2021). En esta tesis, **se ha comprobado que una combinación de 240 °C con tiempos de residencia de 40 minutos no aseguraría la superación de los niveles mínimos de durabilidad** que establece la norma UNE-EN ISO 17225-8 para el pellet termotratado (mínimo de 97.5 % de durabilidad para ambas categorías TW1 y TW2).

En paralelo a los problemas de durabilidad, los pellets TAP tienen una densidad a granel reducida, que viene condicionada por la pérdida de masa que produce la

torrefacción. De los resultados obtenidos en esta tesis se deduce que **para una combinación de 240 °C y 40 minutos de torrefacción no se obtendrían los valores mínimos** (600 kg m^{-3} para la categoría TW2) que indica la norma UNE-EN ISO 17225-8.

Por el contrario, **la principal ventaja del método TAP es que no se condiciona la facilidad de pelletizado**, ya que no se intenta extrusionar un material previamente torrefactado. Adicionalmente, **el contenido de humedad del pellet TAP es extraordinariamente bajo, además de muy estable en el tiempo**, sin que su rehumidificación suponga subir por encima del 5 % de humedad. **Todo ello redunda en niveles muy favorables del PCI_h** . La Tabla 21 resume los resultados señalados.

Tabla 21. Reporte de las propiedades que cumplen los pellets TAP respecto a la norma UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	TAP 100	TAP 90/10	TAP 60/40
PCI_h (MJ kg^{-1})	CUMPLE TW2	CUMPLE TW2	CUMPLE TW2
Durabilidad mecánica (%)	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE
Cenizas (%)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Densidad a granel (kg m^{-3})	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
Finos (%)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Análisis elemental	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

Si se compara con TAP, **el proceso TOP tiene algunas ventajas evidentes**, sobre todo la **mayor durabilidad** determinada por el hecho de que la compactación es posterior a la torrefacción. El **proceso de pelletización es sin embargo complicado y requiere del uso de aglomerantes**, aspecto que se ha revisado en la literatura (Ghiasi et al., 2014; Peng et al., 2015.).

Los valores de densidad a granel son igualmente superiores en el proceso TOP, aunque no se alcanzó en esta tesis el nivel mínimo que la norma exige para la categoría TW1 (650 kg m^{-3}). Los resultados generales en cuanto a grado de cumplimiento de la norma de biomasa torrefactada en los pellets TOP se muestran

en la Tabla 22. Puede notarse cómo, al igual que ocurre con los pellets TAP, **los valores de cenizas alcanzados, que son claramente superiores a los pellets sin torrefactor, quedan por debajo del límite de 1.2 % recogida en la UNE-EN ISO 17225-8.**

Tabla 22. Reporte de las propiedades que cumplen los pellets TOP respecto a la norma UNE-EN ISO 17225-8. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	TOP 100	TOP 90/10	TOP 60/40
PCI _h (MJ kg ⁻¹)	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
Durabilidad mecánica (%)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Cenizas (%)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Densidad a granel (kg m ⁻³)	CUMPLE TW2	CUMPLE TW2	CUMPLE TW2
Finos (%)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Análisis elemental	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

En el presente trabajo el proceso TOP se restringió a una única combinación de temperatura y tiempo de torrefacción (240 °C y 40 minutos), lo que redundó en unos valores de PCI_h que quedaron cortos en relación a lo establecido por la norma UNE-EN ISO 17225-8 (19 o 20 MJ kg⁻¹ requeridos para las categorías TW2 y TW1, respectivamente).

Con la información obtenida en el apartado 3 es posible realizar una estimación del nivel de poder calorífico superior anhidro que alcanzarían los pellets para distintas severidades de torrefacción, siempre separando las estimaciones del pellet puro y de las mezclas. La estimación de los niveles de PCI_h puede hacerse posteriormente aplicando las condiciones específicas de contenido de humedad que muestran los pellets TOP (con niveles más elevados que los TAP como se ha indicado). Esa combinación ha permitido establecer isóneas de PCI_h y de rendimiento en masa (RM, %) en función de la severidad de torrefacción.

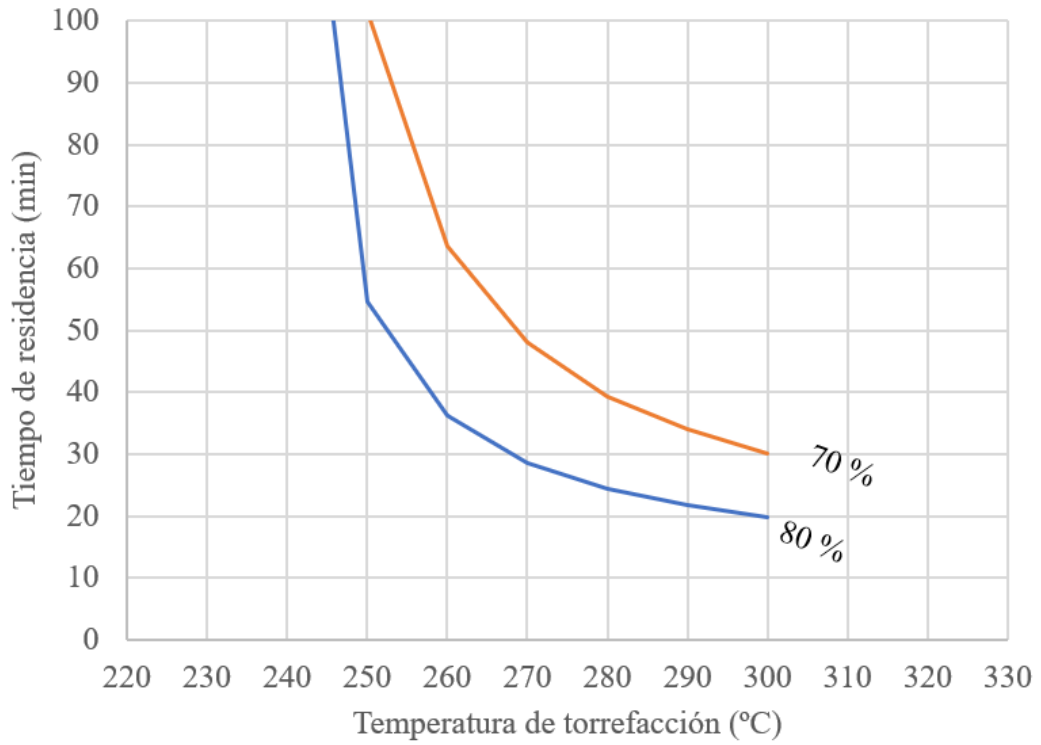


Figura 62. Isolíneas para el rendimiento másico (RM, %) derivado de los modelos de regresión obtenidos en el presente estudio para pino. Fuente: Elaboración propia.

