



TESIS DOCTORAL

OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE CALIDAD, A PARTIR DE LA BIOMASA PROCEDENTE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y CULTIVO HERBÁCEO.

LUIS ROYANO BARROSO

Modelización y Experimentación en Ciencia y Tecnología

Conformidad de los directores:

Dr. Juan Félix González González
Catedrático de Universidad

Dr. Jerónimo González Cortés
Director científico de Finca La Orden
(CICYTEX)

2022

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de Tesis, los Doctores de D. Juan Félix González González y D. Jerónimo González Cortés, por la oportunidad ofrecida, así como orientación y dedicación transmitida pero, sobre todo, por su absoluta disponibilidad y valiosos consejos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

A mi compañera, la Doctora Ana Isabel Parralejo Alcobendas, por su gran disposición a la hora de asesorarme y mejorar con sus conocimientos este trabajo.

A todos mis compañe@rs del grupo de trabajo de cultivos energéticos y no alimentarios, por su apoyo, compañerismo y colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto de Investigaciones Agrarias Finca La Orden-Valdesequera (CICYTEX) por permitir que todos los medios disponibles en el mismo hayan podido servirme para conseguir realizar mis trabajos.

A todos ellos, gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, por haberme dado la posibilidad de estudiar y llegar a conseguir nuevas metas.

A mi hermana, por haberme apoyado y aconsejado siempre con su experiencia en todos los años de estudiante.

Y una dedicación muy especial para mi mujer Sonia, mi hija Julia e hijo Marco, por haberles robado horas de estar junto a ellos durante este trabajo, y haberme dado siempre su amor y apoyo. Sin esta gran familia muchas de estas metas no tendrían sentido.

Gracias y os quiero.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	28
1.1 Antecedentes y desarrollo actual del cambio climático y EERR.....	28
1.2 Bioeconomía y bioenergía.....	37
1.2.1 Bioeconomía y Pacto Verde (Green Deal).....	40
1.2.2 Bioenergía.....	42
1.3 Biomasa.....	44
1.4 Tipos de biocombustibles sólidos.....	52
1.4.1 Astillas.....	53
1.4.2 Pelets.....	53
1.5 Técnicas de pretratamiento de biomasa para reducción de cenizas.....	57
1.6 Especies estudiadas	60
1.6.1 Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L.).....	60
1.6.2 Paulownia (<i>Paulownia tomentosa</i>).....	62
1.6.3 Ciruelo (<i>Prunus domestica</i> L.).....	65
1.6.4 Olivo (<i>Olea europea</i> L. var. <i>europaea</i>).	67
1.7 Viabilidad de la producción de pélets obtenidos.....	70
2. OBJETIVOS.....	72
3. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	73
3.1 Localización del ensayo.....	73
3.2 Material vegetal empleado en el estudio.....	74
3.3 Proceso de transformación de la biomasa sólida.....	74
3.4 Caracterización energética de la biomasa.....	77
3.4.1 Poder calorífico superior (PCS).....	77
3.4.2 Poder calorífico inferior (PCI).....	78
3.4.3 Durabilidad.....	78
3.4.4 Temperatura de fusión de cenizas.....	79
3.4.5 Análisis inmediato.....	79
3.4.5.1 Determinación del contenido en humedad.....	80
3.4.5.2 Determinación del contenido en cenizas.....	80
3.4.6 Análisis elemental.....	82
3.4.7 Determinación de elementos mayoritarios.....	83

3.4.8 Normas de clasificación de los biocombustibles.....	84
3.5 Ensayos de combustión en calderas.....	86
3.6 Diseño y análisis estadístico de los datos.....	90
3.7 Ensayo de cribado y lavado de astillas de biomasa a nivel de laboratorio.....	91
3.8 Método experimental utilizado a nivel de laboratorio.....	91
3.8.1 Test Serie 1: Descortezado.....	92
3.8.2 Test Serie 2: Triturado.....	92
3.8.3 Test Serie 2: Fraccionamiento mecánico.....	93
3.8.4 Test Serie 3: Lavado de biomasa.....	94
3.9 Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos.....	96
4. RESULTADOS.....	97
4.1 Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L.).....	97
4.1.1 Resultados del cribado.....	97
4.1.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	98
4.1.3 Resultados del análisis elemental y contenido en Cl.....	98
4.1.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	102
4.1.5 Resultados del poder calorífico.....	113
4.1.6 Caracterización de los pélets.....	114
4.2 Ciruelo (<i>Prunus doméstica</i> L.).....	104
4.2.1 Resultados del cribado.....	104
4.2.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	105
4.2.3 Resultados del análisis elemental.....	106
4.2.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	111
4.2.5 Resultados del poder calorífico.....	113
4.2.6 Caracterización de los pélets de ciruelo.....	114
4.3 Olivo (<i>Olea europea</i> L. var. <i>europaea</i>).....	114
4.3.1 Resultados del cribado.....	114
4.3.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	115
4.3.3 Resultados del análisis elemental.....	116
4.3.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	120
4.3.5 Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.....	123
4.3.6 Resultados del poder calorífico.....	123
4.3.7 Caracterización de los pélets de olivo.....	124

4.4 Paulownia (<i>Paulownia tomentosa</i>)	125
4.4.1 Resultados del cribado.....	125
4.4.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	126
4.4.3 Resultados del análisis elemental.....	126
4.4.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	130
4.4.5 Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.....	133
4.4.6 Resultados del poder calorífico.....	133
4.4.7 Caracterización de los pélets de paulownia.....	134
4.5 Ensayo de combustión en calderas	135
4.6 Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos	141
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	144
5.1 Discusión de resultados 1: Cardo (<i>Cynara cardunculus L.</i>)	144
5.1.1 Resultados del cribado.....	144
5.1.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	145
5.1.3 Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.....	148
5.1.3.1 Contenido en nitrógeno.....	149
5.1.3.2 Contenido en carbono.....	151
5.1.3.3 Contenido en hidrógeno.....	153
5.1.3.4 Contenido en azufre.....	154
5.1.3.5 Contenido en cloro.....	156
5.1.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	158
5.1.5 Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.....	161
5.1.6 Resultados del poder calorífico.....	162
5.1.7 Caracterización de los pélets de cardo.....	162
5.2 Discusión de resultados 2: Ciruelo (<i>Prunus doméstica L.</i>)	163
5.2.1 Resultados del cribado.....	163
5.2.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	165
5.2.3 Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.....	168
5.2.3.1 Contenido en nitrógeno.....	170
5.2.3.2 Contenido en carbono.....	171
5.2.3.3 Contenido en hidrógeno.....	174
5.2.3.4 Contenido en azufre.....	176
5.2.3.5 Contenido en cloro.....	177

5.2.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	178
5.2.5 Resultado de la temperatura de fusibilidad de cenizas.....	182
5.2.6 Resultados del poder calorífico.....	182
5.2.7 Caracterización de los pélets de ciruelo.....	183
5.3 Discusión de resultados 3: Olivo (<i>Olea europea</i> L. var. <i>europaea</i>).....	185
5.3.1 Resultados del cribado.....	185
5.3.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	186
5.3.3 Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.....	190
5.3.3.1 Contenido en nitrógeno.....	191
5.3.3.2 Contenido en carbono.....	194
5.3.3.3 Contenido en hidrógeno.....	196
5.3.3.4 Contenido en azufre.....	198
5.3.3.5 Contenido en cloro.....	198
5.3.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	199
5.3.5 Resultados de la temperatura de fusión de cenizas.....	203
5.3.6 Resultados del poder calorífico.....	204
5.3.7 Caracterización de los pélets de olivo.....	204
5.4 Discusión de resultados 4: Paulownia (<i>Paulownia tomentosa</i>).....	206
5.4.1 Resultados del cribado.....	206
5.4.2 Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.....	207
5.4.3 Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.....	210
5.4.3.1 Contenido en nitrógeno.....	211
5.4.3.2 Contenido en carbono.....	214
5.4.3.3 Contenido en hidrógeno.....	216
5.4.3.4 Contenido en azufre.....	217
5.4.3.5 Contenido en cloro.....	218
5.4.4 Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.....	219
5.4.5 Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.....	223
5.4.6 Resultados del poder calorífico.....	224
5.4.7 Caracterización de los pélets de paulownia.....	225
5.5 Ensayo de combustión en calderas.....	229
5.6 Estudio económico.....	234
6. CONCLUSIONES.....	236

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las emisiones de CO ₂	29
Figura 2. Consumo de energía primaria en el mundo 2018.....	32
Figura 3. Estrategia a seguir por Extremadura 2030.....	34
Figura 4. Materias primas para bioenergía.....	44
Figura 5. Clasificación de los tipos de biomasa.....	45
Figura 6. Plantación de cardos.....	62
Figuras 7. Plantación (izquierda) y rebrote en paulownia (derecha).....	64
Figura 8. Mapa de residuos agrícolas de ciruelo susceptibles de procesamiento año 2016..	67
Figura 9. Residuos de poda de olivar en Cicytex.....	69
Figura 10. Imagen satélite con la localización de los terrenos del Instituto de Investigaciones Agrarias Finca “La Orden-Valdesequera”.....	73
Figura 11. Astilladora forestal.....	75
Figura 12. Pélets de poda de olivo.....	76
Figura 13. Peletizadora SINTE 1000. Planta de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.....	76
Figura 14. Bomba calorimétrica 6100 PARR. Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca La Orden.....	77
Figura 15. Analizador TGA 701 Leco. Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.....	81
Figura 16. Analizador elemental TruSpec CHNS Leco 4084. Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.....	82
Figura 17. Analizador ICP-OES Varian 715 ES. Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.....	83
Figura 18. Microondas Milestone StarD. Laboratorio de caracterización biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.....	84
Figura 19. Caldera Ökofen Pellematic Condens para producción de calefacción y electricidad en los invernaderos de Cicytex.....	86
Figura 20. Motor Stirling integrado en la caldera para producción de electricidad.....	87
Figura 21. Caldera Lasian Bioselec Compact 30 para producción de calefacción en los invernaderos de Cicytex.....	87

Figura 22. Analizador de gases “Testo 335”	88
Figura 23. Seguimiento del proceso de combustión mediante analizador de gases portátil Testo en ambas calderas.....	89
Figura 24. Diagrama de bloques ilustrando el proceso experimental.....	91
Figura 25. Troncos de Paulownia con corteza y descortezado.....	92
Figura 26. Trituradora fabricada por Maquinas forestales Ventura.....	92
Figura 27. Equipo de tamizado HAVE UWL.....	93
Figura 28. Biomasa cribada con distintos tamices (base y 8 mm).....	94
Figura 29. Diagrama esquemático del experimento de lavado.....	95
Figura 30. Proceso de lavado de biomasa.....	95
Figura 31. Muestras de biomasa lavadas previo a su secado.....	95
Figura 32. Muestras de poda de ciruelo molidas.....	96
Figura 33. Esquema de una planta de producción de biocombustibles sólidos.....	141
Figura 34. Resultados del % de cenizas en biomasa de cardo cribada.....	144
Figura 35. Resultado en % del peso de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).....	145
Figura 36. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.....	146
Figura 37. Contenido en cenizas de la biomasa de cardo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	147
Figura 38. Contenido en cenizas de la biomasa de cardo con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	148
Figura 39. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada.	150
Figura 40. Contenido en nitrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	151

Figura 41. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de cardo lavada y cribada.	152
Figura 42. Contenido en carbono de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	152
Figura 43. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada.....	153
Figura 44. Contenido en hidrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	154
Figura 45. Evolución del contenido en azufre de la biomasa de cardo lavada y cribada.....	155
Figura 46. Contenido en azufre de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	156
Figura 47. Evolución del contenido en cloro de la biomasa de cardo lavada y cribada.....	157
Figura 48. Contenido en cloro de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	157
Figura 49. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de cardo.....	158
Figura 50. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de cardo.....	159
Figura 51. Contenido en K (ppm) de la biomasa de cardo.....	159
Figura 52. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de cardo.....	160
Figura 53. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de cardo.....	160
Figura 54. Contenido en P (ppm) de la biomasa de cardo.....	161
Figura 55. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de cardo.....	161

Figura 56. Poder calorífico en biomasa de cardo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	162
Figura 57. Resultados del % en peso de cenizas en biomasa de ciruelo cribada.....	164
Figura 58. Resultado en % de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).....	164
Figura 59. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.....	166
Figura 60. Contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	167
Figura 61. Contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	168
Figura 62. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.....	171
Figura 63. Contenido en nitrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	171
Figura 64. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.	173
Figura 65. Contenido en carbono de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	173
Figura 66. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.....	175

Figura 67. Contenido en hidrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	176
Figura 68. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	179
Figura 69. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	179
Figura 70. Contenido en K (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	180
Figura 71. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	180
Figura 72. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	181
Figura 73. Contenido en P (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	182
Figura 74. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	182
Figura 75. Poder calorífico en biomasa de ciruelo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	183
Figura 76. Resultados del % de cenizas en biomasa de olivo cribada.....	186
Figura 77. Resultado en % de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).....	186
Figura 78. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.....	188
Figura 79. Contenido en cenizas de la biomasa de olivo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	189
Figura 80. Contenido en cenizas de la biomasa de olivo con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	190
Figura 81. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada.	193
Figura 82. Contenido en nitrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente	

para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	
Figura 83. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de olivo lavada y cribada.	193
Figura 84. Contenido en carbono de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	195
Figura 85. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada.	197
Figura 86. Contenido en hidrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	197
Figura 87. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de olivo.....	200
Figura 88. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de olivo.....	200
Figura 89. Contenido en K (ppm) de la biomasa de olivo.....	201
Figura 90. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de olivo.....	201
Figura 91. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de olivo.....	202
Figura 92. Contenido en P (ppm) de la biomasa de olivo.....	202
Figura 93. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de olivo.....	203
Figura 94. Poder calorífico en biomasa de olivo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	204
Figura 95. Resultados del % de cenizas en biomasa de paulownia cribada.....	207
Figura 96. Resultado en % en peso de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).....	207
Figura 97. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.....	209
Figura 98. Contenido en cenizas de la biomasa de paulownia con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente	

para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	209
Figura 99. Contenido en cenizas de la biomasa de paulownia con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	210
Figura 100. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada.....	213
Figura 101. Contenido en nitrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	214
Figura 102. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de paulownia lavada y cribada.....	215
Figura 103. Contenido en carbono de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	215
Figura 104. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada.....	217
Figura 105. Contenido en hidrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	217
Figura 106. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de paulownia.....	220
Figura 107. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de paulownia.....	220
Figura 108. Contenido en K (ppm) de la biomasa de paulownia.....	221
Figura 109. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de paulownia.....	221

Figura 110. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de paulownia.....	222
Figura 111. Contenido en P (ppm) de la biomasa de paulownia.....	222
Figura 112. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de paulownia.....	223
Figura 113. Poder calorífico en biomasa de paulownia. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).....	225
Figura 114. Temperatura de humos emitidos por la combustión de pélets de distintas biomosas.....	230
Figura 115. Emisiones de CO emitidas por la combustión de pélets de distintas biomosas.	231
Figura 116. Emisiones de NO emitidas por la combustión de pélets de distintas biomosas.	232
Figura 117. Rendimiento de las calderas con la combustión de pélets de distintas biomosas.....	233
Figura 118. Pantalla de información sobre la producción de electricidad generada en la caldera de condensación de los invernaderos de CICYTEX.....	233

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido en cenizas (%) de las distintas fracciones de las plantas.....	52
Tabla 2. Producciones de biomasa seca en Finca La Orden (CICYTEX).....	65
Tabla 3. Tipos de biomosas sólidas utilizadas en el ensayo.....	79
Tabla 4. Norma UNE-EN ISO 17225-6 “Especificación de pélets producidos a partir de biomasa herbácea, biomasa de frutos, biomasa acuática y conjuntos y mezclas de biomasa”.....	84
Tabla 5. Norma UNE-EN ISO 17225-4 “Especificaciones de astillas de madera para uso no industrial”.....	85
Tabla 6. Norma UNE-EN ISO 17225-2 “Especificaciones de pélets para uso no industrial”.....	85
Tabla 7. Norma UNE-EN- 303-5.....	89
Tabla 8. Resumen de los valores a cumplir en el reglamento 2015/1189.....	90
Tabla 9. Condiciones de lavado para los test de lavado.....	94
Tabla 10. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de cardo.....	97
Tabla 11. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.....	97
Tabla 12. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de cardo.....	98
Tabla 13. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo sin cribar.....	99
Tabla 14. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo cribada a 8 mm.....	100
Tabla 15. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.....	101
Tabla 16. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de cardo.....	102
Tabla 17. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de cardo.....	102
Tabla 18. Contenido en K (ppm) de la biomasa de cardo.....	102
Tabla 19. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de cardo.....	102
Tabla 20. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de cardo.....	103
Tabla 21. Contenido en P (ppm) de la biomasa de cardo.....	103
Tabla 22. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de cardo.....	103
Tabla 23. Poder calorífico en biomasa de cardo.....	104

Tabla 24. Caracterización de los pelets de cardo.....	104
Tabla 25. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de ciruelo.....	105
Tabla 26. Resultados del % de biomasa cribada en los distintos tamices.....	105
Tabla 27. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de ciruelo.....	106
Tabla 28. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo con corteza sin cribar.....	107
Tabla 29. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza sin cribar.....	108
Tabla 30. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza y cribada a 8 mm.....	109
Tabla 31. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.....	110
Tabla 32. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	111
Tabla 33. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	111
Tabla 34. Contenido en K (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	111
Tabla 35. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	112
Tabla 36. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	112
Tabla 37. Contenido en P (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	112
Tabla 38. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de ciruelo.....	113
Tabla 39. Poder calorífico en biomasa de ciruelo.....	113
Tabla 40. Caracterización de los pélets de ciruelo con corteza.....	114
Tabla 41. Caracterización de los pélets de ciruelo sin corteza.....	114
Tabla 42. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de olivo.....	115
Tabla 43. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.....	115
Tabla 44. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de olivo.....	116
Tabla 45. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo con corteza sin cribar.....	117
Tabla 46. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza sin cribar.....	118
Tabla 47. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza y cribada a 8 mm.....	119

Tabla 48. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.....	120
Tabla 49. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de olivo.....	121
Tabla 50. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de olivo.....	121
Tabla 51. Contenido en K (ppm) de la biomasa de olivo.....	121
Tabla 52. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de olivo.....	122
Tabla 53. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de olivo.....	122
Tabla 54. Contenido en P (ppm) de la biomasa de olivo.....	122
Tabla 55. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de olivo.....	123
Tabla 56. Poder calorífico en biomasa de olivo.....	124
Tabla 57. Caracterización de los pélets de olivo con corteza.....	124
Tabla 58. Caracterización de los pélets de olivo sin corteza.....	125
Tabla 59. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de paulownia.....	125
Tabla 60. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.....	125
Tabla 61. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de paulownia.....	126
Tabla 62. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia con corteza sin cribar.....	127
Tabla 63. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza sin cribar.....	128
Tabla 64. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza y cribada a 8 mm.....	129
Tabla 65. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.....	130
Tabla 66. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de paulownia.....	131
Tabla 67. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de paulownia.....	131
Tabla 68. Contenido en K (ppm) de la biomasa de paulownia.....	131
Tabla 69. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de paulownia.....	132
Tabla 70. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de paulownia.....	132
Tabla 71. Contenido en P (ppm) de la biomasa de paulownia.....	132
Tabla 72. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de paulownia.....	133
Tabla 73. Poder calorífico en biomasa de paulownia.....	134
Tabla 74. Caracterización de los pélets de paulownia con corteza.....	134

Tabla 75. Caracterización de los pélets de paulownia sin corteza.....	135
Tabla 76. Caracterización de los pélets de mezcla de paulownia + ciruelo.....	135
Tabla 77. Caracterización de los pélets de mezcla de paulownia + olivo.....	135
Tabla 78. Datos de medida de gases de combustión de pélets “A1” comerciales.....	136
Tabla 79. Datos de medida de gases de combustión de pélets cardo.....	136
Tabla 80. Datos de medida de gases de combustión de pélets de ciruelo con corteza.....	137
Tabla 81. Datos de medida de gases de combustión de pélets de ciruelo sin corteza.....	137
Tabla 82. Datos de medida de gases de combustión de pélets de olivo con corteza.....	138
Tabla 83. Datos de medida de gases de combustión de pélets de olivo sin corteza.....	138
Tabla 84. Datos de medida de gases de combustión de pélets de paulownia con corteza....	139
Tabla 85. Datos de medida de gases de combustión de pélets de paulownia sin corteza.....	139
Tabla 86. Datos de medida de gases de combustión de pélets de mezcla paulownia + ciruelo sin corteza.....	140
Tabla 87. Datos de medida de gases de combustión de pélets de mezcla paulownia + olivo sin corteza.....	140
Tabla 88. Costes de cultivo de <i>cynara cardunculus</i> L.....	142
Tabla 89. Costes de cultivo de paulownia.....	143
Tabla 90. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de cardo.....	145
Tabla 91. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo sin cribar.....	149
Tabla 92. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo cribada a 8 mm.....	149
Tabla 93. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo cribada a 8 mm y lavada a 45° C.....	149
Tabla 94. Contenido en nitrógeno en biomasa de cardo.....	150
Tabla 95. Contenido en carbono en biomasa de cardo.....	151
Tabla 96. Contenido en hidrógeno en biomasa de cardo.....	153
Tabla 97. Contenido en azufre en biomasa de cardo.....	155
Tabla 98. Contenido en cloro en biomasa de cardo.....	156
Tabla 99. Caracterización de los pélets de cardo.....	163
Tabla 100. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de ciruelo.....	165

Tabla 101. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo con corteza y sin cribar.....	169
Tabla 102. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza y sin cribar.....	169
Tabla 103. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm.....	169
Tabla 104. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.....	169
Tabla 105. Contenido en nitrógeno en biomasa de ciruelo.....	170
Tabla 106. Contenido en carbono en biomasa de ciruelo.....	172
Tabla 107. Contenido en hidrógeno en biomasa de ciruelo.....	175
Tabla 108. Contenido en azufre en biomasa de ciruelo.....	177
Tabla 109. Contenido en cloro en biomasa de ciruelo.....	178
Tabla 110. Caracterización de los pélets de ciruelo con corteza.....	184
Tabla 111. Caracterización de los pélets de ciruelo sin corteza.....	185
Tabla 112. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de olivo.....	188
Tabla 113. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo con corteza y sin cribar.....	190
Tabla 114. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza y sin cribar.....	191
Tabla 115. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm.....	191
Tabla 116. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.....	191
Tabla 117. Contenido en nitrógeno en biomasa de olivo.....	192
Tabla 118. Contenido en carbono en biomasa de olivo.....	194
Tabla 119. Contenido en hidrógeno en biomasa de olivo.....	196
Tabla 120. Contenido en azufre en biomasa de olivo.....	198
Tabla 121. Contenido en cloro en biomasa de olivo.....	199
Tabla 122. Caracterización de los pélets con corteza de olivo.....	205
Tabla 123. Caracterización de los pélets de olivo sin corteza.....	206

Tabla 124. Resultados del % en peso de ceniza en los distintos tiempos de lavado en la biomasa de paulownia.....	208
Tabla 125. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia con corteza y sin cribar.....	211
Tabla 126. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza y sin cribar.....	211
Tabla 127. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm.....	211
Tabla 128. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.....	211
Tabla 129. Contenido en nitrógeno en biomasa de paulownia.....	212
Tabla 130. Contenido en carbono en biomasa de paulownia.....	214
Tabla 131. Contenido en hidrógeno en biomasa de paulownia.....	216
Tabla 132. Contenido en azufre en biomasa de paulownia.....	218
Tabla 133. Contenido en cloro en biomasa de paulownia.....	219
Tabla 134. Caracterización de los pélets con corteza de paulownia.....	226
Tabla 135. Caracterización de los pélets de paulownia sin corteza.....	227
Tabla 136. Caracterización de los pélets de paulownia + ciruelo sin corteza.....	228
Tabla 137. Caracterización de los pélets de paulownia + olivo sin corteza.....	228

RESUMEN

El aprovechamiento de la biomasa procedente de la poda de árboles frutales y cultivos energéticos para la obtención de pélets de biocombustible puede ser una interesante alternativa en el Sur de Europa, generando valor añadido en las zonas rurales y favoreciendo el desarrollo de la economía verde y circular.

El potencial de Extremadura en recursos biomásicos es muy importante. Los residuos agrícolas procedentes de podas y de cosechas pueden ser utilizados de forma sostenible para obtener energía de forma descentralizada.

En la actualidad podemos hablar de un aumento en el interés por la reutilización energética de residuos biomásicos, promovido en gran medida por el incremento del coste (económico y medioambiental) de los combustibles fósiles.

Las instalaciones de producción energética con biomasa se abastecen de una amplia gama de biocombustibles, que van desde la biomasa procedente de cultivos energéticos al aprovechamiento de residuos de poda. La energía producida mediante biomasa puede destinarse a calefacción y producción de agua caliente en el sector doméstico, y calor y electricidad en el sector industrial.

Debido a la heterogeneidad de los residuos biomásicos, la caracterización y determinación de las propiedades físicas, químicas y energéticas es imprescindible para seleccionar el proceso que mejor se adapte a su aprovechamiento energético.

La existencia de una gran variabilidad en la procedencia de los residuos biomásicos y las tecnologías disponibles para su transformación, permiten que los biocombustibles obtenidos sustituyan a cualquier combustible fósil actual de una forma eficiente, segura y más económica.

Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal.

En esta Tesis se han estudiado las principales características de la biomasa de poda de ciruelo y olivo junto con los cultivos de paulownia y cynara, desde el punto de vista energético para su aplicación como biocombustible sólido en forma de pélets, analizando las variables que determinan la calidad de los mismos siguiendo las normas europeas. Se ha estudiado la obtención de pélets con y sin corteza y las mezclas de paulownia + ciruelo y paulownia + olivo, determinando su calidad según las normas europeas para biocombustibles sólidos.

Toda la biomasa utilizada fue recogida del Instituto de Investigaciones Agrarias Finca La Orden –Valdesequera en Guadajira (Badajoz). En este estudio se seleccionó una muestra representativa de cada una de las biomásas para después del corte, la mitad aproximadamente fueron descortezadas (biomásas leñosas) y cribadas. El material descortezado y la biomasa herbácea fueron tamizados a través de una serie de cribas de 1 mm, 3,15 mm, 8 mm, 16 mm y > 100 mm.

En las fracciones seleccionadas (con y sin corteza, tamizada a 3,15 y 8 mm), muestras de 200 g de las biomásas estudiadas se lavaron por lotes a temperatura ambiente (22°C) y a 45°C con agua desionizada destilada (relación de lixiviación de 10 l kg⁻¹). Los experimentos se realizaron con 4 repeticiones para cada muestra. Se realizaron lavados durante diferentes períodos: 5 minutos, 30 minutos, 60 minutos y 180 minutos. Las determinaciones de sus características como combustibles se realizaron en la biomasa según ISO 17225 para biocombustibles sólidos: contenido de cenizas, análisis elemental, poder calorífico, análisis de elementos mayoritarios en ICP/OES y durabilidad.

Por último, una vez que se tenían todas las biomásas estudiadas peletizadas, se realizaron unas pruebas de su comportamiento en procesos de combustión en dos tipos de calderas, una de combustión convencional y otra de última generación con condensación.

El contenido medio de cenizas de todas las biomásas estudiadas en esta Tesis se vio reducidas con el cribado y lavado de las mismas. A su vez en el caso de las biomásas leñosas, el descortezado también influyó de manera muy positiva en la reducción del contenido en cenizas. En el caso de la materia prima de ciruelo el % de cenizas fue de 2,39% con corteza, de 0,95% sin corteza y de 0,54% en el mejor de los casos para la biomasa descortezada, lavada y cribada. El olivo presentó un contenido en cenizas del

2,01% para el material con corteza, del 1,12% para el descortezado y del 0,66% para el mejor de los casos para la biomasa descortezada, lavada y cribada y por último para la biomasa de paulownia, los valores obtenidos fueron de 1,35%, 0,48% y 0,25% respectivamente.

Para la biomasa de cardo al ser un cultivo herbáceo solo se le realizaron los tratamientos de cribado y lavado, obteniéndose un % de cenizas del 13,93% para el material sin cribar y del 6,01% en el mejor de los tratamientos de lavado y cribado.

Finalmente, se realizó el peletizado de las biomásas estudiadas en sus distintos formatos (con corteza, descortezada y mezcla). Los pélets fabricados fueron caracterizados y evaluados según la norma europea 17225 para saber si se podían clasificar como A1, obteniéndose como resultado que los pélets con corteza de las biomásas leñosas estudiadas cumplían todos los parámetros según norma a excepción del contenido en cenizas, mientras que los pélets de ciruelo y paulownia descortezados cumplían con el contenido en cenizas pero no el de durabilidad. Los pélets de olivo fueron los únicos que cumplieron en sus dos formatos (con corteza y sin corteza) con el % de durabilidad exigido por la norma, pero sobrepasaban el % de cenizas. Las mezclas de paulownia + ciruelo y paulownia + olivo consiguieron el objetivo de reducir el % inicial de cenizas que contenían el ciruelo y el olivo descortezado, pero también provocaron la reducción del % de durabilidad por debajo de lo marcado en la norma.

Los ensayos de combustión realizados a todos los pélets producidos en esta Tesis en las dos calderas estudiadas (convencional y de condensación), dieron como resultado unos rendimientos medios del 80% para la caldera convencional y del 99% para la de condensación. Al igual que en el caso del rendimiento, los resultados obtenidos en el nivel de emisiones de CO (mg/m^3) y NO (mg/m^3) fueron mejores para la caldera de condensación frente a la convencional.

Finalmente, se realizó un estudio de la viabilidad de la producción de los pélets obtenidos desde una comparativa con los precios de producción y de venta actuales.

ABSTRACT

The use of biomass from pruning of fruit trees and energy crops to obtain biofuel pellets can be an interesting alternative in southern Europe, generating added value in rural areas and stimulating the development of the Green and Circular Economy.

The potential of Extremadura in biomass resources is very important. Agricultural residues from pruning and harvesting can be used in a sustainable way to obtain energy in a decentralized way.

At present, we can speak of an increase in interest in the energy use of biomass waste, promoted largely by the increase in the cost (economic and environmental) of fossil fuels.

Biomass energy production facilities are supplied with a wide range of biofuels, ranging from biomass from energy crops to the use of pruning waste. The energy produced through biomass can be used for heating and hot water production in the domestic sector, and heat and electricity in the industrial sector.

Due to the heterogeneity of biomass waste, the characterization and determination of the physical, chemical and energy properties is essential to select the process that best suits its energy use.

The existence of a great variability in the origin of biomass waste and the technologies available for its transformation, allow the obtained biofuels to replace any current fossil fuel in an efficient, safe and more economical way.

Within the group of solid biofuels, the most important are the primary type, consisting of lignocellulosic materials from the agricultural or forestry sector.

In this Thesis, the main characteristics of the plum and olive pruning biomass have been studied together with those from the paulownia and cynara crops, from the energy point of view for its application as solid biofuel in the form of pellets, analyzing the variables that determine their quality following European standards. Pellets with and without bark

and mixtures of paulownia + plum and paulownia + olive have been obtained, which have been characterized according to European standards for solid biofuels.

All biomass used was collected from the Agricultural Research Institute Finca La Orden –Valdesequera in Guadajira (Badajoz) from CICYTEX. In this study, a representative sample of each of the biomasses was selected. Approximately a half was debarked (only for woody biomass) and the other half was screened in different sizes. Debarked material and herbaceous biomass were sieved through a series of 1 mm, 3.15 mm, 8 mm, 16 mm and >100 mm sieves.

In the selected fractions (with and without bark, sieved at 3.15 and 8 mm), 200 g samples of the studied biomasses were batch washed at room temperature (22°C) and at 45°C with distilled deionized water (leaching ratio of 10 l kg⁻¹). Experiments were carried out with 4 repetitions for each sample. Washes were performed for different periods: 5 minutes, 30 minutes, 60 minutes and 180 minutes. Determinations were made in the biomass according to ISO 17225 for solid biofuels: ash content, elemental analysis, calorific value, ICP/OES analysis of major elements and durability.

Finally, once all the studied biomass had been pelletized, combustion tests were carried out in two types of boilers, one with conventional combustion and the other one with state-of-the-art condensing boiler.

The average ash content of all the biomasses studied in this Thesis was reduced by sieving and washing them. In addition, for woody biomass, debarking also had a very positive influence on the reduction of ash content. In the case of the plum tree raw material, the percentage of ashes was 2.39% with bark, 0.95% without bark and 0.54% for the debarked best sample, after its wash and sieve. Olive tree biomass presented an ash content of 2.01% for the material with bark, 1.12% for the debarked material and 0.66% for the best sample debarked, washed and sieved biomass. Finally, for the biomass of paulownia the values obtained were 1.35%, 0.48% and 0.25%, respectively.

For the thistle biomass, being an herbaceous crop, only screening and washing treatments were carried out, obtaining a % of ashes of 13.93% for the unscreened material and 6.01% in the best of the washing and screening treatments.

Selected samples of the biomass studied were pelletized in their different formats (with bark, debarked and mixed). The manufactured pellets were characterized and evaluated according to the European standard 17225 to determine if they could be classified as A1, being that those pellets with bark of woody biomasses studied met all the parameters except ash content threshold, while debarked plum and paulownia pellets met the ash content threshold but not for durability parameter. The olive pellets were the only ones that complied in their two formats (with bark and without bark) with the percentage of durability required by the standard but exceeded the percentage of ashes. The mixtures of paulownia + plum tree and paulownia + olive tree biomass achieved the objective of reducing the initial percentage of ashes contained in the plum tree and the debarked olive tree biomass, but they also caused a reduction in the percentage of durability below the standard.

Combustion gas tests were carried out for all the pellets produced in this Thesis in the two boilers studied (conventional and condensing), resulted in average yields of 80% for the conventional boiler and 99% for the condensing boiler. As in the case of yields, the results obtained in the level of CO (mg/m³) and NO (mg/m³) emissions were better for the condensing boiler compared to the conventional one.

Finally, a study was carried out on the viability of the production of the pellets obtained from a comparison with the current production and sale prices.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes y desarrollo actual del cambio climático y EERR.

El sistema energético mundial se basa fundamentalmente en la obtención de energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón mineral, que generan un incremento de los niveles de CO₂ en la atmósfera, provocando graves efectos medioambientales como el efecto invernadero y el calentamiento global. Además, estos recursos son limitados y están ubicados en zonas concretas del planeta, lo que provoca grandes desigualdades económicas entre los países que poseen reservas de combustibles fósiles y los que no. La climatización de nuestras viviendas, la iluminación, los electrodomésticos, los vehículos, el funcionamiento de la industria, la agricultura y los servicios públicos requieren de enormes aportes energéticos.

La influencia humana en el sistema climático es clara, las emisiones antropógenas actuales de gases de efecto invernadero (GEI) son las más altas de la historia y los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales [1].

La temperatura de la superficie terrestre y de los océanos se ha incrementado 0,85 °C durante el periodo de 1880 a 2012 y el volumen del nivel del mar ha aumentado como consecuencia del deshielo. Las emisiones de GEI han aumentado desde el comienzo de la era industrial. Desde los últimos 800.000 años se han ido incrementando las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Los efectos de las emisiones, se han detectado en todo el sistema climático y es probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX [2]. Como consecuencia, el pH del agua del océano ha aumentado un 26% su acidez debido a la incorporación de CO₂ en el océano. Según el IPCC (2013) [2] (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), entre el 1999 y 2011, los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida han ido perdiendo masa, los glaciales han continuado derritiéndose y las nevadas en primavera en el hemisferio norte se han reducido.