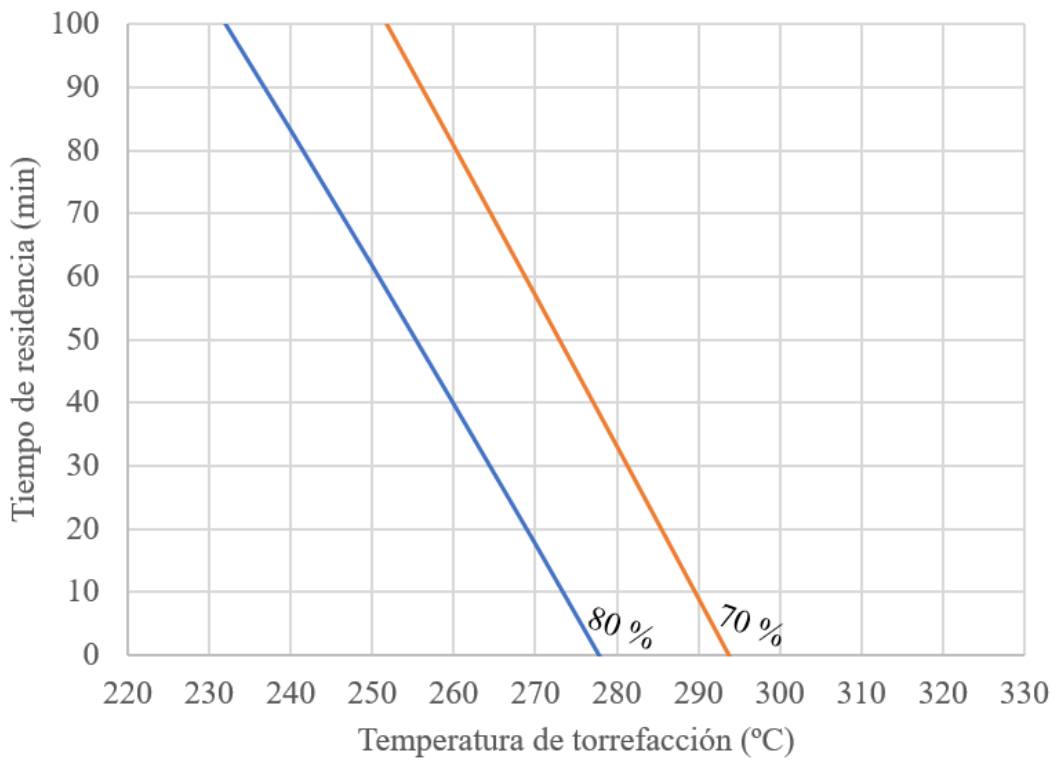


Figura 63. Isolíneas para el rendimiento másico (RM, %) derivado de los modelos de regresión obtenidos en el presente estudio para mezclas con eucalipto. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se indican en la Figura 64 para las tres composiciones analizadas. Puede apreciarse cómo la severidad aplicada experimentalmente en esta tesis para los TOPS no resulta suficiente para alcanzar un PCI_h de 19 MJ kg^{-1} y cómo **las combinaciones de T y t asegurarían una clasificación del pellet torrefacto en categoría TW1 optimizando el RM, que se mantendría por encima de 80 %.**

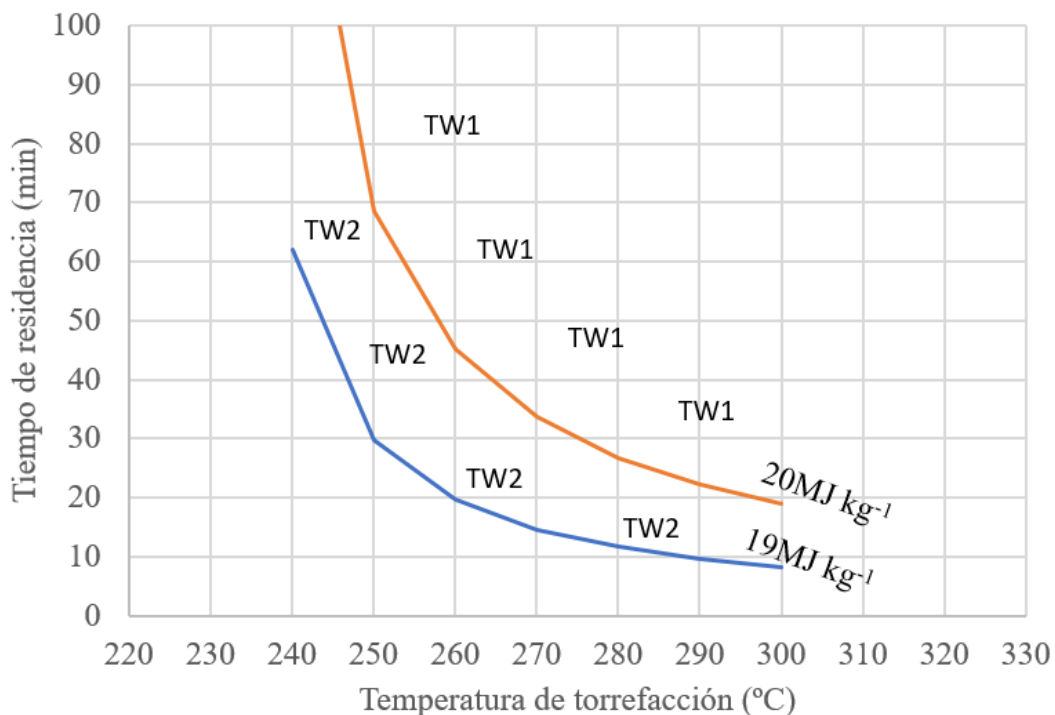


Figura 64. Isolíneas para poder calorífico inferior en base húmeda (PCI_h , MJ kg^{-1}) para las tres combinaciones estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

Sin duda una **ventaja clara del proceso TOP respecto del TAP es el hecho de que con el mismo se alcanzan los mayores niveles de densidad energética.** La mejora es notable para los pellets de pino puro, que alcanzarían un nivel de 3288 kWh m^{-3} , valor que resulta un 10.5 % superior al del pellet de pino crudo. En el caso de los pellets TOP de mezcla con eucalipto, los valores de densidad energética resultan similares a los indicados para pino puro.

El incremento de la densidad energética supone ventajas logísticas evidentes, que derivan de los menores costes de transporte y de la facilidad de manejo. Algunos autores indican niveles de ED posibles de 4.2 a 5 MWh m^{-3} (Proskurina et al., 2017). A la luz de los resultados de esta tesis, para pellet TOP con una combinación óptima de severidad de torrefacción para alcanzar la categoría TW1, el nivel de ED alcanzable podría ser de 3.5 MWh m^{-3} .

Una ventaja de la torrefacción de los pellets es la mayor molturabilidad del material, lo que facilita la pulverización previa que se aplica habitualmente cuando la biomasa se somete a gasificación. El proceso puede además acometerse con molinos de martillos, en lugar de molinos de cuchillas (Kumar et al., 2016).

El futuro de la torrefacción de pellets se muestra como un apartado clave en el mercado de las energías renovables, y su expansión se vislumbra como un paso muy importante para alcanzar objetivos ambientales globales, particularmente en el ámbito industrial, bien sea de producción eléctrica en co-combustión en plantas de ciclo combinado, industria siderúrgica o de pasta y papel (Proskurina et al., 2017). **Los pellets torrefactos de composición mezclada pueden tener una evidente utilidad como biocombustibles sólidos de aplicación industrial, presentando características que les aproximan al comportamiento como combustible de los carbones fósiles.**

La integración del proceso de torrefacción en las plantas tradicionales de pellet, que producen pellets blancos, o *white pellets* en terminología anglosajona, podría conseguirse a través de un proceso TOP (denominado *upstream* o aguas arriba, en relación a la línea de producción) o mediante una torrefacción final de los pellets, lo que corresponde a un proceso TAP (Kumar et al., 2016). La Figura 65 muestra ambas opciones.