En la atmósfera se acumulan gases como el CO₂, ozono superficial (O₃) y clorofluorocarbonos como resultado de las actividades humanas, teniendo como consecuencia un aumento del calentamiento global, ya que esto ocurre porque actúan como una barrera entre la atmósfera y el espacio, que frena la pérdida de radiación infrarroja (calor) [3].

El crecimiento económico y el crecimiento demográfico son los responsables de los aumentos en las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles. Datos recientes afirman que la mayoría de las emisiones de los GEI provienen del consumo de éstos. Según el quinto informe de evaluación del IPCC (2015) [3], las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles y de los procesos industriales contribuyeron en un 78% a las emisiones de GEI totales en el periodo comprendido entre de 1970 a 2010, y es probable que más de la mitad del aumento observado en la temperatura media global en superficie en el período de 1951 a 2010 haya sido causado por la combinación del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero antropógenos. En la siguiente imagen se puede ver la evolución de las emisiones de CO₂ desde 1900 a 2020.

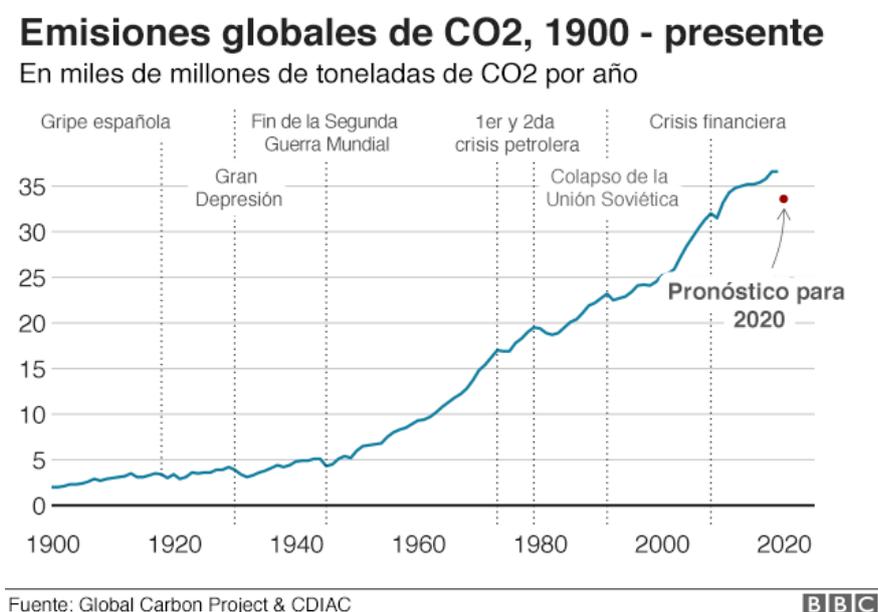


Figura 1. Evolución de las emisiones de CO₂ [4].

El efecto invernadero es un fenómeno mediante el cual determinados gases, como son el CO₂ y el metano, retienen una parte de energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Este fenómeno evita que la energía solar recibida por la Tierra vuelva de inmediato al espacio [3]. La emisión continua de gases de efecto invernadero causa un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático. Para contener el cambio climático sería necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual, junto con la adaptación, puede limitar los riesgos del cambio climático. No obstante, existen múltiples opciones para reducir las emisiones de GEI del sistema de energía sin dejar de satisfacer la demanda global de servicios energéticos. Sin embargo, para lograr reducciones sustanciales en las emisiones sería necesario realizar grandes cambios en los patrones de inversión. Desde el Cuarto Informe de Evaluación se ha experimentado un considerable aumento de planes y estrategias de mitigación nacionales y subnacionales [2]. Así el Acuerdo de París establece como objetivo, limitar el aumento de la temperatura media global por debajo de 2 °C. Existe, por tanto, la necesidad inminente de la utilización de un sector de energía con bajas emisiones de carbono. La energía renovable (ER), junto con las mejoras en la eficiencia energética, puede proporcionar el 90% de las reducciones de emisiones de CO₂ necesarias para 2050, según IRENA (International Renewable Energy Agency) [5].

A nivel nacional, y según la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia (2007), se persigue el cumplimiento de los compromisos de España en materia de cambio climático y el impulso de las energías limpias, al mismo tiempo que se consigue la mejora del bienestar social, el crecimiento económico y la protección del medio ambiente. Los principales objetivos operativos son:

- Asegurar la reducción de las emisiones de GEI en España.
- Contribuir al desarrollo sostenible y al cumplimiento de nuestros compromisos de cambio climático.
- Impulsar medidas adicionales de reducción en los sectores difusos.
- Aplicar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) promoviendo la integración de las medidas y estrategias de adaptación en las políticas sectoriales.
- Aumentar la concienciación y sensibilización pública en lo referente a energía limpia y cambio climático.

- Fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en materia de cambio climático y energía limpia.
- Garantizar la seguridad del abastecimiento de energía fomentando la penetración de energías más limpias, principalmente de carácter renovable.
- Impulsar el uso racional de la energía y el ahorro de recursos tanto para las empresas como para los consumidores finales.

El actual sistema energético excluye a la mayor parte de la población del mundo: el 20% más rico, consume el 80% de los recursos energéticos del mundo. Este modelo energético es insolidario e imposible de extender al conjunto del planeta, debido al carácter insuficiente de los recursos [6].

En España, el tipo de fuentes de energía consumidas y su localización obliga a que la mayoría de la energía primaria sea importada de otros países: Arabia Saudí, Irak, Venezuela, Rusia, Argelia... Esta dependencia energética debilita nuestro sistema socioeconómico en términos de coste e inestabilidad del suministro.

En suma, la elevada dependencia energética, el crecimiento de la demanda, el agotamiento de los recursos fósiles y la protección del medio ambiente hacen necesario disponer de alternativas energéticas, las cuales han motivado las labores de investigación y desarrollo de procesos de producción y transformación de nuevas fuentes energéticas.

En este escenario energético, una apuesta por el uso de energías renovables (figura 2) puede mejorar los efectos negativos de los combustibles fósiles sobre el medio ambiente. Además, el empleo de un amplio rango de fuentes naturales inagotables de las diferentes energías renovables (Biomasa, Eólica, Geotérmica, Marina, Hidráulica, Solar), favorece la seguridad del suministro energético debido al aumento de la diversidad energética por un lado y la disminución de la dependencia energética con el exterior por otro [7], y en definitiva a un reparto energético más equitativo entre países.

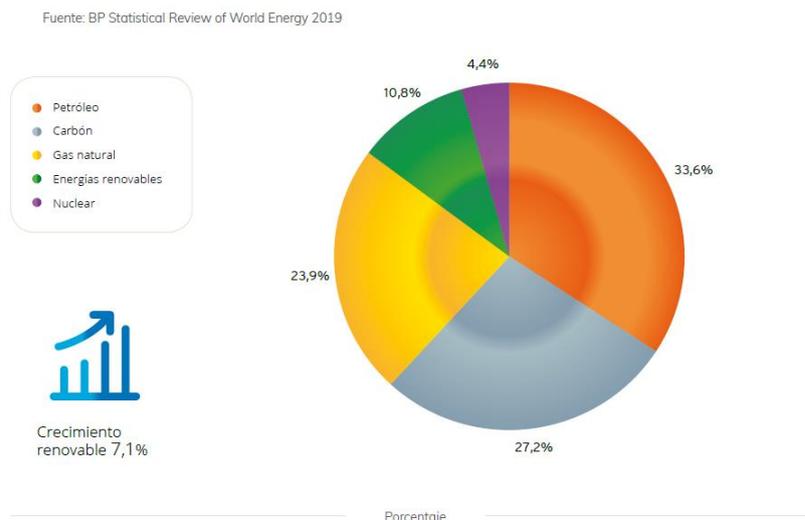


Figura 2. Consumo de energía primaria en el mundo 2018 [8].

La Unión Europea está comprometida con la acción del Acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible de Naciones Unidas. Según el programa de medio ambiente de las Naciones Unidas (UNEP) [9], define economía verde como aquella *que persigue la mejora del bienestar humano, reduciendo desigualdades a largo plazo, sin exponer a las generaciones futuras a riesgos ambientales y ecológicos*. Para hacer la transición a la economía verde en las áreas rurales se necesita voluntad política, desarrollo tecnológico y estímulos en el mercado, por lo que se considera fundamental la combinación de objetivos sociales, económicos y medioambientales.

Particularmente, la PAC apoya las políticas en el marco sobre el clima y la energía para el 2030, haciendo un llamamiento al sector agrícola con el objetivo de reducir las emisiones al menos el 40% hasta 2030.

La agricultura europea tiene que esforzarse para conseguir los objetivos medioambientales de la UE. Ésta propone lograr una economía sostenible hipocarbónica, mediante el desarrollo de actividades económicas con un nivel mínimo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la biosfera, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, para ello se busca una transición a una economía más circular, donde el valor del producto, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos [10].

Los materiales basados en los recursos biológicos, los conocidos como los biomateriales, pueden ser utilizados en una amplia gama de productos y usos energéticos (como los biocarburantes). La bioeconomía ofrece por tanto alternativas a la energía y a los productos derivados de los combustibles fósiles. Para los agricultores, una nueva actividad no alimentaria abre nuevas posibilidades en sus explotaciones al poder producir biocombustibles. Gracias a esto pueden generar ingresos adicionales en la explotación o al menos reducir la dependencia de los combustibles fósiles en zonas rurales, ya que es esencial en la transición hacia la economía rural verde asegurarse que los sectores de producciones primarias agrícolas y forestales sean sostenibles a largo plazo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

A nivel regional, la Junta de Extremadura, ha iniciado la transición hacia un referente propio de una economía verde y circular extremeño, con la capacidad de generar riqueza y empleo, a través de las enormes fortalezas ligadas a los recursos naturales que Extremadura posee. La región cuenta con unas peculiaridades como son:

- Ser la primera de España en superficie arbolada y la cuarta del país en superficie forestal.
- Ser la cuarta región en superficie destinada a la agricultura ecológica.
- Ser la capital mundial de la dehesa, referencia mundial de biodiversidad.
- Ser la primera región del mundo que cubre la mayor parte de sus necesidades con energía precedentes del sol.
- Ser la segunda región productora nacional de energía termosolar y la tercera de fotovoltaica.
- La tercera parte de toda el agua embalsada en España se encuentra en Extremadura, cuenta con espacios y especies de relevancia a nivel mundial con más del 30% del territorio protegido.
- Es la región con uno de los mejores puestos de calidad del aire y con uno de los cielos con menor contaminación lumínica.

Para ello, la Junta de Extremadura ha diseñado un marco regional de impulso a la economía verde y circular donde uno de los objetivos que persigue es convertir a

Extremadura en una comunidad de referencia en economía verde y en economía circular (www.extremadura2030.com) [11].

La Estrategia de Economía Verde y Circular Extremadura 2030 (figura 3) pretende unir y alinear la mayor parte de los recursos materiales y humanos existentes en Extremadura en la búsqueda de una sociedad y una economía más verde y circular, donde los recursos naturales supongan una fuente permanente de obtención de oportunidades para la población extremeña (Extremadura 2030, 2016).



Figura 3. Estrategia a seguir por Extremadura 2030 [11].

La actividad agraria genera cada año en Europa más de 25 millones de toneladas de restos provenientes de las tareas de poda y sustitución de arbolado cuyo destino en su mayor parte es la quema o la trituración y posterior esparcido sobre el terreno.

Respecto a la quema, a pesar de que a través de la PAC se ha prohibido la realización de esta práctica por parte de los agricultores, lo cierto es que afecta solamente a los agricultores perceptores de ayudas europeas y son los gobiernos regionales quienes establecen la normativa que regula esta práctica, permitiéndola en determinadas áreas, condiciones y periodos de tiempo, por lo que no se elimina el riesgo total que, cada año es responsable de más del 50% de los incendios del área Mediterránea.

Por otro lado, teniendo en cuenta los objetivos marcados por los Estados Miembro a través de los Planes de Energía Renovable para 2020, y en línea con los objetivos estratégicos de la *Roadmap to a Resource Efficient Europe* será necesario aumentar el consumo de biomasa sólida para reducir el empleo de combustibles de origen fósil hasta los valores marcados como objetivo prioritario. Este consumo que debe provenir de fuentes de biomasa se estima en un rango que supera los 50 Mtep hasta el año 2020.

Por lo que ante esta realidad la valorización energética y la transformación de los residuos proveniente de los restos de poda agrícola supone una gran fuente energética no explotada de forma eficiente, y que por tanto debe desarrollarse tanto desde el punto de vista ambiental, económico y social, de forma que los restos vegetales, hasta ahora considerados y tratados en su mayor parte como residuos, se conviertan en una fuente de energía eficiente y sostenible.

En 2012, la superficie total de árboles frutales cultivados en la UE-28 fue de más de 1,2 millones de ha [12]. En España, la superficie destinada a frutales fue de 443.294 ha en 2017 [13]. En Extremadura (suroeste de España) los principales cultivos frutales son ciruelas (6.580 ha), peras (547 ha) y melocotones (9.125 ha) [14].

La crisis del COVID-19 está ralentizando, pero no parando el crecimiento de la energía renovable en el mundo. En 2021, la pandemia continúa afectando a la economía global y a la vida diaria. Sin embargo, los mercados renovables, especialmente la tecnología de generación de electricidad, han mostrado su resiliencia a la crisis [15]. Al contrario que para todos los combustibles, las renovables usadas para generación de electricidad crecieron casi un 7% en 2020. La demanda global de energía se redujo un 5%, pero los contratos a largo plazo, prioridad de acceso a la red e instalación continua de nuevas plantas, han permitido el crecimiento de la electricidad renovable. Esto más que compensa la reducción en la bioenergía para la industria y los biocombustibles para transporte, principalmente resultado de la menor actividad económica. El resultado neto es un incremento del 1% en la demanda de energía renovable en 2020. Se espera que entre 2020 y 2025 la capacidad total instalada supere a la de gas natural en 2020 y a la de carbón en 2024 [15]. Una recuperación en la demanda de biocombustibles líquidos puede mejorar su producción en 2021 y generar un crecimiento sostenible hasta 2025. La caída de la

actividad económica debido a la pandemia se prevé que impacte más en el consumo industrial que en edificios. Esto afecta a la demanda de renovables especialmente el uso de la bioenergía en la industria. El consumo global de calor renovable se prevé ser un 20% más alto en 2025 que en 2019, con un crecimiento mayor en edificios que en el sector industrial. A pesar de este incremento, las renovables representan solo el 12% del consumo de calor en 2025. Sin un significativo cambio en el consumo de calor no renovable, las emisiones de CO₂ en 2025 se esperan que sean solo un 2% más bajas que en 2019.

La bioenergía supone aproximadamente la décima parte de la producción total de energía primaria global. La bioenergía moderna es una importante fuente de energía renovable. En los últimos años, la bioenergía para electricidad y los biocombustibles para el transporte han crecido rápidamente. Sin embargo, el sector de calefacción se mantiene como la mayor aplicación de la bioenergía. La bioenergía moderna no incluye el uso tradicional de la biomasa en países en vías de desarrollo y economías emergentes para cocinar y calefacción, utilizando ineficientes chimeneas abiertas o estufas de cocina, lo cual impacta en la salud humana y el medio ambiente.

La bioenergía es una energía derivada de la biomasa. La biomasa es definida como un material el cual es directamente o indirectamente producida por la fotosíntesis, y que es utilizado como materia prima en la obtención de combustibles y sustitutos de productos petroquímicos y otros productos intensivos de la energía [16]. Residuos orgánicos forestales y de la agricultura, suponen una parte importante de la biomasa que se puede aplicar para la obtención de bioenergía y bioproductos.

Entre los mensajes clave del Workshop realizado por la Agencia Internacional de la Energía en colaboración con ADEME, la Agencia Francesa para la transición Ecológica en coordinación con IEA Bioenergy ExCo86 el 20 de octubre de 2020, están:

- La biomasa es un componente clave para reducir el impacto climático de las industrias, junto a la electrificación, hidrógeno y CCUS (captura de carbón y utilización/almacenamiento). Es importante dar a conocer el papel de la biomasa y de la bioenergía.

- Las industrias necesitan tener unas perspectivas a largo plazo y hacer compromisos reales hacia la neutralidad carbónica.
- El principal desafío es el bajo coste de las alternativas fósiles (si el coste del CO₂ no se tiene en cuenta).
- La disponibilidad y acceso a la biomasa es crucial para incrementar el papel de la biomasa en las transiciones de la industria. Las industrias de media escala pueden a menudo ajustar en demanda de biomasa a la biomasa disponible regionalmente.
- Estrategias específicas de mercado pueden ser aplicadas para productos biobasados y bajos en carbono, mediante etiquetas verdes. Las industrias pueden crear un mercado requiriendo industrias con baja huella de carbono.

Centrados en opciones probadas e innovadoras de energía y productos biobasados para reducir los de origen fósil, así como el incremento del uso de materias primas renovables para combatir el cambio climático, el concepto de Biorrefinería es una opción importante cuando se trata del procesado integral de recursos renovables y se aumenta el valor añadido de la biomasa. En una Biorrefinería se desarrolla el procesado sostenible de biomasa para obtener productos de mercado biobasado y bioenergía [17]

1.2. Bioeconomía y bioenergía.

La necesidad de seguridad energética combinada con la resiliencia local durante las crisis pandémicas, como la actual, es fundamental. Se puede facilitar mediante la priorización de cadenas de valor de base biológica dentro de sus entornos geográficos y se centran en opciones eficientes en el uso de recursos que utilizan biomasa local, contribuyen al desarrollo económico rural y cumplen los objetivos generales de cambio climático y circularidad [18]. Una bioeconomía circular con cadenas de suministro cortas ofrece la oportunidad de mejorar la resiliencia mediante la movilización de los recursos de biomasa locales, la mejora de la eficiencia de los recursos a través del aprovechamiento en cascada y la valorización de los desechos que de otro modo tendrían que eliminarse, y aprovechando las fortalezas específicas dentro de las regiones de la UE [19]. Este enfoque logrará una mayor aceptación del mercado de la biomasa doméstica, mitigará la competencia de las materias primas y facilitará el desarrollo rural, industrial y económico, y simultáneamente generará una mayor participación de la biomasa dentro de los

objetivos del sector [18]. Las importaciones de energía fósil se reducirán posteriormente. Durante los primeros bloqueos relacionados con COVID-19, las energías renovables de biomasa, hidroeléctrica, solar y eólica continuaron produciéndose con normalidad. Con aumentos en la energía renovable variable de la energía fotovoltaica y eólica, la bioenergía como forma de almacenamiento de energía es un candidato perfecto para ofrecer equilibrio en los sistemas de calefacción de distrito y de electricidad [20]. Si bien las consideraciones anteriores se aplican al equilibrio de la red eléctrica, el papel de los biocombustibles en los futuros mercados de transporte puede ser más relevante que nunca y esencial para lograrlo incluso si se supone una alta penetración de electricidad en los transportes [21].

La bioenergía dentro de la bioeconomía en general puede de hecho devolver valor a la economía de la UE. Además, las inversiones en la producción de biocombustibles se centraron principalmente en sistemas, procesos y tecnologías diseñadas y construidas por las partes interesadas de la UE.

Por lo tanto, toda la cadena aumentaría la resiliencia de las empresas de la UE a lo largo de toda la cadena y favorecería el desarrollo económico y social sostenible en la era posterior al COVID-19, más allá de los beneficios ambientales. Esto encajaría perfectamente dentro de las prioridades del Pacto Verde Europeo (European Green Deal) [22]. Las principales prioridades del Pacto Verde dentro de cada sector son:

- Sector de la agricultura
 - Fomentar la agroecología, las prácticas de cultivo de carbono (Ej. Rotación de cultivos, cultivos de cubiertas) y la recuperación de tierras degradadas.
 - Apoyar modos agrícolas más sostenibles a través de fertilizantes/nutrientes orgánicos y agricultura urbana.
 - Acelerar la transición de los sistemas ganaderos a niveles y prácticas sostenibles.
 - Fortalecer a los agricultores en la transformación de la bioeconomía circular.

- Sector forestal
 - Apoyar el uso de soluciones basadas en la naturaleza para aumentar la producción de biomasa leñosa para bioproductos y bioenergía, incluida la extensión a la “silvicultura urbana”.

- Sector de la energía
 - Apoyar la producción avanzada de biocombustibles a partir de recursos locales como residuos y desechos, de cultivos intercalados y cultivos de cubierta y de la recuperación de tierras degradadas.
 - Apoyar proyectos de infraestructura ecológica (Ej., Producción combinada de calor y energía de base biológica a pequeña escala para el calor local e industrial, y para el equilibrio de la red de celdas de combustible de óxido sólido de alta eficiencia que utilizan biometano para la cogeneración, solución de red inteligente que permite mayores cantidades de renovables variables.

- Sector de los materiales.
 - Estimular los productos biológicos para los hogares y las empresas que compran productos bajos en carbono.
 - Sistemas de cuotas para materiales de construcción de base biológica e incentivos para mejor uso de la madera y usos en cascada.

- Sector del transporte
 - Apoyar la infraestructura para el transporte público local de base biológica (y eléctrica) y los respectivos vehículos compartidos.

- Sector transversal
 - Apoyar las biorrefinerías descentralizadas, el bioprocesamiento innovador

y estimular una bioeconomía a través de la participación de la sociedad en todos los niveles.

En los Sistemas de Energía puede ser interesante estimular las cadenas de suministros locales y los esquemas descentralizados en bioenergía y biocombustibles, para apoyar la recuperación de la economía local a través de inversiones en combustibles o renovables, mejorando la resiliencia energética mediante la bioeconomía circular.

También es interesante analizar los criterios de sostenibilidad en el uso de toda la biomasa para apoyar la utilización óptima y asegurar que los impactos negativos en el almacenamiento y secuestro de carbono en los sistemas agrícolas y forestales sean evitados, minimizados o mejorados [23].

Una bioeconomía transformadora sostenible y circular que favorezca la innovación y la inclusión de la gente representa grandes oportunidades, con al menos soluciones parciales en la era post-COVID-19 y durante la recuperación económica de la UE. Estas oportunidades cubren todos los sectores de la bioeconomía -agricultura, pesca y sector forestal, alimentación, energía, materiales, transporte y turismo-, así como opciones transversales de financiación en biorrefinerías descentralizadas, bioprocesado innovador y la promoción de una bioeconomía inclusiva.

1.2.1. Bioeconomía y Pacto Verde (Green Deal).

El Pacto Verde Europeo lanzado en 2019 es la nueva estrategia de crecimiento de Europa, que persigue transformar la UE en una economía moderna, eficiente con los recursos y competitiva, en la que:

- No hay emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050.
- El crecimiento económico está desacoplado del uso de los recursos.
- Ninguna persona ni ningún lugar se quede atrás.

La bioeconomía, como catalizador del cambio estabilizador del cambio sistémico, aborda los aspectos económicos, sociales y ambientales del Green Deal, buscando nuevas formas de producir y consumir recursos respetando nuestros límites planetarios y alejándose de

una economía lineal basada en el uso extensivo de recursos fósiles y minerales [24].

Una bioeconomía circular y sostenible tiene el potencial de contribuir a todas las dimensiones y objetivos del Green Deal Europeo mediante:

- Cumplir con la prosperidad económica de Europa y garantizar una transición justa y equitativa.
- Producir materiales libres de materias primas fósiles para un futuro climáticamente neutro.
- Mejorar la protección del medio ambiente y los ecosistemas.

La bioeconomía jugará papel integral en impulsar la recuperación de la UE de la crisis del COVID-19 al alinear la economía con la biosfera. La bioeconomía mejorará así la resiliencia y la competitividad, aportando soluciones sistemáticas a largo plazo y asegurando un tránsito justo. Con su potencial para conectar e implementar políticas transformadoras holísticamente, la bioeconomía contribuirá a todas las dimensiones y objetivos del Green Deal de Europa. La investigación y la innovación permitirán a Europa liderar la transición verde y digital.

A continuación, se describen una serie de ejemplos de cómo la bioeconomía contribuye al Pacto Verde europeo:

- Acción para el clima en Europa. El secuestro de carbono en el suelo, carbono azul y en los bosques, y en almacenamiento en productos cosechados de madera, junto con material de sustitución basados en productos fósiles (plásticos, energía, textiles), pueden generar significantes reducciones de carbono.
- Promoviendo la energía limpia. Bioresiduos inevitables pueden ser convertidos en energía, incluyendo biocombustibles para sectores a los cuales la electrificación todavía es compleja (aviación, navegación etc.).
- Invirtiendo en transporte más inteligente y más sostenible. El uso de etanol celulósico hecho de residuos agrícolas en el sector del transporte puede conseguir importantes ahorros de emisiones comparado con los combustibles fósiles.
- Esforzándose en tener una industria más verde. El empleo circular de biomasa promueve la eficiencia y estimula la fabricación de productos de alto valor

añadido a partir de residuos.

- Eliminando la contaminación. La bioeconomía circular maximiza el uso de residuos agrícolas, de procesamiento de alimentos y de las industrias forestales, reduciendo además el volumen de residuos a vertedero. También, el uso de biofertilizantes, biopesticidas y control bio de plagas puede contribuir a conseguir los objetivos de las Estrategias del Campo a la Mesa y Biodiversidad, las cuales buscan reducir el uso y el riesgo de pesticidas y fertilizantes.
- Haciendo las cosas más eficientes energéticamente. El empleo de materiales aislantes biobasados como la fibra de celulosa y la lana de oveja pueden efectivamente aislar los edificios de una manera que también minimiza sus emisiones de gases de efecto invernadero.
- Protegiendo a la naturaleza. El desarrollo de bioeconomías sostenibles puede contribuir a la mejora de la biodiversidad mientras mejora la provisión de servicios ecosistémicos.

1.2.2. Bioenergía.

Aspectos medioambientales unidos al cambio climático y a la reducción de la disponibilidad de fuentes de energías fósil han determinado un mayor interés en las energías renovables. En la actualidad, se dispone de un nuevo escenario con un incremento de la contribución de las energías renovables hasta el 27% en Europa, además de una reducción del 40% en los gases de efecto invernadero para el año 2030 [25].

Actualmente, el sistema industrial es demasiado lineal, intenso en recursos con limitados suministros para la biodiversidad y servicios ecosistémicos y está mayormente basado en recursos no renovables. Hay innovaciones escalables y tecnológicas viables para producir alternativas biobasadas sostenibles que incluyen bioplásticos, nanocelulosa, textiles y bioenergía. En ambos, en bioproductos y en bioenergía las posibilidades para integrar procesos bioquímicos y termoquímicos ganan atención, así como la posibilidad de valorizar residuos y co-productos para mejorar la circularidad. También la extracción de materias primas críticas y su valorización más allá de los productos y rutas tradicionales deberían ser desarrolladas en combinación con los procesos de biorrefinería [26].

La bioeconomía debe formar parte activa del plan de recuperación post-covid-19 en la

UE. El uso de la tierra en la UE- especialmente en las zonas rurales- y las huellas implícitas en el exterior necesitan ser integradas, considerando las múltiples oportunidades para la vida rural, empleo e innovación, dentro y fuera de la UE. La circularidad requiere integración en términos de reciclado y reutilización de residuos para los cuales las biorrefinerías son clave. La diversidad no implica una debilidad sino una fortaleza, la bioeconomía diversificada de la UE es más resistente a los cambios en el suministro de materias primas, dinámicas de mercado e innovación tecnológica.

La crisis sin precedentes actual muestra un más amplio papel que la bioeconomía puede tener para diversificar el suministro para la alimentación humana, alimentación animal y materias primas, para contribuir a la circularidad y neutralidad climática mientras que al mismo tiempo se crea empleo y se facilita el desarrollo rural [27].

Una bioeconomía sostenible necesariamente incorporará la bioenergía, como componente clave, necesario no solo para la descarbonización (centrado particularmente en transporte, el sector más difícil de intervenir) sino también como medio para facilitar el desarrollo económico. Las cadenas de bioenergía bien diseñadas reducirán importaciones, incrementarán la seguridad energética y almacenamiento, y estimularán la economía local.

La bioenergía como parte de la bioeconomía puede también valorizar residuos de los productos biobasados de alto valor añadido. Las biorrefinerías contribuirán a sustituir componentes fósiles por componentes sostenibles biobasados, como biofertilizantes, bio-nutrientes, bioenmendantes y otros materiales biobasados cogenerados con biocombustibles y bioenergía. A continuación, en la figura 4 se pueden ver las distintas materias primas utilizaran para bioenergía.

El cambio de pensamiento lineal a un enfoque circular apoyado en cadenas de bioenergía sostenible incrementa la resiliencia de las cadenas de alimentación humana y animal, mejorando la eficiencia en el uso de la tierra.

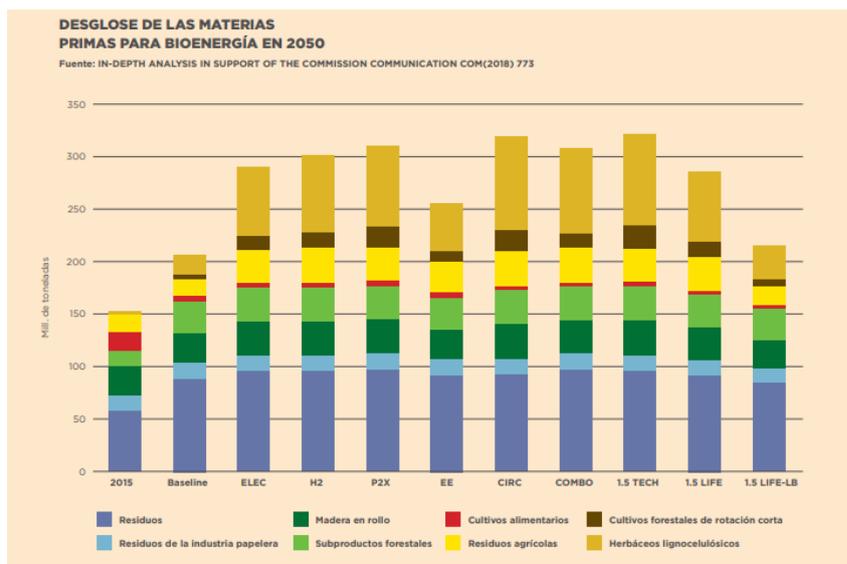


Figura 4. Materias primas para bioenergía [28].

1.3. Biomasa.

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la “biomasa” como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo.

La biomasa presenta una gran oportunidad para el sector agrario en el siglo XXI, ofreciéndole recuperar todo su potencial productivo, sin problemas de generación de excedentes, con un planteamiento sostenible basado en la viabilidad económica y el respeto al medio ambiente [29].

Teniendo en cuenta las definiciones anteriores de la biomasa, una de las clasificaciones (figura 5) que puede realizarse atendiendo a su origen es la siguiente [30]:

1. Biomasa natural
2. Biomasa residual

- a. Residuos agrícolas
 - b. Residuos forestales
 - c. Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias
 - d. Residuos de industrias forestales
 - e. Residuos ganaderos
 - f. Residuos urbanos
3. Excedentes agrícolas
4. Cultivos energéticos

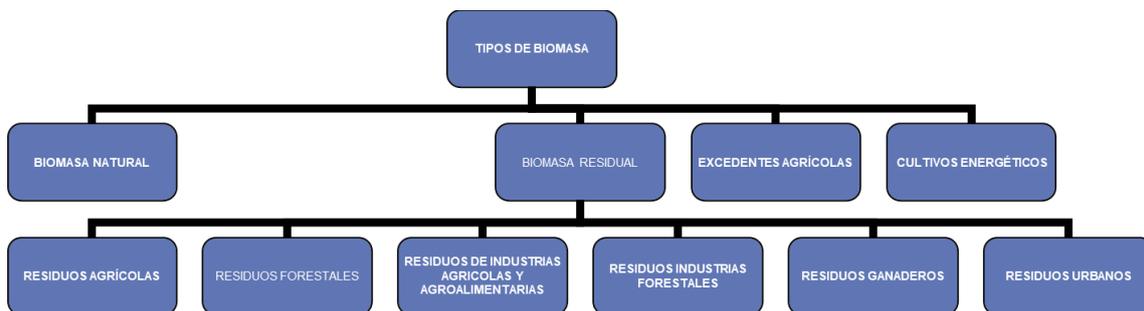


Figura 5. Clasificación de los tipos de biomasa.

→BIOMASA NATURAL: aquella que se produce en la naturaleza sin la intervención humana. Se trata fundamentalmente de residuos forestales derivados de la limpieza de bosque y de restos de plantaciones, leñas y ramas. La sobreexplotación de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente [31].

→BIOMASA RESIDUAL: es la que genera cualquier actividad humana que utiliza materia orgánica. La biomasa de origen residual puede definirse como *el conjunto de materiales orgánicos generados en las actividades de producción, transformación y consumo, que en el contexto en el que se generan no tienen valor económico*. La biomasa residual dependiendo de su origen puede clasificarse en: residuos agrícolas, forestales, ganaderos, e industriales. La gestión de estas biommasas reduce la contaminación, el riesgo de incendio y evita emisiones de CO₂. La biomasa residual se subdivide en:

- RESIDUOS AGRÍCOLAS: Los residuos agrícolas generalmente se trata de restos lignocelulósicos que se suelen quemar en las tierras de cultivo. Se pueden clasificar en función de su naturaleza y características físico-químicas en herbáceos y leñosos. A su vez estos residuos agrícolas se pueden dividir en:

- Los residuos agrícolas herbáceos proceden de plantas de tallo no leñoso que mueren al final de su temporada de crecimiento.
- Los residuos agrícolas leñosos proceden principalmente de las podas de los olivos, viñedos y frutales, por lo que su producción, al igual que en el caso de los anteriores, tiene un carácter estacional.
- RESIDUOS FORESTALES: son residuos generados en explotaciones forestales, interviene la actividad humana tales como talas, podas o clareos. Estos han de ser retirados de los bosques ya que generan riesgos de incendios y propagación de plagas.
- RESIDUOS DE INDUSTRIAS AGRÍCOLAS Y AGROALIMENTARIAS: este tipo de residuos son muy contaminantes a lo que se le suma la dificultad en cuanto a su eliminación. La valoración energética depende de su concentración de agua. Las industrias agroalimentarias que más cantidad de residuos generan son las almazaras (hueso de la aceituna y alperujo), arroz (cascarilla), bodegas (orujo) y las conservas vegetales.
- RESIDUO DE INDUSTRIAS FORESTALES: las industrias tales como aserraderos, las fábricas de productos elaborados como son las carpinterías o industria de muebles, fábricas de productos de corcho o de pasta de papel, generan residuos como el serrín o recortes de cortezas que se utilizan en las propias empresas como combustibles o como materia prima en otras industrias de madera.
- RESIDUOS GANADEROS: son aquellos producidos por las explotaciones ganaderas, generalmente estiércol, purines o gallinazas. Han sido y son utilizados para el abono de las tierras, aunque supone una gran problemática ambiental si no se lleva a cabo una buena práctica, pues pueden contaminar las aguas subterráneas y causar daños en los terrenos producidos por un exceso de determinados elementos. Una utilización de estos residuos diferente puede ser para producir combustibles sólidos o biogás.
- RESIDUOS URBANOS: relacionada con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), de las aguas residuales y de los lodos de depuradoras.

El potencial de biomasa disponible en España se sitúa en el entorno de los 88 millones de toneladas/año de biomasa primaria en verde, incluyendo restos de masas forestales

existentes, masas existentes sin explotar y cultivos energéticos a implantar.

La cantidad de biomasa que es posible extraer en Extremadura, sea ésta agrícola, forestal y/o de cultivos energéticos, puede llegar a ascender a unos 4 millones de toneladas al año, que si multiplicamos por un poder calorífico inferior medio de 4 kWh/kg, obtenemos un potencial de energía producida con biomasa de unos 16.000 GWh [32]. Debemos de tener en cuenta que de las 4.163.457 hectáreas de terreno con las que se cuenta en Extremadura, el 39% es ocupada por superficie forestal, el 24% de superficie de cultivo, el 29% de dehesa y pastizales y el 8% de otras [33].