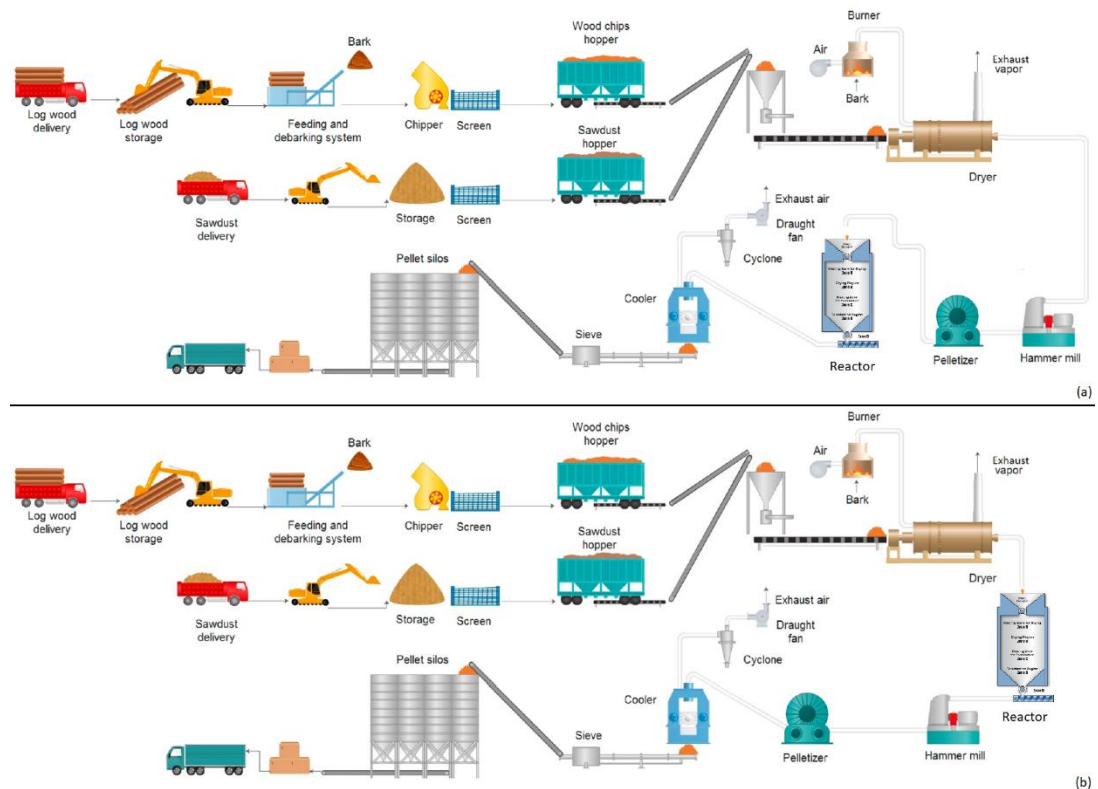


Figura 65. Representación del proceso de producción de pellets TAP (aguas abajo) (a) y producción de pellets TOP (aguas arriba) (b). Adaptado de Kumar et al. (2016) y Tumuluru et al. (2021). Reproducción con autorización.

Ambos procesos presentan una serie de desafíos (Kumar et al., 2016):

Integración Aguas Arriba (Antes de la Pelletización): Esta opción puede producir pellets torrefactos altamente densos y duraderos, pero presenta limitaciones como mayor volumen del reactor requerido para torrefactar astillas de madera, altos costes de capital, dificultades en la densificación, frecuentes necesidades de



mantenimiento debido a la naturaleza abrasiva de la biomasa torrefacta, y preocupaciones de seguridad por la generación de finos.

Integración Aguas Abajo (Después de la Pelletización): Esta opción es una integración más sencilla, eliminando la necesidad de capacidad adicional de molienda y pelletización, y minimizando la contaminación por polvo en toda la planta. Sin embargo, puede comprometer la calidad de los pellets, especialmente en términos de pérdida de durabilidad mecánica y densidad.

Si bien no ha sido el objetivo de esta tesis determinar las necesidades energéticas que supone la torrefacción, es evidente que un gran beneficio de la integración de la torrefacción en una planta de pellets de madera convencional es el potencial de usar el calor del proceso proveniente de la combustión de los volátiles liberados durante el proceso de torrefacción o la recirculación de calor del proceso de secado de la biomasa. En una instalación típica, casi toda la energía de secado se obtiene a partir de corteza y restos biomásicos que no se emplean para la pelletización, de modo que la eficiencia energética térmica resultante es cercana al 92 %. Sin embargo, al integrar la torrefacción, a pesar de una mayor energía requerida para el secado y la torrefacción, la mayor parte de esta energía podría satisfacerse quemando los volátiles liberados durante la torrefacción o recirculando calor sobrante del proceso de secado.

Además, diferentes estudios previos han indicado que el gasto de capital es una de las principales contribuciones al coste de producción de pellets torrefactados. Pirraglia et al. (2013) informaron que, después del coste de la materia prima, el gasto de capital es el segundo componente de coste más grande en la producción de pellets torrefactados. Para una instalación de producción de pellets torrefactados de 200000 toneladas anuales, se han estimado costos de capital de 32.7 millones de dólares. Topell Energy reportó un costo total de inversión de 19.5 millones de dólares para una planta de pellets convencionales de 124000 toneladas al año y 29 millones de dólares para una planta de pellets torrefactados de 100000 toneladas anuales (Koppejan et al., 2012). Thek and Obernberger (2012) calcularon un gasto de 4.64 millones de dólares para una instalación de pellets blancos de 40000 toneladas al año. En resumen, la intensidad de capital está en el rango de 13-19 dólares por tonelada para una planta de pellets frente a 29-37 dólares por tonelada para una planta de pellets torrefactados.

En todos los estudios, el 40-50 % del coste de capital de una planta de torrefacción independiente se dedica a la infraestructura, como el almacén de madera, secaderos y pelletizadoras, que se encuentran dentro de una estructura existente en la planta de pellets tradicionales.

Por otra parte, la selección de la tecnología de torrefacción es un factor determinante que influye en los costes de capital. Los reactores de tipo tornillo, aunque más avanzados y cercanos a la escala comercial, tienen costos de inversión

y de instalación significativamente más altos comparados con los reactores de lecho móvil o tambor rotatorio. La inversión de capital estimada para estos últimos es 27-50 % menor que para los reactores de tipo tornillo.

Las futuras líneas de investigación podrían explorar la viabilidad y beneficios de la combinación de astillas de eucalipto torrefactado con madera no tratada térmicamente de pino para la producción de pellets. Esta mezcla podría aprovechar la lignina natural presente en la madera de pino como aglutinante para los pellets torrefactados de eucalipto.

6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- La astilla de madera descortezada de pino constituye un biocombustible de muy buena calidad para uso térmico doméstico, pudiendo clasificarse en la categoría A1 de la norma UNE-EN ISO 17225-4 siempre que se seque previamente a un contenido de humedad inferior al 25 %.
- La astilla de madera descortezada de *Eucalyptus nitens* obtenida de árboles de 15 años constituye una alternativa interesante como biocombustible térmico doméstico, pudiendo también clasificarse en la categoría A1 de la norma UNE-EN ISO 17225-4 si se maneja de forma que pierda humedad hasta el nivel del 25 %, aunque los niveles de cloro son muy superiores a los de pino.
- Las densidades aparentes de partidas de astilla de pino y de eucalipto a un 25 % de humedad serían de 203 kg m⁻³ y 218 kg m⁻³, respectivamente.
- La astilla de madera descortezada de *Eucalyptus nitens* presenta mejores niveles de densidad energética (775 kWh m⁻³) que la astilla de pino (729 kWh m⁻³) al compensar su menor poder calorífico con una mayor densidad aparente.
- Los pellets puros de pino sin torrefactar presentaron propiedades óptimas que permiten su clasificación en la categoría A1 de la norma UNE-EN ISO 17225-2, consiguiéndose con la densificación incrementar la densidad aparente en un 350 % y la densidad energética en un 410 % respecto del material de partida.
- La pelletización de la muestra de pino puro no pudo conseguirse en la pelletizadora de laboratorio de matriz plana con matriz de 33 mm y diámetro de 6 mm (relación de compresión 5.5:1), debiendo emplearse una matriz de 28 mm. Para el pellet de mezcla 90P/10E se requirió una relación de compresión de 4.67:1, debiendo sustituirse por una relación de 4:1 al incrementar la proporción de eucalipto a un 40 % (60P/40E), siempre con contenidos de humedad >17 %, lo que indica la mayor dureza y dificultad de pelletización del eucalipto.
- Los niveles de Na, K, Zn, B y Cl en el pellet sin torrefactar aumentaron con el porcentaje de eucalipto, siendo los de Cl los que mayor limitación suponen para un uso térmico doméstico, ya que la mezcla 90P/10E queda en el límite admisible según la norma UNE-EN ISO 17225-2 para la calidad A2 doméstica, sobrepasándose en el caso de 60P/40E.
- La torrefacción tras el pelletizado (proceso TAP) se muestra como una alternativa para reducir los problemas de Cl en los pellets de mezcla, alcanzándose tasas de liberación del 90 % con la mayor severidad de torrefacción (300 °C durante 60 minutos).
- Los patrones de variación de la composición elemental con la severidad de torrefacción muestran una tendencia creciente independiente de la mezcla para C,

Mg, Al, P, Ca, Fe, Cu, creciente manteniendo diferencias entre mezclas para B, Na, K, Zn y Mn y netamente decreciente para Cl, O, H, lo que se plasma en el diagrama de van Krevelen.