El uso de biomasa de poda de árboles frutales para obtener biocombustibles (astillas y pélets) puede ser una alternativa interesante en el sur de Europa, generando valor añadido en las áreas rurales y favoreciendo el desarrollo de la economía verde y circular. Los árboles frutales deben ser arrancados cuando alcanzan una etapa de senescencia y la producción de frutos ya no es económicamente viable debido a la disminución del rendimiento. La etapa de senescencia se alcanza después de 12-15 años, aunque son posibles períodos más largos. La principal ventaja de la poda es que estos residuos pueden usarse sin interferir con la producción de fruta, porque ya es parte de la cadena de producción de alimentos [34]. La bibliografía consultada habla de unos rendimientos de biomasa para la poda de 1.0-3.0 t/ha anualmente [35,36]. Los estudios indican que los rendimientos cuando se realiza el arranque de la plantación están entre 11 y 21 t/ha [34,37].

Analizando la realidad del sector se puede decir que la principal barrera a superar para hacer llegar esta fuente de energía renovable al mercado está estrechamente relacionada con la cadena de logística y cómo conseguir que el aprovisionamiento de la materia prima, su manipulación y transporte desde el origen en la finca o campo hasta que la central de transformación de la biomasa sea económicamente viable. A pesar de todos los esfuerzos que se están haciendo en la actualidad, el hecho es que factores como la diversidad de los cultivos, marcos de plantación, tamaño de parcela, distribución difusa, y heterogeneidad en los restos vegetales han impedido conseguir poner en marcha un sistema de gestión y tratamiento que sea eficaz y permita explotar el aprovechamiento energético de este residuo.

Sin embargo, una vez superado el escollo descrito anteriormente, el uso de la biomasa como fuente de energía es una realidad a día de hoy avalada por factores como [31]:

- El encarecimiento del precio del petróleo.
- Necesidad de buscar usos alternativos a la producción agrícola.
- Cambio climático.
- La posibilidad de optimizar los procesos de obtención de energía.

A su vez la biomasa presenta una serie de ventajas, entre las que podríamos destacar:

- La combustión de la biomasa es neutra respecto a las emisiones de CO₂, ya que dichos gases habrían sido absorbidos por la planta previamente a través de la fotosíntesis [38,39].
- Bajos niveles de emisiones de NO_x y de SO₂ debido a que la madera producida por la fotosíntesis de la planta presenta bajos niveles de azufre y nitrógeno [40,41].
- El uso de la biomasa y de los residuos biológicos genera una independencia respecto a la energía exterior, mejorando la balanza comercial de un país y su sostenibilidad económica [42].

En la actualidad, el aprovechamiento de los residuos biomásicos como biocombustible sólido procedente de los cultivos leñosos se hace en centrales eléctricas de biomasa, al tratarse de un biocombustible clasificado como industrial por la normativa existente. Sin embargo, se puede preparar la biomasa residual de forma que se obtengan biocombustibles sólidos de mayor calidad en forma de pélets, destacando el contenido en cenizas como un parámetro fundamental a reducir para este objetivo. El incremento del contenido en cenizas reduce el valor del poder calorífico y aumenta el riesgo de formación de escorias, así como afecta negativamente al equipo de molido y peletizado [43]. El contenido en cenizas se incrementa con la cantidad de corteza en los pélets. Filbakk *et al.* (2011) [44] encontraron un contenido de cenizas cinco veces superior en la corteza (2,5 %) que en la madera descortezada (0,47%). Otros autores como Lerma-Arce *et al* (2017) [45] también encontraron mayores contenidos en cenizas en pélets de madera de pino con corteza, demostrando además que este contenido en cenizas era mayor en los pélets hechos con ramas que con troncos de mayor diámetro.

La corteza es generalmente un componente indeseable en los pélets de madera, ya que contiene considerablemente más nitrógeno, azufre y cenizas que la madera, creando problemas con emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y de formación de escorias durante la combustión [46,47].

En un estudio realizado con especies de crecimiento rápido para su aplicación en la producción de energía, la madera del árbol emperatriz (*Paulownia tomentosa*) tuvo el contenido en cenizas más bajo, reuniendo los requerimientos de la mejor clase de pelets (ENplus A1- uso industrial) [48].

La composición de la biomasa varía entre diferentes tipos de biomasa, y está fuertemente relacionado con el comportamiento como biocombustible. La composición incluye los tres componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina), junto con cantidades más pequeñas de componentes extractivos cenizas [49]. La madera está normalmente compuesta de un 25% de lignina variando entre el 15% y el 40% entre especies y pudiendo incrementarse después del almacenamiento de la biomasa debido a la reducción de la fracción de carbohidratos disponibles. El contenido en lignina de las pajas de cereal y *Miscanthus* es generalmente más bajo que en la madera [50,51]. La lignina es una macromolécula fenólica reticulada compleja de alto peso molecular y no es soluble en agua, siendo ópticamente inactiva. La fibra de celulosa está constituida por microfibrillas que están recubiertas por lignina y hemicelulosa [52,53]. La celulosa es un componente orgánico con formula genérica (C₆H₁₀O₅)_n. Está formada por una cadena lineal de un polímero de 100-1000 unidades de glucosa unidas por enlaces glucósidos β (1-4). La hemicelulosa es un polímero ramificado de D-xilosa, D-manosa, D-galactosa, D-glucosa y L-arabinosa con grado de polimeración entre 70 y 200.

La biomasa lignocelulósica puede ser convertida en biocombustible a través de conversión termoquímica y conversión bioquímica.

La conversión bioquímica incluye el tratamiento de la biomasa con microorganismos o enzimas para producir biogás, biometanol, bioetanol, etc. Los métodos termoquímicos requieren calor y en algunos casos un catalizador inorgánico para la conversión de la biomasa. Los procesos de conversión termoquímica incluyen gasificación, pirolisis y

combustión. La gasificación es la combustión parcial del combustible carbonoso para producir una mezcla de gases combustibles que pueden ser usados en la generación de calor y electricidad. La pirólisis de la biomasa supone el calentamiento de la biomasa a 450-600 °C en ausencia de oxígeno, obteniéndose char líquido, aceite pirolítico, gases no condensables y aerosoles. El rendimiento en aceite pirolítico desciende con el incremento en el contenido en cenizas de la biomasa [54].

Las pajas de cereales y de cultivos energéticos herbáceos también tienen mayores contenidos en cenizas (entre el 4% y el 7%), lo que supone un inconveniente para su aprovechamiento como biocombustible sólido.

El valor del poder calorífico de la biomasa depende principalmente de su contenido en materia volátil, carbono fijo y contenido en cenizas. La biomasa con mayor contenido en materias volátiles y carbono fijo, y con menores contenidos en cenizas es más respetuosa con el medio ambiente y por tanto más recomendable para los procesos de conversión en energía siempre y cuando vaya acompañado por una tecnología adecuada.

Las cenizas son utilizadas para describir el contenido inorgánico no-combustible de los biocombustibles. Las cenizas en la biomasa residual están generalmente en la forma de ceniza estructural ligada a las paredes celulares en la planta o a la pegada en la superficie procedente de fuera de la planta.

La ceniza estructural o antigénica es un tipo de depósito de nutrientes dentro de las fibras de las plantas. La ceniza estructural es formada en la biomasa e introducida vía extracción o transporte de mineral dentro de la planta por el agua y suelo durante su crecimiento, así como la generada después de la muerte de las plantas a través de la evaporación y la precipitación [55].

El C, H y O en las plantas proceden de la atmósfera, suelo y agua, mientras que el resto de elementos son suministrados por los minerales del suelo y de los fertilizantes orgánicos o inorgánicos [54]. Los componentes inorgánicos de la biomasa posiblemente sean los principales responsables del desgaste de los equipos de proceso de la biomasa, por su naturaleza más dura y abrasiva comparada con los tejidos orgánicos. Hay dos fuentes principales: contenidos inorgánicos intrínsecos (en las paredes celulares y en los tejidos

de los procesos fisiológicos normales), y contenidos inorgánicos extrínsecos (normalmente contaminantes del suelo o polvo adherido a la superficie de la biomasa o recogidos durante la cosecha [56]).

Durante los procesos de conversión termoquímica tales como la combustión, pirólisis y gasificación, la presencia de componentes inorgánicos de las cenizas de ciertos tipos de biomasa es perjudicial. Los elementos que forman las cenizas pueden causar problemas en los reactores, hornos, calderas, intercambiadores de calor, etc., formando escorias y corrosión en los equipos. El alto contenido en algunos elementos (por ejemplo Si, K y Na) bajan la temperatura de fusión de las cortezas [57], y alto contenido de K, Si, Mg y P incrementa la tendencia a producir más escorias [58]. La formación de escorias reduce la vida útil y el funcionamiento de la caldera. Trabajar bajo estas condiciones y tratar las emisiones de partículas suponen costes adicionales en el proceso. La formación de escorias tiene lugar en las zonas de más temperaturas de la caldera o reactor. La interacción de los depósitos con las superficies de metal de la caldera acelera la corrosión. Además, la suspensión de las cenizas volantes en los gases calientes reduce la transferencia de calor por convección.

Los residuos de cultivo son biocombustibles para generación de energía (calor y electricidad). La calidad como biocombustible sólido de los residuos herbáceos es más baja si se compara con los residuos leñosos debido a su mayor contenido en cenizas. Contenidos más altos de algunos elementos (por ejemplo: Si, k y Na) pueden reducir la temperatura de fusión de las cenizas e incrementar la posibilidad de formación de escorias [59]. Cuando el contenido en cenizas se incrementa, el poder calorífico de la biomasa disminuye ya que las cenizas reducen los compuestos combustibles en la biomasa. Las cenizas pueden también afectar las propiedades de los productos pirolíticos como bioaceites, carbón activo y fibras de carbono [60].

En la tabla 1 se puede observar como el contenido en cenizas de una planta varía entre las distintas fracciones de la planta. Werkelin *et al* (2005) [61] determinaron las cenizas totales en diferentes fracciones de abeto, pino, abedul y chopo y concluyeron que el contenido en cenizas varía significativamente entre las fracciones. El contenido en cenizas en los tejidos de la madera fue del 0,2-0,7% incluyendo muestras de troncos y ramas. El contenido en las hojas fue el más alto 2,4-7,7%, mientras que el contenido en

cenizas del tejido de la corteza estuvo entre el 1,9-6,4%, siendo aproximadamente 10 veces mayores que los correspondientes a los tejidos de la madera.

Tabla 1. Contenido en cenizas (%) de las distintas fracciones de las plantas.

Fraciones de la planta	Abeto	Pino	Abedul	Chopo
Tronco	0,3	0,3	0,3	0,4
ramas	0,5	0,4	0,4	0,6
Corteza de tronco	2,6	2,4	2,5	4,1
Corteza de ramas	4,1	3,3	4,2	6,1
Ramillas	2,3	2,1	2	3,9
Acículas	5,2	2,5	-	-
Hojas	4	3	5,2	7,5

Fuente: Werkelin *et al.* (2005) [61].

A la hora de realizar los análisis de combustión en la caldera de biomasa, se tendrá en cuenta la experiencia del Grupo de Investigación Aprovechamiento Integral de Residuos Biomásicos. Energías Renovables (GAIRBER) que queda reflejada en las siguientes publicaciones [62, 63, 64, 65 y 66].

1.4. Tipos de biocombustibles sólidos.

Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal. Los restos de poda de vid, olivo y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son utilizados para la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Los podemos clasificar en cuatro tipos:

1. Leña → Es la madera obtenida directamente del árbol con su formato original, es la madera en bruto.
2. Astillas → Son el resultado de reducir el tamaño de la madera, dando lugar a trozos pequeños de forma irregular.
3. Pélets → Los pélets son pequeños cilindros fabricados a partir de astillas de madera y serrín.
4. Briquetas → Las briquetas son cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de 15 a 50 cm de longitud. Tienen una densidad elevada (entre 1.000 y 1.300 kg/m³) y se fabrican por medio de prensas, en las que el material es sometido a altas

presiones y se calienta, produciendo en su interior procesos termoquímicos que generan productos adherentes que favorecen la cohesión del material.

A continuación, se describen los biocombustibles estudiados en el trabajo (astillas y pelets).

1.4.1. Astillas.

Las astillas constituyen un material adecuado para ser empleado en hornos cerámicos, de panadería, viviendas individuales, calefacción centralizada de núcleos rurales o pequeñas industrias. Se obtienen a partir de los restos leñosos de los tratamientos silvícolas, de las operaciones de corte de madera o de las podas de árboles de cultivos leñosos.

Las astillas presentan las siguientes ventajas y desventajas:

- **VENTAJAS**

1. Presentan una menor complejidad en su producción.
2. Para su fabricación se necesita un personal menos especializado que en otros biocombustibles.
3. La maquinaria para la producción de astillas es más económica.
4. Precio de venta más económico que los pelets y combustibles fósiles.

- **DESVANTAJAS**

1. Necesita silos de almacenamiento de mayor tamaño.
2. El precio del porte es más caro por m³ que en el caso de los pelets.
3. El % de cenizas generado en la combustión es mayor.
4. Su utilización en calderas de biomasa para uso doméstico es muy limitado, por las desventajas dichas anteriormente.

1.4.2. Pélets.

Los pélets son un biocombustible sólido densificado de forma cilíndrica y diámetro menor de 2.5 cm [66] y menor que el de la briqueta [68].

El proceso de peletizado consiste en hacer pasar la biomasa, previamente adaptada, a través de una matriz con orificios mediante el empuje de unos rodillos. Se obtiene así el pélet, cuyas dimensiones varían entre 6-12 mm de diámetro y 1-4 cm de longitud en función de la materia prima originaria. Para poder realizar el proceso de peletizado la materia prima debe tener un porcentaje de humedad entre un 8-15 % y un tamaño de partícula aproximado de 0,5 cm.

Se pueden usar para la calefacción y agua caliente de cualquier vivienda, bien se una vivienda unifamiliar, una comunidad de vecinos, una empresa, un hotel, una piscina, una industria o cualquier otro edificio.

Los materiales biomásicos suelen tener alto contenido en humedad y baja densidad, dificultando su manejo, transporte, almacenamiento y uso como biocombustible en su forma original. Un incremento en la densidad aparente puede ser necesaria para facilitar su transporte, manejo y almacén. Otro aspecto negativo de la biomasa como biocombustible sólido es su baja densidad energética comparada con la de los combustibles fósiles. La densificación de estos materiales en forma pélets mejora las propiedades de la biomasa como biocombustible sólido aunque tiene un coste su procesado. Los pélets se hacen de materiales biomásicos mediante calor y presión. La materia prima empleada en la actualidad para la producción de pélets de biomasa es principalmente residuos de madera, incluyendo serrines de las industrias de procesado de madera, recortes de madera y astillas. Los pélets presentan una mayor densidad energética que la biomasa de partida, reducen los costes de transporte y almacenamiento, y son más competitivos frente a los combustibles fósiles. Además, los pélets son más homogéneos en tamaño que la biomasa de la que proceden, lo que facilita la automatización de la alimentación de las calderas. Una alta calidad es fundamental para obtener un proceso de combustión óptimo y evitar la pérdida de eficiencia y problemas en caldera. Esto es particularmente importante en el caso de calderas pequeñas y estufas domésticas, ya que tienen menos controles de regulación del equipo y de las emisiones.

Las calderas más grandes alimentadas con pélets pueden usarlos de menor de calidad, ya que están equipadas con limpieza de gases de salida y con sistemas de control y combustión mejores.

Los pélets presentan una serie de ventajas y desventajas como son:

- VENTAJAS

1. Es un combustible económico, resulta más barato que el gasóleo.
2. Por tener menor tamaño que las briquetas su movimiento puede controlarse de forma electrónica [69]. Los pélets producidos de madera, biomasa herbácea y paja presentan una mayor densidad energética que las astillas o pacas, y además reducen los costes de manejo, transporte y almacenamiento a lo largo de la cadena de suministro [70].
3. No contamina, ya que es biomasa de CO₂ neutro, lo que ayuda a evitar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
4. Es 100 % natural, por tanto no es peligroso ni produce malos olores como el gasóleo.
5. No produce casi humo, por lo que las estufas y calderas de pélets únicamente necesitan una salida de gases, no una chimenea grande como la de las estufas de leña.
6. Es un combustible que no caduca. Si se guarda en un lugar seco puede aguantar todo el tiempo que quiera sin perder sus cualidades.

- DESVENTAJAS

1. Solo se aconseja usarlo en estufas o calderas especiales para pélets.
2. Resultan más caros que la leña, pero tienen más poder calorífico.
3. El pélet tiene que ser de calidad para no dañar la caldera o estufa.
4. Tienen que guardarse en un lugar seco, ya que al contacto con el agua se convierten en serrín, y pierden sus propiedades.

Las principales propiedades químicas que caracterizan energéticamente a la biomasa sólida [67] son el análisis elemental e inmediato y poder calorífico.

Para caracterizar las distintas biomásas sólidas, hay que tener en cuenta la heterogeneidad

de los parámetros estudiados. Es por ello, que algunos autores hablen de un rango de valores y no den un valor único.

- El contenido de humedad puede oscilar entre el 10 % para biomasa seca y el 50 % en cultivos frescos [71]. A menor porcentaje de humedad de la biomasa, mayor eficiencia en la combustión [72].
- Según Telmo *et al.* (2010) [73] los valores de cenizas para maderas sin corteza pueden estar próximos al 0,3 %, pero para biomásas en general, los valores van desde niveles inferiores al 5 % hasta el 20 % [71].
- Para el análisis elemental (C, H, N y S), autores como Telmo *et al.* (2010) [73] indican valores del 47 % al 54 % para el carbono, del 5,6 % al 7 % para el hidrógeno, del 0,1 % al 0,5 % para el nitrógeno y cercanos al 0,1 % para el azufre.

Hoy en día, el uso de biomasa reemplaza cada vez más los combustibles fósiles para la producción de calefacción doméstica. Los pélets de madera se han convertido en un combustible importante en la generación de calor doméstico, ya que los costos de los combustibles fósiles están aumentando y las emisiones son casi neutras en CO₂. A diferencia de otros combustibles a base de madera, la utilización de pélets es fácil y es posible la alimentación automática a estufas y calderas. Además, la granulación densifica la madera y produce un combustible con alta densidad energética [74]. El uso de biomasa de la poda de árboles frutales para obtener pélets de biocombustibles puede ser una alternativa interesante en el sur de Europa, generando valor agregado en las zonas rurales y favoreciendo el desarrollo de la economía circular y la economía verde.

El lavado de biomasa permite la disminución de su impacto ambiental durante su combustión en una estufa de pélets, aunque la especie de madera juega un papel importante [75]. En términos más generales, la combustión de pélets de madera, debido a una mejor combustión completa, es claramente menos emisiva en comparación con la combustión de troncos de madera. La alimentación automática del combustible y la posible presencia de una sonda lambda son tecnologías avanzadas que contribuyen a completar la combustión [76,77].

La mayor parte de los pélets no-industriales comercializados son de calidad A1, mientras que los pellets de calidad A2 son utilizados en calderas de mayor potencia (>50 kW) y los pélets de calidad B en grandes instalaciones de calor y electricidad (CHP) o unidades de calefacción de distritos [78].

Se desarrollan varias técnicas para reducir los contaminantes de la combustión de madera. Deben distinguirse las tecnologías primarias y secundarias: por un lado, las soluciones primarias se centran en la calidad del combustible y la concepción de estufas y calderas, por otro lado, las soluciones secundarias se centran en el postratamiento de los humos [79,80]. Una de las principales soluciones para reducir las emisiones contaminantes de la combustión de biomasa podría ser un pretratamiento de la madera mediante cribado y lavado. De hecho, al lavar la madera, algunos compuestos como minerales o extractos de la madera podrían eliminarse. Schmidt *et al.* (2018) [75] estudiaron maderas crudas y lavadas, los pélets de madera se quemaron para tres tipos diferentes de madera y el estudio se centró en sus emisiones de partículas y gases. Los resultados muestran que, dependiendo de la especie de madera, el lavado de biomasa permite la disminución de su impacto ambiental durante su combustión en una estufa de pélets.

Las mejoras significativas de las características del combustible resultaron de la reducción de elementos críticos y la reducción de cenizas [81,82].

1.5. Técnicas de pretratamiento de biomasa para reducción de cenizas.

Muchos investigadores han estudiado varios tipos de tecnologías para reducir el contenido en cenizas en la biomasa para su utilización en los procesos de conversión. Los métodos utilizados pueden ser clasificados en mecánicos (físicos) y químicos. Las técnicas de pretratamiento mecánico consisten en el fraccionamiento por tamaño y mezclado. Las técnicas de pretratamiento químico incluyen lavado (lixiviación) con agua, ácido o agente quelante.

- Fraccionamiento por tamaño de partícula.

La separación por tamaño de partícula puede ser un método eficiente y adecuado para la reducción del contenido en cenizas, ya que permite el proceso de

separación de los tamaños de partículas más pequeños que contiene la mayor parte de los minerales [83].

El fraccionamiento por tamaño es un proceso que combina molienda y tamizado. La molienda es la reducción del tamaño de partícula por astillado o trituración para hacer el material más fácil de manejar. El tamizado está basado en el tamaño y forma de la partícula de biomasa, y se fundamenta en el hecho de que las diferentes partes de la planta tienden a romperse en diferentes fracciones de tamaño, proporcionando una base para la separación de la biomasa triturada. La separación de cenizas selectivas es posible debido a que las diferentes fracciones anatómicas de las plantas tienen distintos contenidos en cenizas. Similar al fraccionamiento, la clasificación por aire separa las partículas más pequeñas, incluso la misma forma y densidad de las más grandes. Los tamices con pequeñas aberturas pueden conseguir que las partículas más finas adheridas a la biomasa pasen a través de ellas por vibración, mientras que se retienen las partículas orgánicas más grandes [84].

Para la industria de bioproductos y biocombustibles, mezclando biomasa de alta calidad con biomasa de baja calidad es una buena forma de cumplir las especificaciones de calidad requeridas en la biomasa.

El fraccionamiento de cultivos leñosos de corta rotación proporciona beneficios para la conversión bioquímica. Reduciendo las cenizas puede permitir un pretratamiento con ácido diluido más efectivo, porque las cenizas pueden neutralizar el ácido, y reduciendo los extractivos normalmente incrementa la actividad enzimática. Al utilizar la clasificación por aire como una técnica de pretratamiento para eliminar el material perjudicial para la conversión bioquímica, seguida de la pirólisis del residuo bioquímico rico en lignina (y las hojas y corteza separadas por aire) en un proceso de conversión híbrida, el rendimiento combinado de azúcares y aceite pirolítico puede aumentar por encima del 80%, y aumentar significativamente la utilización total de la biomasa [85].

- Lavado con agua.

El lavado o lixiviado con agua es un pretratamiento para reducir el contenido en cenizas de la biomasa para su mejora como biocombustible. La efectividad del proceso de lavado depende de las características de la biomasa, la distribución del tamaño de partícula, y las condiciones del tratamiento, como son el ratio agua a biomasa, la temperatura de lavado y su duración (h) son factores claves.

El lavado con agua puede eficientemente reducir en la biomasa los elementos inorgánicos solubles en agua, por ejemplo K, Na, Ca, Cl, S y Mg. El impacto del lavado es mínimo en el poder calorífico y reduce la tendencia a la formación de escorias [86].

El lavado con agua es un método efectivo para separar los elementos problemáticos en la biomasa, pero no es efectivo para eliminar los metales insolubles en agua. El empleo de ácido diluido para extraer por lavado elementos solubles e insolubles en agua de la biomasa se ha estudiado, siendo utilizados los ácidos clorhídrico (HCl), nítrico (HNO₃), sulfúrico (H₂SO₄) y acético (CH₃COOH). HCl, HNO₃ y H₂SO₄ tienen acidez fuerte pero potencialmente producen indeseables contaminantes de Cl, N y S en la biomasa tratada. El ácido acético tiene una acidez media y solo contiene C, H y O, los cuales no tienen el efecto negativo en el medio ambiente y en la biomasa tratada. Se debe tener en cuenta que el lixiviado ácido después del tratamiento debe ser tratado antes de ser vertido. Agentes quelantes se han utilizado para extraer de la biomasa elementos insolubles en agua, sin degradar la hemicelulosa, la celulosa ni la lignina. Entre estos agentes quelantes está el ácido etilendiaminotetraacético (EDTD), el ácido nitrilotriacético (NTA), el ácido etilen diamino propanodioico (EDDM) y el ácido pirolítico.

Las calderas de biomasa tienen tendencia a sufrir problemas graves de formación de escorias debido al alto contenido de potasio en el combustible. El potasio problemático, sin embargo, puede ser separado eficientemente mediante un pretratamiento de lavado con agua. Después del lavado, la temperatura de fusión de las cenizas del material depositado se incrementa notablemente [87].

El lavado con agua a temperatura ambiente reduce el contenido en cenizas del biocombustible, y por tanto reduce la tendencia a la formación de escorias en las calderas y hornos [86].

Basándonos en el contenido total de cenizas y los elementos de las mismas, se pueden separar fracciones anatómicas y de tamaño específicas para optimizar las materias primas que se envían a los procesos de conversión de biocombustibles y minimizar la necesidad de tratamientos de reducción de cenizas más costosos [88].

1.6. Especies estudiadas.

Las especies utilizadas en la presente tesis se describen a continuación:

1.6.1 Cardo (*Cynara cardunculus* L.).

El cardo (*Cynara cardunculus* L.) es una especie herbácea diploide perenne, perteneciente a la familia de las Asteráceas (Compuestas). Esta especie comprende tres taxones [89]: *C. Cardunculus* L. Ssp. *Scolymus* (L) Helgi (Alcochofa), *C. cardunculus* L. Var. *altilis* DC (cardo cultivado) y *C. cardunculus* L. Var. *Sylvestris* Lam. (Cardo salvaje o silvestre). Tanto la alcachofa como el cardo cultivado son el resultado de la domesticación del cardo silvestre en el área mediterránea, encontrándose el origen probablemente en Italia o el norte de África [90].

El cardo *Cynara cardunculus* L. es una planta herbácea perenne que posee un sistema radicular que se desarrolla en profundidad, mediante una o varias raíces pivotantes muy engrosadas que le permiten obtener agua y nutrientes de zonas profundas. De las raíces principales se originan raicillas secundarias, con un hábito de crecimiento más horizontal, de forma que permiten la exploración de un mayor volumen de suelo y en los años siguientes de la periferia de la base de la raíz salen las yemas de recambio que dan lugar a nuevas plantas, por lo que no se siembra anualmente y se cultive como especie plurianual.

Las hojas son grandes, tomentosas y tienen una nerviación principal muy marcada, son de color verde en el haz y blanquecinas en el envés, a esta característica se le debe su nombre científico (*cynara* = ceniza). En los bordes presentan espinas que a veces pueden

extenderse a los pecíolos. El pecíolo o “penca” es grande y acanalado, prolongándose en la nerviación principal.

Los frutos, comúnmente denominados semillas, son aquenios alargados y grisáceos, son brillantes y con manchas marrones con una dimensión de 6-8 mm. Tienen una capacidad germinativa media entre 5 y 7 años. Un gramo contiene entre 25 y 30 semillas. Las proporciones en base seca, en su valor medio son de un 20 % para las hojas basales, un 13% para las hojas del tallo, un 34% para los tallos principales y secundarios y un 33% para los capítulos (10% aquenios, 7% pelos y vilanos y 16% involucreo y receptáculo) [91].

El ciclo natural del cardo (figura 6) puede prolongarse, en las condiciones más favorables, un periodo que varía entre 6 y 15 años, desarrollándose a lo largo del tiempo como a continuación se describe:

- Primer año: En el otoño cuando las condiciones de humedad y temperatura son favorables, se realiza la siembra, posteriormente se forma una roseta basal de hojas que va desarrollándose durante el resto del otoño, el invierno y la primavera. Durante ese tiempo la raíz acumula los azúcares que van produciendo las hojas. A mediados o finales de la primavera, del centro de la planta emerge un tallo de aproximadamente un metro de altura, con uno o varios capítulos, que se seca al final del verano, permaneciendo vivas las raíces y las yemas remanentes de la base del tallo.
- Segundo año: Al final del verano, principios de otoño, varias de las yemas de recambio brotan con fuerza a expensas de los azúcares formados en la raíz, que sigue engrosando. A partir de este año los tallos medirán entre 1,5 y 2,5 m y la raíz unos 7 m.
- Tercer año: Al final de la primavera se forma un nuevo tallo floral que se desarrolla rápidamente a expensas de las reservas acumuladas en la raíz. La parte aérea puede llegar a alcanzar los 3 m en un ciclo anual de producción de biomasa. En el verano, tras la madurez de los frutos, la planta empieza a desecarse hasta quedar completamente seca la parte aérea, si bien la raíz y las yemas remanentes en la base del tallo permanecen vivas.
- Años subsiguientes: El ciclo se vuelve a iniciar en el otoño siguiente, repitiéndose durante toda la vida de la planta [92].



Figura 6. Plantación de cardos.

Para el aprovechamiento de esta especie para fines energéticos, se utiliza toda la biomasa producida anualmente al final de su ciclo vegetativo, una vez que se ha secado la parte aérea (agosto o septiembre). En años con una pluviometría adecuada (alrededor de 500 mm), cuando el cultivo está bien establecido, puede llegar a dar producciones totales de biomasa, en condiciones de secano, de 10 a 25 toneladas de materia seca por ha y año [91].

1.6.2 Paulownia (*Paulownia tomentosa*).

Las plantaciones de especies forestales para producción de madera y biomasa son una fuente de servicios ecosistémicos (SSEE en adelante) adicional a los suministrados por los bosques protectores. En este sentido, resulta interesante que la caracterización selvícola de las especies forestales empleadas en plantaciones incluya aspectos relacionados con la provisión de dichos SSEE. Entre los SSEE suministrados por las plantaciones se incluye, además del servicio de provisión de madera y biomasa, el servicio de descontaminación del aire, de vital importancia en el contexto de cambio climático actual. Por ejemplo, en la década de los años 80 del pasado siglo, se comparó el nivel de dióxido de azufre en dos ciudades chinas. En una de ellas se cultivaba la Paulownia de manera extensiva y en la otra no. Cuando se compararon los porcentajes de dióxido de

sulfuro respecto al total de contaminantes en el aire, se obtuvieron los valores de 0.17% y 1.41% respectivamente [93], quedando demostrado el poder descontaminante de la Paulownia.

La paulownia (figura 7) es un árbol originario de China que fue introducido en Europa para uso ornamental, pero que a lo largo de los años y debido a sus características se le fueron dando otros usos. Su uso forestal se basa en su rápido crecimiento y en su elevada producción de madera en pocos años. Además se adapta a amplios márgenes climáticos y edafológicos, siempre que el suelo no sea muy arcilloso y el nivel freático esté como mínimo a 2 m de profundidad, pues sus raíces son verticales y profundas y sensibles a la asfixia radicular. Ese sistema radicular permite a la paulownia buscar la humedad necesaria en climas semiáridos, siempre que los dos primeros años haya tenido riego.

Se adapta a gran variedad de climas, pues el rango de temperaturas al que puede adecuarse varía ampliamente, llegando a soportar mínimas absolutas de -20 °C y máximas absolutas de 45 °C [93]. Diferentes experiencias demuestran que el rango óptimo de temperaturas para el crecimiento en altura y diámetro se localiza entre 24 °C y 29 °C de temperatura media diaria [93].

Otro de los usos de la paulownia es la generación de biomasa para centrales térmicas. En este caso, se tala cada 2 ó 3 años y se selecciona el brote con mayor vigor.

Una de las propiedades de la paulownia para biomasa es su facilidad de secado al aire libre (20-40 días), por lo que no habrá que utilizar sistemas de secado artificiales que encarecerían el precio de venta de la astilla [94].

La facilidad de descortezado de los troncos se suma a las ya numerosas ventajas. En Oriente se viene empleando desde la antigüedad, pero es ahora cuando las características de esta madera están favoreciendo su entrada en los mercados internacionales. Desde hace unos años se cultiva comercialmente en EE.UU., donde se ha beneficiado de considerables mejoras de selección genética.



Figuras 7. Plantación (izquierda) y rebrote en paulownias (derecha).

En España existen distintos grupos de investigación trabajando en la caracterización de la Paulownia a distintos niveles. Existen publicaciones con resultados de parcelas experimentales de Paulownia para diferentes fines (madera o biomasa) en Cáceres, Badajoz, Valencia, Madrid, Toledo, Valladolid y todas las provincias de Galicia.

El centro de Investigaciones Agrarias finca “La Orden” de CICYTEX dispone de una plantación del clon COT1 de Paulownia con un marco de 3 x 2 m, con una superficie total de 800 m².

Los clones empleados en la parcela experimental se han obtenido a partir de la hibridación de las especies *P. elongata* y *P. fortunei*. La primera diferencia entre ambas especies radica en los requisitos agroclimáticos de las mismas, siendo la *P. elongata* una especie más resistente en lo relativo a la precipitación, tanto en los milímetros de precipitación como en el número de meses de sequía. En lo relativo al crecimiento del tronco, el volumen de madera del tronco en *P. fortunei* es entre el 18 - 36% mayor que el de *P. elongata*, a igualdad de diámetro a la altura del pecho.

A continuación, en la tabla 2 se pueden observar los resultados obtenidos en el ensayo realizado en el Instituto de Investigación Agraria Finca La Orden (CICYTEX).

Tabla 2. Producciones de biomasa seca en Finca La Orden (CICYTEX).

Edad de la plantación	Peso Fresco kg/ha	Materia Seca %	Materia Seca kg/ha
RAIZ 1 AÑOS - TALLO 1	3.935	35,59	1.401
RAIZ 2 AÑOS - TALLO 1	25.582	33,78	8.642
RAIZ 2 AÑOS - TALLO 2	30.754	33,78	10.389
RAIZ 3 AÑOS - TALLO 1	17.995	53,60	9.645
RAIZ 3 AÑOS - TALLO 2	54.196	53,60	29.049
RAIZ 3 AÑOS - TALLO 3	62.293	53,60	33.389

En cuanto a la caracterización de la biomasa de paulownia, Kasamaki (2007) [94] obtuvo los siguientes valores:

- Ceniza → 1,1- 1,5 %.
- PCI → 4.430 (kcal/kg).
- Carbono → 49,5 %.
- Hidrógeno → 6,4 %.
- Nitrógeno → 0,24 %.
- Azufre → 0,02 %.

Otros autores, como Latorre y Ruano (2009) [95], en su caracterización de la biomasa de paulownia, citaron los valores obtenidos por Kasamaki para la composición química, y en cuanto al PCS, los valores obtenidos estaban comprendidos entre los 4.200 - 4.400 kcal/kg en función del tipo de clon analizado y el porcentaje de cenizas se situaba alrededor del 2 %. Por otro lado, la analítica del Instituto de Investigación en Energías Renovables “IER” (2012) [96] presentó los siguientes valores:

- Ceniza → 1,29 %.
- PCS → 4.600 (kcal/kg).
- PCI → 4.400 (kcal/kg).
- Carbono → 50,8 %.
- Hidrógeno → 5,6 %.
- Nitrógeno → 0,26 %.
- Azufre → 0,001 %.

1.6.3 Ciruelo (*Prunus domestica* L.).

Pertenece a la Familia de las Rosáceas (Rosaceae), género: *Prunus*, especie: Ciruelo europeo (*Prunus domestica* L.) y Ciruelo japonés (*Prunus salicina* L.). Su Origen es de

Siria, Persia y el Cáucaso, se sitúa en distintas zonas geográficas: el ciruelo europeo en Turquestán y el ciruelo japonés en China.