- Se han obtenido modelos precisos e insesgados que permiten predecir el rendimiento en masa, porcentaje de cenizas, volátiles y carbono fijo, el poder calorífico superior anhidro y el poder calorífico neto en función de la severidad de torrefacción para pellet TAP. Los modelos fueron diferentes para el pellet de pino y para el pellet de mezcla.
- La aplicación de los modelos permite obtener diagramas con isolíneas para propiedades como el contenido de cenizas y el poder calorífico neto, en base a los cuales se recomienda un rango de temperaturas de entre 260 y 270 °C y tiempos de residencia de 50 a 60 min para obtener pellets torrefactos con las propiedades deseadas.
- La torrefacción de los pellets (proceso TAP) con severidad T240-40 supuso una reducción promedio de la densidad aparente de un 11 %, derivando en valores demasiado reducidos para ser clasificados según la norma UNE-EN ISO 17225-8 en cualquiera de las categorías TW1 o TW2.
- En los pellets TAP con severidad T240-40, la reducción de densidad aparente se compensó con el incremento del poder calorífico neto, derivando en un moderado aumento de la densidad energética (4 %) respecto de los pellets sin torrefactar.
- La torrefacción de los pellets (proceso TAP) con severidad T240-40 supuso una reducción de la densidad aparente a niveles ligeramente superiores o claramente inferiores al mínimo requerido por la norma UNE-EN ISO 17225-8 en cualquiera de las categorías TW1 o TW2 (97.5 %).
- La pelletización de astilla torrefactada a 240 °C durante 40 minutos (proceso TOP) empleando un 2 % de almidón de maíz como aglomerante se mostró como factible usando pelletizadora de laboratorio tras rehumedecer el material a un 14-15 % de humedad y emplear una relación de compresión 4:1, tanto para pino puro (100P) en las mezclas (90P/10E y 60P/40E).
- El proceso TOP fue muy favorable desde el punto de vista de las propiedades físico-mecánicas, al mantenerse los niveles de densidad aparente del pellet crudo y niveles de durabilidad superiores a 98.5 %. El incremento del poder calorífico neto supuso un aumento de la densidad energética de un 11-14 % respecto al pellet crudo, alcanzándose niveles de 3300 kWh m⁻³.
- La severidad de torrefacción de astilla ensayada para los pellets TOP resultó reducida para alcanzar los mínimos de poder calorífico neto exigidos por la norma UNE-EN ISO 17225-8 (19 MJ kg⁻¹ para TW2 y 20 MJ kg⁻¹ para TW1). El empleo de los modelos de respuesta a la torrefacción permitió definir una severidad de 260 a

270 °C durante 50 minutos como un nivel óptimo para alcanzar la categoría TW1, manteniendo un rendimiento en masa >70 %.

- Debido al propio proceso de producción, los pellets TOP contienen inicialmente humedad (promedio de un 6 %) mientras que los TAP están completamente secos y comienzan a rehumedecerse en contacto con la humedad del aire. La pauta de rehumidificación resulta paralela a las variaciones de humedad ambiental, si bien ambos tipos de torrefactos presentan una hidrofobicidad que se manifiesta en el mantenimiento de contenidos de humedad 2-3 % inferiores a los de los pellets crudos.
- Los procesos de torrefacción mediante diferentes tipos de reactores podrían integrarse en las líneas actuales de fabricación de pellet bien después del secado de astilla (proceso TOP) o bien después del pelletizado (proceso TAP), pudiendo emplearse energía térmica procedente de la combustión de cortezas.
- Los pellets torrefactos, en particular los TOP podrían tener un mercado de uso en el ámbito industrial, si se consideran las mejoras en las propiedades energéticas estudiadas en esta tesis y otras adicionales como la mayor friabilidad, que facilita la pulverización previa a transformación por combustión o gasificación.
- La torrefacción de pellets puros de pino puede resultar una alternativa para la puesta en el mercado de un producto premium, con mejoras de poder calorífico neto que llegarían al 50 % para la mayor severidad ensayada.
- Líneas relevantes de investigación futura serían el empleo de aglomerantes derivados de la propia biomasa leñosa, mezclas con otras biomásas forestales o los requerimientos y balances de energía térmica para implementación práctica en las fábricas actuales de pellet.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., Younis, I., 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research* 2022 29:28 29, 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-19718-6>

Acharya, B., Sule, I., Dutta, A., 2012. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Convers Biorefin* 2, 349-369. <https://doi.org/10.1007/S13399-012-0058-Y>

AFG, 2023. Asociación Forestal de Galicia. Precios orientativos de la madera gallega. *O Monte*, 64, p67.

Agar, D.A., 2017. A comparative economic analysis of torrefied pellet production based on state-of-the-art pellets. *Biomass Bioenergy* 97, 155-161. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2016.12.019>

Aho, M., Silvennoinen, J., 2004. Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminium-silicon rich biomass residue and additive. *Fuel* 83, 1299-1305. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2004.01.011>

Arteaga-Pérez, L.E., Segura, C., Espinoza, D., Radovic, L.R., Jiménez, R., 2015. Torrefaction of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*: A combined experimental and modeling approach to process synthesis. *Energy for Sustainable Development* 29, 13-23. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2015.08.004>

AVEBIOM, 2023. Mapa de biocombustibles sólidos en España 2023. AVEBIOM. <https://www.avebiom.org/sites/default/files/biomasanews/mapa-biocombustibles-AVEBIOM-2023.pdf>

Bach, Q.V., Chen, W.H., Lin, S.C., Sheen, H.K., Chang, J.S., 2017. Wet torrefaction of microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31 with microwave-assisted heating. *Energy Convers Manag* 141, 163-170. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.07.035>

Basu, P., 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* 1-530. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>

Benson, S.A., Steadman, E.N., Zygarlicke, C.J., Erickson, T.A., 1996. Ash Formation, Deposition, Corrosion, and Erosion in Conventional Boilers. *Applications of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers* 1-15. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9223-2_1

Bergman, P., Boersma, A., Zwart, R., Kiel, J., 2005. Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations. *Energy research Centre of the Netherlands*.

Bioenergy Europe Statistical Report 2020, 2020. <https://bioenergyeurope.org/>

Bioenergy Europe Statistical Report 2021, 2021. <https://bioenergyeurope.org/>

Bioenergy Europe Statistical Report 2022, 2022. <https://bioenergyeurope.org/>

Björkman, E., Strömberg, B., 1997. Release of Chlorine from Biomass at Pyrolysis and Gasification Conditions1. *Energy and Fuels* 11, 1026-1032. <https://doi.org/10.1021/EF970031O>

Boehringer, C., 2003. The Kyoto Protocol: A Review and Perspectives. *Oxf Rev Econ Policy* 19.

Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I., Williams, P.T., 2008. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel* 87, 844-856. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2007.05.041>

Butler, J.W., Skrivan, W., Lotfi, S., 2023. Identification of Optimal Binders for Torrefied Biomass Pellets. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3390 16, 3390. <https://doi.org/10.3390/EN16083390>

Cardona, S., Gallego, L.J., Valencia, V., Martínez, E., Rios, L.A., 2019. Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 31, 17-24. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2018.11.002>

Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Ma, Z., Li, M., Chen, D., 2021. Effect of the combined pretreatment of leaching and torrefaction on the production of bio-aromatics from rice straw via the shape selective catalytic fast pyrolysis. *Energy Reports* 7, 732-739. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.01.031>

Chen, W.H., Lin, B.J., Lin, Y.Y., Chu, Y.S., Ubando, A.T., Show, P.L., Ong, H.C., Chang, J.S., Ho, S.H., Culaba, A.B., Pétrissans, A., Pétrissans, M., 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Prog Energy Combust Sci* 82, 100887. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100887>

Chen, W.H., Peng, J., Bi, X.T., 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44, 847-866. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.12.039>

Chicaiza Rodríguez, M.E., Palacios Franco, J.G., 2020. Evaluación del potencial energético de la hojarasca de mangle rojo (*rhizophora mangle*) como biocombustible a través de la torrefacción (Tesis de licenciatura, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).