El árbol es de tamaño mediano que alcanza una altura máxima de 5-6 m. Tronco de corteza pardo-azulada, brillante, lisa o agrietada longitudinalmente. Produce ramas alternas, pequeñas, delgadas, unas veces lisas, glabras y otras pubescentes y vellosas. Sus hojas son caducifolias, oblongas, aserradas, de color verde, lisas por el haz y pubescentes por el envés.

Presenta flores que aparecen en pequeños ramos cortos de un año de edad. Son blancas, solitarias, pentámeras, alternas, la disposición de la inflorescencia en umbela con elevado número de estambres. La mayoría de los cultivares son autoestériles por lo que necesitan polinización cruzada. El fruto es una drupa carnosa redonda, oblonga o achatada con la línea de unión más o menos aparente, recubierta por una cera blanquecina (pruina), de color amarillo, rojo o violáceo, con pedúnculo mediano.

El aprovechamiento de los residuos procedentes de las podas de frutales quizás sea lo menos utilizados actualmente. Por regla general, el agricultor una vez realizada la poda, la apilaba en un montón y la quemaba en la propia parcela. Actualmente, dicha práctica agrícola está prohibida y se le buscan nuevas aplicaciones a esos restos biomásicos. Una de ellas es el aprovechamiento como biocombustible sólido ya sea en forma de astilla o de pélets. La superficie plantada de ciruelo en Extremadura va sufriendo variaciones a lo largo de los años en función de cómo se mueva el mercado. Actualmente, la superficie de ciruelo plantada en Extremadura es de 10.227 ha [97], de las cuales podríamos obtener entre 1-1,5 t/ha año de residuos. Los residuos de ciruelo se pueden encontrar en prácticamente todas las zonas de regadío de Extremadura (figura 8).

Bilandzija *et al.* (2012) [98] caracterizaron la madera de poda del ciruelo obteniendo los siguientes valores:

- Ceniza → $3,89 \pm 0,55$ %.
- PCI → 4.086 ± 600 (kcal/kg).
- Carbono → $48,15 \pm 7,24$ %.
- Hidrógeno → $6,52 \pm 0,87$ %.
- Nitrógeno → $0,81 \pm 0,10$ %.

- Azufre $\rightarrow 0,18 \pm 0,01 \%$.

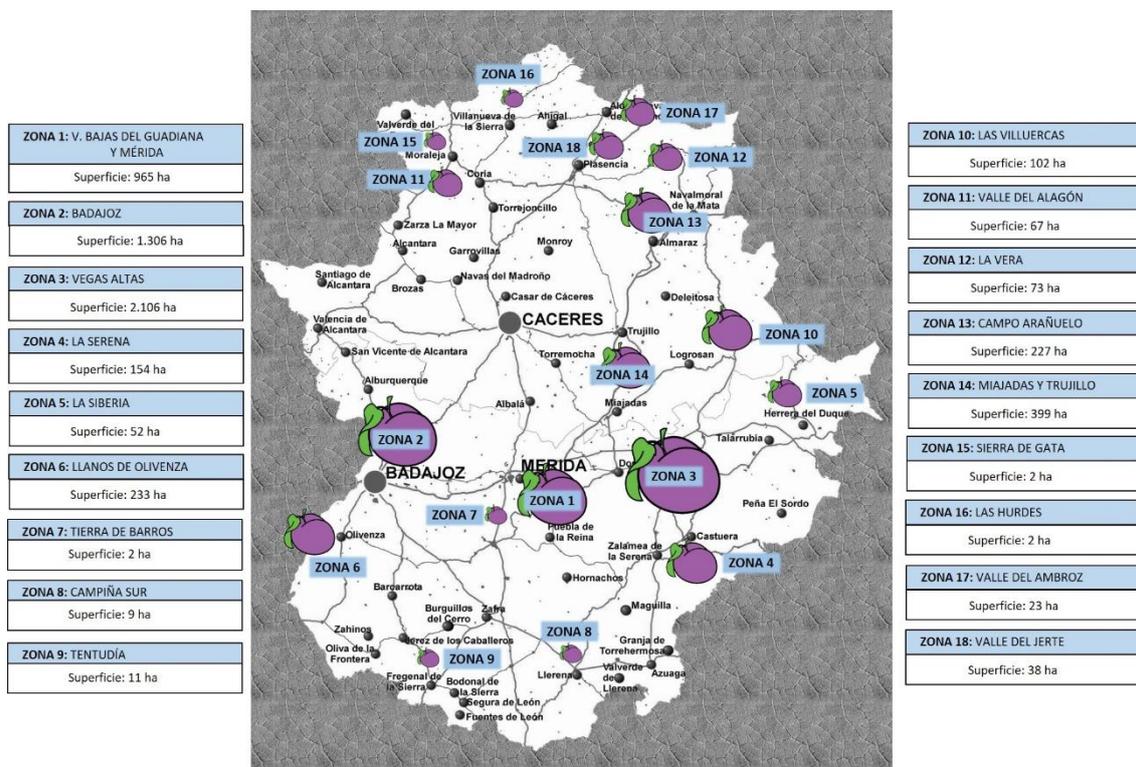


Figura 8. Mapa de residuos agrícolas de ciruelo susceptibles de procesamiento año 2016.

1.6.4 Olivo (*Olea europea* L. var. *europaea*).

Olea europea, pertenece a la familia Oleacea, es una especie leñosa de tamaño medio, su fruto es la aceituna de donde obtendremos el aceite. Actualmente, el árbol del olivo aparece como árbol cultivado en prácticamente todas las regiones de clima mediterráneo con exposición soleada y libre de heladas. Esta distribución comprende tanto zonas de países europeos, como por ejemplo España, Grecia o Italia, como otros países no europeos de clima parecido como Australia, Chile o Perú. Su rendimiento en España en el 2019 fue de 4.645 kg/ha en regadío y 1.801 kg/ha en secano. En el año 2019 la superficie total plantada de olivar en España era de 2.515.800 ha según las últimas estadísticas del Ministerio de Agricultura y Alimentación [99].

La mayoría de los olivares del mundo se cultivan en condiciones extensivas de secano con densidades de hasta 150 olivos/ha y escasa mecanización. Pero en los últimos años, la producción de aceitunas se ha incrementado como consecuencia de nuevas variedades

más productivas, cambios en los marcos de plantación (intensificación) y nuevas zonas de cultivo. Respecto a la producción global, la media anual de la producción a nivel mundial es cercana a los 16 millones de toneladas de aceitunas de las cuales el 90% es destinada a la obtención de aceite y el 10% se consumen elaboradas como aceitunas de mesa. Los principales países productores son España (4,6 millones de toneladas), Grecia (2,3 millones de toneladas) e Italia (2,0 millones toneladas), que aportan el 93% de la cosecha europea [100].

El porcentaje de superficie de la UE dedicado al olivar en 2014 era de 48% respecto a la superficie mundial, lo que corresponde a casi cinco millones de hectáreas. España, con un 50,3% de la superficie, Italia, Grecia y Portugal fueron los cuatros principales países productores. En España, la comunidad autónoma con más superficie de olivar es Andalucía, seguida de Castilla La Mancha y en tercer lugar Extremadura [101].

Extremadura tiene una superficie dedicada a este cultivo de 287.754 hectáreas el 6.6% de la superficie geográfica total, con un 70% en la provincia de Badajoz y un 30% en la provincia cacereña [102]. La densidad media de plantaciones extremeñas es de 107,4 olivos/ha [103].

Los restos de poda de un olivo (figura 9) son recogidos de forma anual para olivos en formación y bianual para árboles adultos, además de aprovechar el árbol completo cuando se produce el arranque de la plantación por envejecimiento de la misma. Según la Agencia Extremeña de la Energía, los restos de poda de olivar se han quemado en la misma finca una vez realizada la actuación, lo cual supone un problema medioambiental y derroche energético, ya que no sólo no estamos aprovechando estos residuos, sino que tampoco estamos devolviendo al terreno los nutrientes extraídos por el cultivo. Para el olivar se consideran unos índices de residuo de 1.400 a 1.700 kg/ha, para olivares con rendimientos productivos 3.000 kg/ ha.



Figura 9. Residuos de poda de olivar en Cicytex.

Los restos de poda de un olivo (figura 9) son recogidos de forma anual para olivos en formación y bianual para árboles adultos, además de aprovechar el árbol completo cuando se produce el arranque de la plantación por envejecimiento de la misma. Según la Agencia Extremeña de la Energía, los restos de poda de olivar se han quemado en la misma finca una vez realizada la actuación, lo cual supone un problema medioambiental y derroche energético, ya que no sólo no estamos aprovechando estos residuos, sino que tampoco estamos devolviendo al terreno los nutrientes extraídos por el cultivo. Para el olivar se consideran unos índices de residuo de 1.400 a 1.700 kg/ha, para olivares con rendimientos productivos 3.000 kg/ ha.

El manejo tradicional de los restos de poda ha sido la quema, lo cual es totalmente rechazable bajo el punto de vista energético. Posteriormente, se comenzó a practicar la incorporación al suelo de estos restos una vez triturados y astillados por la correspondiente maquinaria trituradora. Sin embargo, la situación más eficiente consiste en utilizar los restos de poda para la producción de electricidad o como uso térmico en calderas. Los restos de la poda del olivar sitúan sus valores de poder calorífico en el entorno de las 4.800 kcal/kg. Dado que la humedad en el momento de la corta es muy elevada, se toman valores del poder calorífico inferior considerando que la biomasa se seca al aire, bajando su base humedad (base húmeda) al entorno del 25% y obteniendo valores sobre las 3.100 kcal/kg. El valor del poder calorífico inferior (PCI) calculado para las hojas es 4.500 kcal/kg, mientras que para los ramones y las leñas 4.300 kcal/kg [29].

1.7 Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos.

El proceso de implantación de una planta de peletizado requiere del control de muchos factores que se deben tener en cuenta a la hora de establecerse. Se deben prever las consecuencias que puede tener este hecho sobre todos los ámbitos de la zona, tanto sociopolítico como económico. La situación ideal de una planta de producción es estar lo más cerca posible de la materia prima, procedente de la madera de olivo y paulownia en este caso, para ahorrar costes de transporte y con unas comunicaciones ideales. También hay que tener en cuenta los accesos a la planta ya que se necesitará de maquinaria pesada y entrada continua de camiones. Para la localización de la planta, es necesario tener en cuenta el entorno en la que es más apropiada su localización, es decir, si es más interesante situarla en una zona rural o en un polígono industrial. La gran ventaja de los polígonos industriales es que cuentan con la mayor parte de las infraestructuras necesarias ya construidas, además de la cercanía a los núcleos urbanos y a las principales vías de comunicación aunque es también la razón de que el coste del suelo sea mayor que en una zona rural. Existe siempre un interés político-social a la hora de implantar una industria en una zona determinada. La impulsión de estas iniciativas puede generar una reactivación social en cuanto a desarrollo tecnológico, auge económico y creación de empleo para la población de la zona. Se generará una nueva actividad económica al impulsar la implantación de calderas de pélets en el sector industrial. Sin duda alguna, la promoción de proyectos innovadores en zonas rurales mejora notablemente la calidad de vida y contribuye a la fijación de población.

Para el estudio del potencial agrícola de la zona susceptible de ser utilizado por la planta, es muy interesante considerar el radio de acción en torno a la planta de peletizado para la recogida de la biomasa. Este radio de acción será fijado según la capacidad de producción de la planta y necesidades de biomasa a utilizar, si bien es verdad que un radio de acción en torno a 30 o 40 km podría ser suficiente.

Las materias primas principales a utilizar se estiman que serán restos de poda del olivo y biomasa de paulownia, pero en el proceso de fabricación del pélet se permite el mezclado con otras biomásas, por lo que la utilización de una materia prima u otra es flexible.

Para la viabilidad del uso de pélets como combustible, es muy importante llevar a cabo una explotación responsable de los recursos, puesto que no se trata de realizar una explotación masiva, sino de realizar un aprovechamiento de una biomasa residual que, de otro modo, no tendría aplicación y además podría ocasionar problemas medioambientales y de acumulación de residuos.

2. OBJETIVOS.

En este trabajo se persigue como **objetivo principal** el estudio y caracterización de biomásas alternativas residuales (ciruelo y olivo) y de cultivos energéticos (cardo y paulownia) que puedan sustituir a los residuos leñosos comúnmente utilizados como biocombustibles (astillas y pélets). El empleo de estas biomásas alternativas para producir biocombustibles requieren que cumplan las especificaciones técnicas de las normas de calidad.

Para poder cumplir con este propósito mencionado es necesario abordar los siguientes objetivos específicos:

- a. Realizar un estudio previo de las biomásas a utilizar para su aplicación como biocombustible sólido (astillas y pélets).
- b. Estudio de la recogida, acondicionamiento y transporte de la biomasa desde el campo al centro de trabajo para que se haga de la forma más eficiente posible.
- c. Realizar pretratamientos y mezclas de biomásas que permitan reducir el contenido de cenizas y conseguir el objetivo de máxima calidad del producto final.
- d. Analizar el proceso de peletizado de la biomasa recogida en planta piloto.
- e. Caracterizar los parámetros de calidad de los biocombustibles obtenidos según la normativa europea existentes, diferenciando biomasa con y sin corteza.
- f. Analizar el comportamiento en calderas reales de los diferentes biocombustibles obtenidos, a nivel de combustión, emisión de gases y rendimiento.
- g. Obtención de un biocombustible sólido de la máxima calidad a partir de los resultados obtenidos en los estudios realizados. Se tendrá en cuenta la disponibilidad de los restos agrícolas existentes en Extremadura y los costes de todo el proceso de producción.

3. METODOLOGÍA EMPLEADA.

3.1. Localización del ensayo.

Las pruebas para determinar la calidad de la biomasa, así como los análisis de los gases de combustión de la caldera se realizaron en el Instituto de Investigaciones Agrarias Finca “La Orden – Valdesequera” perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX) de la Junta de Extremadura.

Este Instituto tiene dos fincas dedicadas a la investigación agraria: "La Orden" y "Valdesequera". La finca La Orden está situada en las Vegas Bajas del Guadiana en el término municipal de Lobón, con una altitud de 180 msnm, a 38°51'10" de latitud norte y 6°39'10" de longitud oeste (figura 10). Tiene una superficie de 95 ha de regadío y 110 ha de secano y es donde se desarrollan la mayoría de los ensayos de hortofruticultura, cultivos extensivos, producción forestal y pastos. En la finca se encuentra el edificio central de CICYTEX donde se ubica dirección y administración, junto con diferentes laboratorios y la biblioteca. Además, en esta finca se encuentra el laboratorio del Equipo de Biocombustibles del Departamento de Cultivos Extensivos, donde se han analizado los materiales con los que se ha llevado a cabo este trabajo. La finca “Valdesequera” dispone de una superficie de 718 ha de dehesa y en ella se vienen realizando proyectos de cultivos extensivos, producción forestal y pastos, y producción animal.



Figura 10. Imagen satélite con la localización de los terrenos del Instituto de Investigaciones Agrarias Finca “La Orden-Valdesequera”.

3.2. Material vegetal empleado en el estudio.

Para determinar las características y calidad de la biomasa empleada en la caldera se utilizaron cuatro especies (tabla 3), de las cuales, dos pertenecían a especies frutales (residuos de poda) y las otras dos a cultivos energéticos, cynara como cultivo herbáceo perenne y paulownia como cultivo leñoso en corta rotación.

Tabla 3. Tipos de biomásas sólidas utilizadas en el ensayo.

Frutales (residuos de poda)	Cultivo energético	Cultivo herbáceo
Ciruelo (<i>Prunus domestica</i> L.)	<i>Paulownia tomentosa</i>	Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L.)
Olivo (<i>Olea europaea</i> L. var. <i>europaea</i>)		

3.3. Proceso de transformación de la biomasa sólida.

Las materias primas utilizadas para su posterior transformación en biocombustibles sólidos procedían de los ensayos de campo existentes en el Instituto de Investigaciones Agrarias Finca “La Orden – Valdesequera” y de explotaciones cercanas al centro.

La biomasa sólida, para poder ser utilizada como biocombustible sólido, debe sufrir una transformación que va a permitir acondicionarla de una forma correcta y práctica para su utilización final, ya sea para uso industrial o doméstico.

Las fases principales de transformación de la biomasa son:

1. Obtención de la biomasa procedente de cultivos herbáceos y restos de poda.
2. Acondicionamiento de la biomasa en campo.

Esta fase de transformación de la biomasa consiste en triturar o astillar la materia prima en campo para facilitar su transporte y reducir costes, ya que estamos reduciendo su tamaño y aumentando el peso de biomasa transportada por viaje a la planta de peletizado. Se ha utilizado una astilladora de carga manual accionada por un tractor (figura 11) y con el material obtenido se ha separado una parte para su evaluación en forma de astilla y el resto ha seguido el proceso de peletizado.



Figura 11. Astilladora forestal.

3. Transporte de la biomasa a la planta piloto de peletizado. En esta fase del proceso de transformación es muy importante tener marcado el radio de acción de recogida de la biomasa, ya que de esto va a depender en gran medida la rentabilidad del proceso. El radio de acción lo marcará la empresa y se hará en función de su capacidad económica. Para una empresa como Acciona Energía S.A., su radio medio de recogida de biomasa para la planta de electricidad de Sangüesa (Navarra) es de 100 km [104].
4. Almacenamiento de la biomasa en la planta de peletizado.
5. Preparación previa al peletizado de la biomasa.

Algunos procesos de transformación de la biomasa necesitan utilizar partículas de tamaño inferior al de una astilla lo que, a su vez, requiere un proceso de molienda para conseguir un tamaño de la biomasa inicial inferior a 2-3 cm, que constituye el producto final de este proceso.

Los equipos más empleados para realizar esta operación son molinos de martillo y de tambor en grandes plantas. También se utilizan molinos de cuchillas para biomásas más húmedas.