Council of the European Union. (n.d.). European Green Deal. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

Dahlquist, Erik., 2013. Technologies for converting biomass to useful energy: combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation. CRC Press.

De Oliveira Araújo, S., Neiva, D.M., Gominho, J., Esteves, B., Pereira, H., 2017. Chemical effects of a mild torrefaction on the wood of eight Eucalyptus species. *Holzforschung* 71, 291-298. <https://doi.org/10.1515/HF-2016-0079>

Devaraja, U.M.A., Dissanayake, C.L.W., Gunarathne, D.S., Chen, W.H., 2022. Oxidative torrefaction and torrefaction-based biorefining of biomass: a critical review. *Biofuel Research Journal* 35, 1672-1696. <https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.3.4>

Dyjakon, A., Noszczyk, T., Mostek, A., 2021. Mechanical durability and grindability of pellets after torrefaction process. *Energies (Basel)* 14, 6772. <https://doi.org/10.3390/EN14206772>

European Commission, n.d. 2030 targets. European Commission. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets_es

Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., Høibø, O., 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass Bioenergy* 35, 3342-3349. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2010.09.011>

Fuertes, A., Oliveira, N., Cañellas, I., Sixto, H., Rodríguez-Soalleiro, R., Hanewinkel, M., Sperlich, D., 2023. Assessing the potential of poplar short rotation plantations to contribute to a low-carbon bioeconomy under water-limited conditions. *J Environ Manage* 347, 119062. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119062>

García, R., Gil, M. V., Rubiera, F., Pevida, C., 2019. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel* 251, 739-753. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.03.141>

García, R., González-Vázquez, M.P., Martín, A.J., Pevida, C., Rubiera, F., 2020. Pelletization of torrefied biomass with solid and liquid bio-additives. *Renew Energy* 151, 175-183. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.004>

Gent, S., Twedt, M., Gerometta, C., Almberg, E., 2017. Theoretical and Applied Aspects of Biomass Torrefaction: For Biofuels and Value-Added Products. *Theoretical and Applied Aspects of Biomass Torrefaction: For Biofuels and Value-Added Products* 1-209.

Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C.J., Bi, X., Kim, C.S., Sokhansanj, S., 2014. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification? *Appl Energy* 134, 133-142. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.07.076>

Gilvari, H., de Jong, W., Schott, D.L., 2020. The Effect of Biomass Pellet Length, Test Conditions and Torrefaction on Mechanical Durability Characteristics According to ISO Standard 17831-1. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3000 13, 3000. <https://doi.org/10.3390/EN13113000>

Hakkou, M., Pétrissans, M., Gérardin, P., Zoulalian, A., 2006. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polym Degrad Stab* 91, 393-397. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2005.04.042>

IDEA, 2009. Guía técnica: instalaciones de biomasa térmica en edificios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 88pp.

IEA, n.d. Global energy transitions stocktake. International Energy Agency. <https://www.iea.org/topics/global-energy-transitions-stocktake>

IRENA, 2023. Renewable power generation costs in 2022. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>

Jensen, P.A., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., Sander, B., 2000. Experimental Investigation of the Transformation and Release to Gas Phase of Potassium and Chlorine during Straw Pyrolysis. *Energy and Fuels* 14, 1280-1285. <https://doi.org/10.1021/EF000104V>

Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L., Raiko, R., 2014. The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass Bioenergy* 66, 232-239. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.02.015>

Kumar, L., Koukoulas, A.A., Mani, S., Satyavolu, J., 2016. Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review. *Energy and Fuels* 31, 37-54. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.6B02803>

Lam, P.S., Sokhansanj, S., Bi, X.T., Lim, C.J., Larsson, S.H., 2012. Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). *Bioresour Technol* 116, 396-402. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.03.093>

Lasek, J.A., Matuszek, K., Hrycko, P., Głód, K., Li, Y.H., 2023. The combustion of torrefied biomass in commercial-scale domestic boilers. *Renew Energy* 216, 119065. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119065>

Lavergne, S., Larsson, S.H., Da Silva Perez, D., Marchand, M., Campargue, M., Dupont, C., 2021. Effect of process parameters and biomass composition on flat-die pellet production from underexploited forest and agricultural biomass. *Fuel* 302, 121076. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121076>

Lerma-Arce, V., Oliver-Villanueva, J.V., Segura-Orenga, G., 2017. Influence of raw material composition of Mediterranean pinewood on pellet quality. *Biomass Bioenergy* 99, 90-96. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.02.018>

Li, M.F., Shen, Y., Sun, J.K., Bian, J., Chen, C.Z., Sun, R.C., 2015. Wet Torrefaction of Bamboo in Hydrochloric Acid Solution by Microwave Heating. *ACS Sustain Chem Eng* 3, 2022-2029. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.5B00296>

Lu, K.M., Lee, W.J., Chen, W.H., Liu, S.H., Lin, T.C., 2012. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresour Technol* 123, 98-105. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.07.096>

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J.E., Hvelplund, F., Mathiesen, B.V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 68, 1-11. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.02.089>

MAGRAMA, 2011. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Comunidad Autónoma de Galicia. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino., 49p.

Mamvura, T.A., Danha, G., 2020. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon* 6, e03531. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E03531>

Manatura, K., Lu, J.H., Wu, K.T., Hsu, H. Te, 2017. Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification. *Appl Therm Eng* 111, 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.09.135>

Manouchehrinejad, M., Mani, S., 2018. Torrefaction after pelletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass Bioenergy* 118, 93-104. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2018.08.015>

Michel, J.-B., Mahmed, C., Ropp, J., Richard, J., Sattler, M., Schmid, M., 2011a. Combustion and life-cycle evaluation of torrefied wood for decentralized heat and power production.

Michel, J.-B., Mahmed, C., Ropp, J., Richard, J., Sattler, M., Schmid, M., 2011b. Combustion evaluation of torrefied wood pellets on a 50kWth boiler. *Transport* 62.

Miles, T., Design Engineers, C., Baxter, L., Bryers, R., Wheeler Development Corp, F., Jenkins, B., of California, U., Oden, L., of Mines, B., Dept of Interior, U., 1995. Alkali Deposits Found in Biomass Power Plants: Vol. 1.

Miles, T.R., Miles, T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., Oden, L.L., 1996. Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass Bioenergy* 10, 125-138. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00067-4)

Millaniyage, K., Kotlarewski, N., Wallis, L., Taoum, A., Nolan, G., 2022. Janka Hardness Evaluation of Plantation-Grown Eucalyptus nitens for Engineered Flooring Applications. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 1862 12, 1862. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12111862>

Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., Hui, S., 2019. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115, 109395. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109395>

Nussbaumer, T., 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction†. *Energy and Fuels* 17, 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/EF030031Q>

Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G., 2006. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass Bioenergy* 30, 973-982. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2006.06.011>

Olugbade, T.O., Ojo, O.T., 2020. Biomass Torrefaction for the Production of High-Grade Solid Biofuels: a Review. *Bioenergy Res* 13, 999-1015. <https://doi.org/10.1007/S12155-020-10138-3>

Ortíz Torres, L., Miguez Tasares, J.L., 1995. *Energías renovables y medio ambiente*. Vigo, Universidad de Vigo.

Park, H., Schlesinger, W.H., 2002. Global biogeochemical cycle of boron. *Global Biogeochem Cycles* 16, 20-1. <https://doi.org/10.1029/2001GB001766>

Pegoretti Leite de Souza, H.J., Muñoz, F., Mendonça, R.T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., de Souza, D.P.L., de Paula Protásio, T., Rodríguez-Soalleiro, R., 2021. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renew Energy* 163, 1802-1816. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.065>

PELLETS 2022, 2022. Informe estadístico sobre producción y consumo de pellets en España. <https://www.avebiom.org/>

Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H., Jia, D., 2015. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Processing Technology* 129, 168-173. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2014.09.010>

Pérez-Cruzado, C., Merino, A., Rodríguez-Soalleiro, R., 2011. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass Bioenergy* 35, 2839-2851. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.03.020>

Spinelli, R., Nati, C., Sozzi, L., Magagnotti, N., Picchi, G., 2011. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel* 90, 2198-2202. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.02.011>

Picos, J., 2023. Estimación de Superficies a partir do mapa forestal de media resolución. Presentación, disponible en: Primeiros resultados do Inventario Forestal Continuo de Galicia. https://invega.xunta.gal/invega/appdata/documents/noticia7/PPT_UVIGO_3_Primeiros%20resultados%20IFCG%20Juan%20Picos.pdf

Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., Wright, J., Denig, J., 2011. Fuel properties and suitability of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus macarthurii* for torrefied wood and pellets. *Bioresources* 7, 217-235. <https://doi.org/10.15376/BIORES.7.1.217-235>

Proskurina, S., Heinimö, J., Schipfer, F., Vakkilainen, E., 2017. Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. *Renew Energy* 111, 265-274. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.04.015>

R Development Core Team, 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.

Rodrigues, A., Loureiro, L., Nunes, L.J.R., 2018. Torrefaction of woody biomasses from poplar SRC and Portuguese roundwood: Properties of torrefied products. *Biomass Bioenergy* 108, 55-65. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.11.005>

Rodríguez, J.I., 2024. Biomasa para usos enerxéticos na axenda enerxética de Galicia 2030. V Foro de la biomasa, Silleda, 11/04/2024.

Romão, E.L., Conte, R.A., Romão, E.L., Conte, R.A., 2021. Energy gains of *Eucalyptus* by torrefaction process. *Maderas. Ciencia y tecnología* 23, 1-6. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100403>

Romão, E.L., da Silva, J.M., dos Santos Luz, N. V., Conte, R.A., 2023. Torrefaction as a Chlorine Reduction Process of Brazilian *Eucalyptus* sp. for Use as Biofuel. *Bioenergy Res* 16, 448-456. <https://doi.org/10.1007/S12155-022-10429-X>

Rudolfsson, M., Borén, E., Pommer, L., Nordin, A., Lestander, T.A., 2017. Combined effects of torrefaction and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass. *Appl Energy* 191, 414-424. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.01.035>

Sá, L.C.R., Loureiro, L.M.E.F., Nunes, L.J.R., Mendes, A.M.M., 2020. Torrefaction as a Pretreatment Technology for Chlorine Elimination from Biomass: A Case Study Using *Eucalyptus globulus* Labill. *Resources* 2020, Vol. 9, Page 54 9, 54. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9050054>

Saddawi, A., Jones, J.M., Williams, A., Le Coeur, C., 2012. Commodity Fuels from Biomass through Pretreatment and Torrefaction: Effects of Mineral Content on Torrefied Fuel Characteristics and Quality. *Energy and Fuels* 26, 6466-6474. <https://doi.org/10.1021/EF2016649>

Saleh, S.B., Flensburg, J.P., Shoulaifar, T.K., Sárossy, Z., Hansen, B.B., Egsgaard, H., Demartini, N., Jensen, P.A., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., 2014. Release of chlorine and sulfur during biomass torrefaction and pyrolysis. *Energy and Fuels* 28, 3738-3746. <https://doi.org/10.1021/EF4021262>

Setkit, N., Li, X., Yao, H., Worasuwanarak, N., 2021. Torrefaction behavior of hot-pressed pellets prepared from leucaena wood. *Bioresour Technol* 321, 124502. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.124502>

Shang, L., Nielsen, N.P.K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Thomsen, T., Henriksen, U.B., 2012. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology* 101, 23–28. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2012.03.013>

Singh, S., Chakraborty, J.P., Mondal, M.K., 2020. Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. *Renew Energy* 153, 711–724. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.02.037>

Sippula, O., Lind, T., Jokiniemi, J., 2008. Effects of chlorine and sulphur on particle formation in wood combustion performed in a laboratory scale reactor. *Fuel* 87, 2425–2436. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2008.02.004>

Thek, G., Obernberger, I., 2012. *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets. The Pellet Handbook.* <https://doi.org/10.4324/9781849775328>

Thybring, E.E., Fredriksson, M., 2021. Wood Modification as a Tool to Understand Moisture in Wood. *Forests* 2021, Vol. 12, Page 372 12, 372. <https://doi.org/10.3390/F12030372>

Tolosana, E., Ambrosio, Y., Laina, R., Martínez, R. 2008. *Guía de la maquinaria para el aprovechamiento y elaboración de la biomasa forestal.* Cesefor, 89 pp.

Tumuluru, J.S., Ghiasi, B., Soelberg, N.R., Sokhansanj, S., 2021. Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Front Energy Res* 9. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.728140>

Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T., Boardman, R.D., 2011. REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. <https://home.liebertpub.com/ind> 7, 384–401. <https://doi.org/10.1089/IND.2011.7.384>

Uemura, Y., Omar, W.N., Tsutsui, T., Yusup, S.B., 2011. Torrefaction of oil palm wastes. *Fuel* 90, 2585–2591. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.03.021>

UNE-EN ISO 5370, 2023. *Solid Biofuels - Determination of fines content in pellets.* AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 16948, 2015. *Solid Biofuels. Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen;* AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 16967, 2015. *Solid Biofuels. Determination of Major Elements Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti;* AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 16968, 2015. Solid Biofuels - Determination of minor elements; AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 16994, 2017. Solid Biofuels. Determination of Total Content of Sulfur and Chlorine; AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-1, 2022. Solid Biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-2, 2021. Solid Biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-4, 2021. Solid Biofuels - Fuel specifications and classes - Part 4: Graded wood chips. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-8, 2023. Solid Biofuels - Fuel specifications and classes - Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels for commercial and industrial use. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17225-9, 2022. Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 9: Graded hog fuel and wood chips for industrial use. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17381-1, 2016. Solid Biofuels, Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 17828, 2016. Solid Biofuels - Determination of bulk density. AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 18122, 2016. Solid Biofuels. Determination of Ash Content; AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 18125, 2017. Solid Biofuels. Determination of Calorific Value; AENOR: Madrid, Spain.

UNE-EN ISO 18134, 2016. Solid Biofuels. Determination of moisture content. Oven dry method. Part 1: Total moisture. Reference method. AENOR: Madrid, Spain.

UNFCCC, n.d. Kyoto Protocol. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/kyoto_protocol

United Nations, n.d. What is renewable energy?. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>

Urban, M.C., Alberti, M., De Meester, L., Zhou, Y., Verrelli, B.C., Szulkin, M., Schmidt, C., Savage, A.M., Roberts, P., Rivkin, L.R., Palkovacs, E.P., Munshi-South, J., Malesis, A.N., Harris, N.C., Gotanda, K.M., Garroway, C.J., Diamond, S.E., Roches, S. Des, Charmantier, A., Brans, K.I., 2024. Interactions between climate change and urbanization will shape the future of biodiversity. Nature Climate Change 2024 14:5 14, 436-447. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01996-2>

van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasinski, K.J., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass Bioenergy* 35, 3748-3762. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.06.023>

van Loo, S., Koppejan, J., 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. <https://doi.org/10.4324/9781849773041>

Vignote, S., 2014. Principales maderas de coníferas en España: características, tecnología y aplicaciones. Dpto. de Economía y Gestión Forestal. UPM, 170pp.

Vusić, D., Vujanić, F., Pešić, K., Šafran, B., Jurišić, V., Zečić, Ž., 2021. Variability of Normative Properties of Wood Chips and Implications to Quality Control. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 3789 14, 3789. <https://doi.org/10.3390/EN14133789>

Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M., Nielsen, H.K., 2020. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy and Fuels* 34, 15343-15354. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.0C02671>

Wei, Z., Cheng, Z., Shen, Y., 2024. Recent development in production of pellet fuels from biomass and polyethylene (PE) wastes. *Fuel* 358, 130222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130222>

Wild, M., Calderón, C., 2021. Torrefied Biomass and Where Is the Sector Currently Standing in Terms of Research, Technology Development, and Implementation. *Front Energy Res* 9, 678492. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.678492>

Xunta de Galicia, n.d. Indicadores forestales. <https://indicadores-forestal.xunta.gal/portal-bi-internet/dashboard/Dashboard.action>

Yu, S., Park, J., Kim, M., Kim, H., Ryu, C., Lee, Y., Yang, W., Jeong, Y.G., 2019. Improving Energy Density and Grindability of Wood Pellets by Dry Torrefaction. *Energy and Fuels* 33, 8632-8639. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.9B01086>

Yu, Y., Zhu, Z., Wang, L., Wang, G., Bai, X., 2021. Effect of Torrefaction Treatment on Physical and Fuel Properties of Caragana (*Caragana korshinskii*) Pellets. *Bioenergy Res* 14, 1277-1288. <https://doi.org/10.1007/S12155-020-10235-3>

Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., 2022. Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Convers Biorefin* 12, 2061-2070. <https://doi.org/10.1007/S13399-020-00666-5>

Zintl, F.; Strömberg, B.; Björkman, E., 2018. Release of Chlorine from Biomass at Gasification Conditions. In *Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry Proceedings of the International Conference, Wurzburg, Germany, 8-11 June 1998*.

ANEXOS

Anexo 1: Pelletizadora Amandus Kahl 14-175.



Anexo 2: Estufa de secado.



Anexo 3: Molino de martillos.



Anexo 4: Matriz de compresión.



Anexo 5: Muestras molidas para realizar la prueba de cenizas.



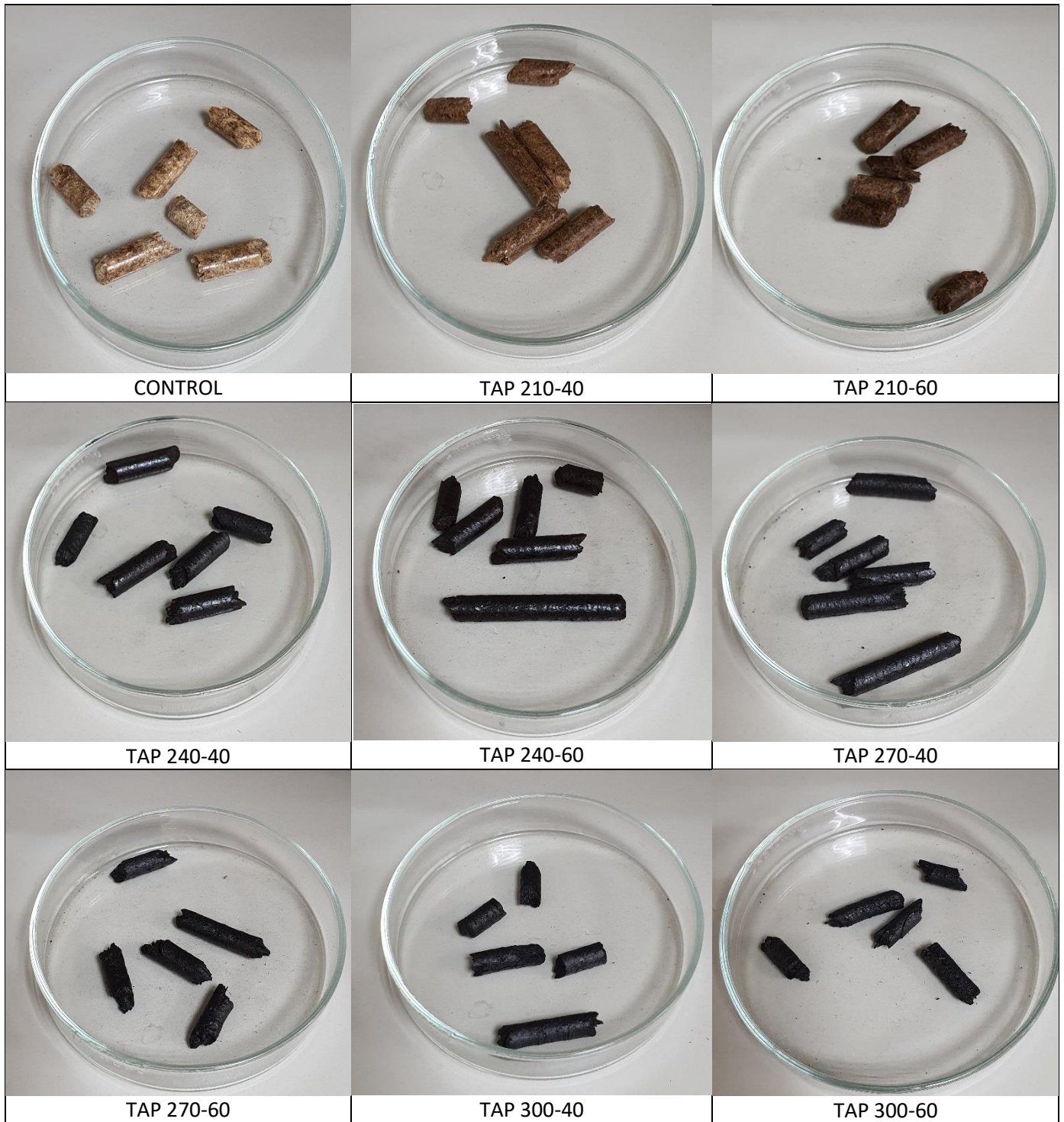
Anexo 6: Mufla.



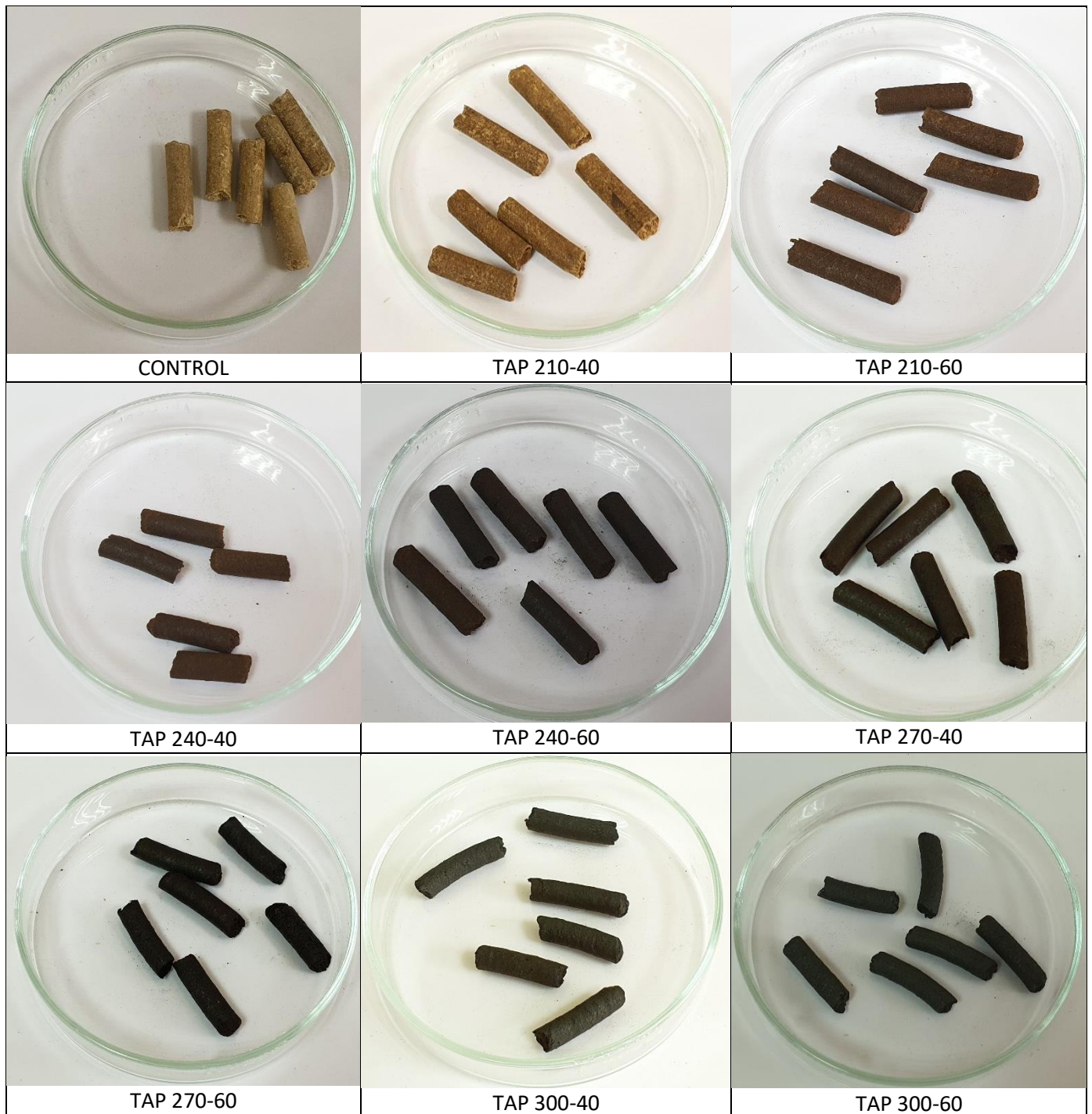
Anexo 7: Mezcladora.



Anexo 8: Pellet de control 100P y TAPS.



Anexo 9: Pellet de control 90P/10E y TAPS



Anexo 10: Pellet de control 60P/40E y TAPS



Anexo 11: Autorizaciones para la reproducción de figuras

- La **Figura 3**, proviene de un artículo de la revista *Forests*, ésta permite la reutilización de su material, ya que es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
- La **Figura 11** está incluida en un artículo de la revista *Progress in Energy and Combustion Science* de la editorial Elsevier. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite adecuadamente el trabajo original.
- La **Figura 12** está incluida en un artículo publicado en la revista *Industrial Biotechnology*, que autoriza a la reutilización de la figura mediante el siguiente acuerdo.

This Agreement between Andrés Iglesias Canabal ("You") and Mary Ann Liebert, Inc. ("Mary Ann Liebert, Inc.") consists of your license details and the terms and conditions provided by Mary Ann Liebert, Inc. and Copyright Clearance Center.

License Number	5887631103782
License date	Oct 14, 2024
Licensed Content Publisher	Mary Ann Liebert, Inc.
Licensed Content Publication	Industrial Biotechnology
Licensed Content Title	REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications
Licensed Content Author	Jaya Shankar Tumuluru, Shahab Sokhansanj, J. Richard Hess, et al
Licensed Content Date	Oct 1, 2011
Licensed Content Volume	7
Licensed Content Issue	5
Type of Use	Dissertation/Thesis
Requestor type	academic
Format	print and electronic
Portion	figures/tables

ANDRÉS IGLESIAS CANABAL

Number of figures/tables	1
Distribution quantity	1
Title of new work	PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS TORREFACTOS DE PINO Y DE MEZCLAS DE PINO CON EUCALIPTO
Institution name	University Santiago de Compostela
Expected presentation date	Nov 2024
Portions	Figure 3
The Requesting Person / Organization to Appear on the License	Andrés Iglesias Canabal
	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Requestor Location	Santiago de Compostela, 15782 Spain Attn: Mr. Andrés Iglesias
Billing Type	Invoice
	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Billing Address	Santiago de Compostela, Spain 15782 Attn: Mr. Andrés Iglesias
Total	0.00 EUR

- Las **Figuras 13, 14, 15, 16 y 17** pertenecen al libro *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, específicamente al capítulo 4, y permiten su reproducción bajo el siguiente acuerdo.

This Agreement between Andrés Iglesias Canabal ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5890170427538
License date	Oct 15, 2024
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Elsevier Books
Licensed Content Title	Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction
Licensed Content Author	Prabir Basu
Licensed Content Date	Jan 1, 2013
Licensed Content Pages	59
Start Page	87
End Page	145
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	5
Format	both print and electronic

ANDRÉS IGLESIAS CANABAL

Are you the author of this Elsevier chapter?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS TORREFACTOS DE PINO Y DE MEZCLAS DE PINO CON EUCALIPTO
Institution name	University Santiago de Compostela
Expected presentation date	Nov 2024
Portions	4.9A, 4.9B, 4.9E, 4.9F, 4.9H
The Requesting Person / Organization to Appear on the License	Andrés Iglesias Canabal
Requestor Location	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Publisher Tax ID	Santiago de Compostela, 15782 Spain Attn: Mr. Andrés Iglesias
Billing Type	Invoice
Billing Address	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Total	Santiago de Compostela, Spain 15782 Attn: Mr. Andrés Iglesias
	0.00 EUR

- La **Figura 19** pertenece a la empresa Avebiom que permite su reproducción mediante el siguiente acuerdo.

Autorización

Desde Diego Camino <tecnico@avebiom.org>

Data Mar, 15/10/2024 á45 10:33

A IGLESIAS CANABAL ANDRES <a.iglesias.canabal@usc.es>

Non adoitas recibir correos electrónicos de tecnico@avebiom.org. [Descubre por que é importante](#)

Buenos días Andrés,

Por parte de AVEBIOM no hay ningún problema en la utilización de dicha imagen del MAPA DE BIOCOMBUSTIBLES para tu tesis, únicamente sugerimos que cites la fuente ya que es una información elaborada por nosotros.

Recibe un cordial saludo.

Diego Camino de la Cal
AVEBIOM

Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa
Spanish Bioenergy Association

C/ San Blas, 14. Esc. Dcha. Entreplanta.

47003 VALLADOLID

Telf. 983 188 540 // Mov. 672 286 121

tecnico@avebiom.org

www.avebiom.org



- Las **Figuras 38 y 57** pertenecen al libro *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, específicamente al capítulo 3, y permiten su reproducción bajo el siguiente acuerdo.

This Agreement between Andrés Iglesias Canabal ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5890160094803
License date	Oct 15, 2024
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Elsevier Books
Licensed Content Title	Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction
Licensed Content Author	Prabir Basu
Licensed Content Date	Jan 1, 2013
Licensed Content Pages	40
Start Page	47
End Page	86
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	both print and electronic

Are you the author of this Elsevier chapter?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE PELLETS TORREFACTOS DE PINO Y DE MEZCLAS DE PINO CON EUCALIPTO
Institution name	University Santiago de Compostela
Expected presentation date	Nov 2024
Portions	Figure 3.10
The Requesting Person / Organization to Appear on the License	Andrés Iglesias Canabal
Requestor Location	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Publisher Tax ID	Santiago de Compostela, 15782 Spain Attn: Mr. Andrés Iglesias
Billing Type	Invoice
Billing Address	Mr. Andrés Iglesias University Santiago de Compostela
Total	Santiago de Compostela, Spain 15782 Attn: Mr. Andrés Iglesias
	0.00 EUR

- La **Figura 65** pertenece a dos artículos: el primero de ellos perteneciente a la revista *Energy & Fuels* que permite la reproducción de contenido, tanto en formato impreso y electrónico, para su uso en esta tesis con la licencia con Copyright Clearance Center's RightsLink (<https://www.copyright.com/>); y el segundo artículo de la revista *Frontiers*, es de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia de Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Se permite el uso, distribución o reproducción de su contenido.



La producción de pellets A1+ en Galicia se basa exclusivamente en la utilización de puntal de pino descortezado como materia prima. Los pellets resultantes poseen excelentes propiedades energéticas, incluyendo un alto poder calorífico y bajo contenido de humedad y cenizas. Ante las incertidumbres de la sobre la futura disponibilidad de pino a precios razonables, se ha estudiado en esta tesis el empleo de *Pinus radiata* y de mezclas de pino y eucalipto (en concreto *Eucalyptus nitens*) para producir dos tipos de biocombustibles: astilla y pellet, bien en crudo o con tratamiento térmico de torrefacción.