6. Peletizado.

La peletización es un proceso de compactación de material lignocelulósico de determinadas condiciones (granulometría y humedad menor del 15 %) para

obtener cilindros de un diámetro entre 6 y 12 mm. La longitud del pelet es variable de 1 a 4 cm (figura 12).



Figura 12. Pélets de poda de olivo.

En el proceso de peletizado se utilizan peletizadoras que pueden variar en función de las necesidades de producción y de las características del material que se pretende obtener. En este trabajo se ha utilizado una peletizadora “SINTE 1000” cuya producción es de 100 kg/h (figura 13).



Figura 13. Peletizadora SINTE 1000.
Planta de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.

3.4. Caracterización energética de la biomasa.

Para conocer las cualidades como biocombustible que pueden presentar los cultivos energéticos y los residuos que se están estudiando en esta tesis, es necesario determinar aquellos parámetros que las definen.

Un buen biocombustible es aquella sustancia que presenta las siguientes características:

- Elevado poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).
- Bajo porcentaje de humedad.
- Bajo contenido en cenizas.
- Elevado porcentaje de carbono fijo.
- Mínima presencia de azufre en su composición elemental.

La determinación del PCS y el análisis inmediato para conocer los contenidos en cenizas y humedad, están basados en la normativa europea (UNE ISO TS) que especifica el protocolo a seguir para la obtención de los resultados.

3.4.1. Poder calorífico superior (PCS).

Para determinar el poder calorífico de la biomasa a analizar se utilizó el calorímetro modelo 6100 Parr (figura 14). Es un equipo que va conectado a una bomba de oxígeno y puede realizar hasta seis pruebas por hora. Está dotado de una pantalla táctil donde se refleja el resultado del poder calorífico superior (PCS) expresado en kcal kg^{-1} . El análisis se realizó bajo la normativa UNE-EN ISO 18125 [105].



Figura 14. Bomba calorimétrica 6100 PARR. Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.

3.4.2. Poder calorífico inferior (PCI).

El PCI es el calor que se puede obtener realmente del biocombustible y que resulta de restar al PCS la energía que se emplea en la evaporación del agua que se genera en la combustión (como consecuencia del contenido en hidrógeno del biocombustible) y la necesaria para evaporar el agua que contiene el biocombustible en el caso de que éste tenga una cierta humedad.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 212,2 (\% \text{ H}) - 0,8 (\% \text{ O}_2 + \% \text{ N})$$

$$\% \text{ O}_2 = 100 - (\% \text{ C} + \% \text{ N} + \% \text{ H} + \% \text{ S} + \% \text{ Cenizas})$$

3.4.3. Durabilidad.

El equipo de durabilidad, nos permite determinar la durabilidad de los pélets siguiendo la norma UNE-ES ISO 17831 [106]. Se toma una porción de ensayo de (500±10) g. Se coloca la muestra de ensayo de los pélets tamizados, pesada en una aproximación de 0,1 g en el dispositivo de caja rotatoria. Se centrifuga la muestra a (50±2) r/min durante 500 vueltas. Después de ese número de vueltas, la muestra se saca y se pasa manualmente por un tamiz. El cribado se tiene que realizar completamente. Se debe pesar la muestra que queda en el tamiz.

La durabilidad mecánica de los pélets se debe calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{DU} = m_A/m_E \times 100$$

- DU es la durabilidad mecánica, en %.
- M_E es la masa de los pélets pre-cribados antes del tratamiento de centrifugado, en gramos.
- M_A es la masa de los pélets pre-cribados después del tratamiento de centrifugado, en gramos.

El resultado se debe calcular con dos decimales y el resultado medio se debe redondear al 0,1 %.

La durabilidad es uno de los principales factores que afectan su calidad, debido a que son críticos en el manejo y almacenamiento. Los pélets deben ser durables para soportar el

transporte sin que se degraden. Para que los pélets sean considerados de calidad máxima este parámetro debe ser igual o superior a un 97.5%.

3.4.4. Temperatura de fusibilidad de cenizas.

El procedimiento operatorio es el correspondiente a la norma ASTM D 1857 “Standard Test Method for fusibility of Coal and Coke Ash” [107]. Las cenizas han sido obtenidas mediante calcinación a 815°C. La atmósfera utilizada en el ensayo ha sido oxidante que se realiza pasando un flujo de aire. Se ha utilizado un equipo automático LECO AF-700. La probeta de ensayo es una pirámide de aristas vivas, cuya base es un triángulo equilátero y su altura alrededor de 19 mm, tres veces la longitud del lado de la base. Se coloca la probeta sobre un soporte cerámico al que se fija la misma con ayuda de un adhesivo adecuado, ambos se sitúan en el interior del horno sobre un pedestal rotatorio. La temperatura máxima de trabajo de dicho horno es de 1500°C, empleándose una velocidad de calentamiento controlada de 8 °C min⁻¹.

Durante todo el proceso de calentamiento, las dimensiones de la probeta son registradas de forma automática por el equipo mediante una cámara de vídeo y la correspondiente tarjeta de análisis de la señal, registrándose de forma automática los siguientes cambios característicos:

- Temperatura de formación inicial.
- Temperatura a la cual se produce redondeamiento del vértice de la pirámide.
- Temperatura de reblandecimiento: Temperatura a la cual la pirámide ha fundido hasta adquirir una forma casi semiesférica cuya altura es igual al diámetro de la base.
- Temperatura de hemisferio: Temperatura a la cual la pirámide ha fundido hasta adquirir una forma semiesférica en la que la altura es igual al radio.
- Temperatura de fluidez: Temperatura a la cual la pirámide ha fundido por completo extendiéndose en una capa casi plana con una altura máxima de 1.6 mm.

3.4.5. Análisis inmediato.

Con la realización del análisis inmediato de los residuos se van a obtener los valores medios de los contenidos en cenizas y humedad. Estos valores, junto con el PCS, PCI y la composición elemental permitirán establecer la calidad que presentan los residuos para su posible utilización como biocombustibles.

3.4.5.1. Determinación del contenido en humedad.

La humedad es uno de los parámetros fundamentales en la caracterización energética de un biocombustible. Igual que ocurre con el contenido en cenizas, el porcentaje de humedad está en relación inversa a la calidad que un residuo presenta como biocombustible.

De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que la humedad disminuye el potencial energético del biocombustible considerado, ya que parte del mismo se empleará en evaporar el agua que contiene. Por tanto, cenizas y humedad son dos parámetros que restan calidad y dificultan la combustión.

Se define la humedad como el tanto por ciento de agua que contiene un combustible. Esta humedad puede ser “libre o añadida”, es decir, el agua unida superficialmente al producto como consecuencia del lavado o por su exposición a los agentes atmosféricos, o bien, “inherente”, es la que permanece en el combustible después de estar expuesto a un ambiente seco. La primera se elimina, simplemente, exponiendo el producto al aire y la segunda se puede eliminar sometiendo al combustible a una temperatura de 105 °C en una estufa hasta peso constante.

Una vez la muestra ha sido recibida y recepcionada, se somete a secado en estufa a 105 °C para evaluar su contenido en humedad por gravimetría. Norma UNE-EN ISO 18134 [110].

3.4.5.2. Determinación del contenido en cenizas.

Las cenizas son el residuo sólido que queda una vez producida la incineración al aire de los biocombustibles. Cuanto mayor sea el contenido en cenizas menor será la calidad de un biocombustible, ya que éstas sustituyen al carbono fijo, es decir, lo desplazan en lo

que a su composición se refiere. Por otra parte, las cenizas perjudican la combustión formando escorias que, además de ser corrosivas, resultan en muchas ocasiones difíciles de extraer del hogar.

Estas escorias, sobre todo si tienen bajo punto de fusión, dificultan la entrada de aire primario al hogar y, en consecuencia, disminuyen la eficiencia de la combustión, pudiendo llegarse a la extinción de la misma.

El equipo utilizado para la determinación del contenido de cenizas de los diferentes restos de poda es el analizador termogravimétrico TGA 701 de la marca Leco (figura 15). El contenido de cenizas se determina mediante cálculos termogravimétricos. El equipo consta de un carrusel que va girando de forma continua sobre un eje insertado en el interior del horno, donde se pueden analizar al mismo tiempo hasta diecinueve muestras colocadas cada una de ellas en diferentes crisoles en una cantidad de un gramo aproximadamente. El horno alcanza temperaturas hasta de 550 °C para este método en concreto y va realizando pesadas de forma continua y repetitiva, hasta conseguir valores constantes. En este análisis se determina la velocidad de pérdida de peso de una muestra en función de la temperatura y el peso [108]. La norma que rige este análisis es la UNE-EN ISO 18122 [109].



Figura 15. Analizador TGA 701 Leco.

Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.

3.4.6. Análisis elemental.

La muestra totalmente seca y triturada es caracterizada cualitativa y cuantitativamente en sus elementos químicos elementales (C, H, N y S) mediante un analizador elemental TrueSpec Leco (figura 16), según se rige en la norma UNE-EN 16948 [111].

El contenido de azufre y cloro se determina mediante dos métodos diferentes establecidos en la normativa UNE- EN ISO 16994 [112], es importante ya que la presencia de valores elevados en la muestra de estos dos elementos supone daños en la zona de la caldera en la cual tenga lugar la combustión.

El contenido en cloro se obtiene mediante análisis volumétrico con nitrato de plata a partir de las cenizas procedentes de la combustión de la muestra en la determinación de poder calorífico, de acuerdo con la normativa pertinente. Las cenizas resultantes de la muestra originaria son mezcladas con agua para llevar a cabo la valoración volumétrica en medio ácido.

La determinación del contenido en azufre se obtiene mediante incineración de la muestra a 1.350 °C en un horno acoplado al analizador elemental TrueSpec Leco citado con anterioridad.



Figura 16. Analizador elemental TrueSpec CHNS Leco 4084.

Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.

3.4.7. Determinación de elementos mayoritarios.

Las muestras de biomasa han de estar completamente digeridas en forma líquida para la evaluación de la concentración de aquellos elementos que se deseen identificar y cuantificar mediante una técnica espectroscópica. Para ello se someten las muestras a una digestión en microondas en medio ácido según establece las normativas UNE-EN ISO 16967 [113], la cual clarifica además la técnica de análisis que se ha mencionado con anterioridad. Los equipos empleados para dicha determinación son un ICP-OES 715 Varian (Figura 17) y un microondas Milestone StarD (Figura 18).



Figura 17. Analizador ICP-OES Varian 715 ES.

Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex.

Los macroelementos incluidos en la normativa 19697 son Aluminio, Calcio, Hierro, Magnesio, Fósforo, Potasio, Silicio, Sodio y Titanio pero en este trabajo se han determinado Al, Ca, Fe, Mg, P, K y Na por ser los más interesantes desde el punto de vista de su interacción con la biomasa en su lavado.



Figura 18. Microondas Milestone StarD.

Laboratorio de caracterización de biocombustibles. Finca la Orden. Cicytex

3.4.8. Normas de clasificación de los biocombustibles.

Todos los resultados obtenidos en los distintos análisis se han evaluado por la normativa UNE-EN17225 [114] (tablas 4, 5 y 6).

Tabla 4. Norma UNE-EN ISO 17225-6 “Especificación de pélets producidos a partir de biomasa herbácea, biomasa de frutos, biomasa acuática y conjuntos y mezclas de biomasa”.

UNE-EN ISO 17225-6 "Especificación de pélets producidos a partir de biomasa herbácea"			
Propiedades	Unidades	A	B
Origen Materia prima		1. Biomasa herbácea	1. Biomasa herbácea
		2. Biomasa de frutos	2. Biomasa de frutos
		3. Biomasa acuática	3. Biomasa acuática
		4. Conjuntos y mezclas	4. Conjuntos y mezclas
Humedad	% en masa según se recibe	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15
Cenizas	% en base seca	A6.0 ≤ 6	A10 ≤ 10
PCI	kcal/kg	≥ 3.500	≥ 3.500
Nitrógeno	% en base seca	N1.5 ≤ 1,5	N2.0 ≤ 2,0
Azufre	% en base seca	S 0.20 ≤ 0,20	S 0.30 ≤ 0,30
Cloro	% en base seca	Cl 0.10 ≤ 0,10	Cl 0.30 ≤ 0,30
Durabilidad	% según se recibe	DU 97.5 ≥ 97,5	DU 96.0 ≥ 96,0

Tabla 5. Norma UNE-EN ISO 17225-4 “Especificaciones de astillas de madera para uso no industrial”.

UNE-EN ISO 17225-4 "Especificaciones de astillas de madera para uso no industrial"					
Propiedades	Unidades	A1	A2	B1	B2
Origen Materia prima		1.1.1- Árboles enteros sin raíces	1.1.1- Árboles enteros sin raíces	1.1- Biomasa leñosa	1.2.- Subproductos y residuos de industrias de procesamiento de madera
		1.1.3- Fuste	1.1.3- Fuste	procedente del monte,	1.3 Madera usada
		1.2.1- Residuo de madera no tratada químicamente	1.2.1- Residuo de madera no tratada químicamente	plantación y otra madera virgen	
		1.1.4.3 Residuos de corta, almacenamiento de frondosas	1.1.4.3 Residuos de corta, almacenamiento de frondosas	1.2.1- Residuo de madera no tratada químicamente	
Humedad	% en masa según se recibe	≤ 10 o ≤ 25	≤ 35	A especificar	
Cenizas	% en base seca	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$	
PCI	kcal/kg	≥ 3.100	≥ 2.600	A especificar	
Nitrógeno	% en base seca	-	-	$\leq 1,0$	
Azufre	% en base seca	-	-	$\leq 0,1$	

Tabla 6. Norma UNE-EN ISO 17225-2 “Especificaciones de pélets para uso no industrial”.

UNE-EN ISO 17225-2 "Especificaciones de pélets para uso no industrial"				
Propiedades	Unidades	A1	A2	B
Origen Materia prima		1.1.3- Fuste 1.2.1- Residuo de madera no tratada químicamente	1.1.1- Arboles completos sin raíces 1.1.3- Fuste 1.1.4- Residuo de corta 1.1.6-Corteza 1.2.1- Residuo de madera no tratada químicamente	1.1- Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen 1.2.- Subproductos y residuos de industrias de madera
Humedad	% en base húmeda	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	≤ 3
PCI	MJ/kg	$Q 16,5 \geq 16,5$	$Q 16,5 \geq 16,5$	$Q 16,5 \geq 16,5$
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	≤ 1
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$
Durabilidad	% según se recibe		$\geq 97,5$	$\geq 96,5$

3.5. Ensayos de combustión en calderas.

El estudio experimental de la combustión de los distintos residuos que se está analizando, tiene como fin primordial el cálculo del rendimiento de la combustión de los mismos, así como de las calderas de biomasa utilizadas donde han sido ensayados. Estos valores indicarán la viabilidad de una posible utilización en plantas generadoras de energía. Para las pruebas de combustión se han utilizado dos tipos de calderas, una caldera de condensación con generación de calor y electricidad de la marca Ökofen (figura 19) y otra caldera Lasian (figura 21) para aporte únicamente de calefacción.

La caldera de la marca ÖKOFEN es una caldera de última generación que se caracteriza porque el sistema de calentamiento de pélets de alta potencia se basa en Pellematic Condens, una caldera de pélets eléctrica más eficiente con tecnología de caldera de condensación. Para la generación de energía, esto se complementa con un motor Stirling.



Figura 19. Caldera Ökofen Pellematic Condens para producción de calefacción y electricidad en los invernaderos de Cicytex.

La tecnología de caldera de condensación alcanza una eficiencia del 107,3 %, lo que se asocia con emisiones más bajas.

La caldera proporciona el calor necesario para el agua caliente y la calefacción, que se almacena temporalmente en un tanque intermedio. Esto significa que los tiempos de funcionamiento del sistema se pueden adaptar individualmente.

El motor Stirling integrado en la caldera de pélets produce electricidad y puede alimentar la casa independientemente de la red pública. El motor Stirling reacciona muy rápidamente al ajuste óptimo del material y proporciona toda la potencia disponible en pocos minutos.

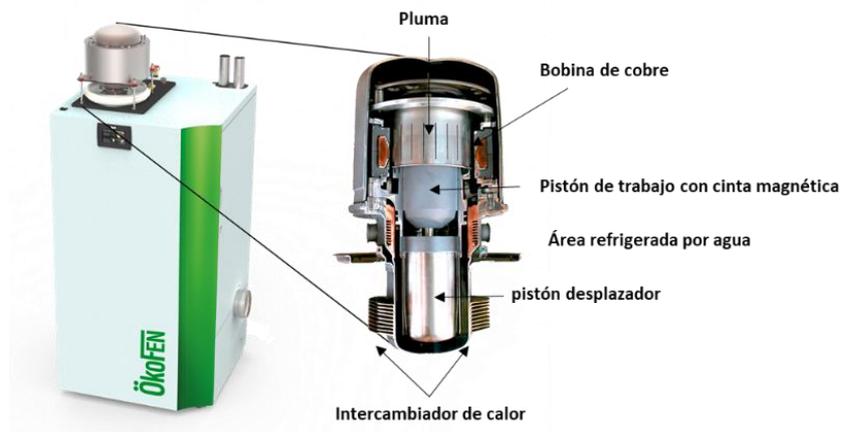


Figura 20. Motor Stirling integrado en la caldera para producción de electricidad [115].

Por otro lado, la caldera de la marca Lasian de 30 kW de potencia (figura 21) es una caldera de funcionamiento automático para combustibles como pélets de madera y hueso de aceituna. Lleva un control electrónico, con distintos menús e información del estado del funcionamiento de la caldera como del nivel de combustible o aviso del mantenimiento periódico.



Figura 21. Caldera Lasian Bioselect Compact 30 para producción de calefacción en los invernaderos de Cicytex.

El control electrónico de la Caldera BIOSELECT Compact 30 permite la programación de dos modos de funcionamiento, continuo (para demanda constante de calor) o por demanda (cuando la caldera sufre periodos más o menos largos sin demanda de calor). La caldera dispone de un depósito para la recogida automática de la ceniza de unos 140 litros aproximadamente. Además el equipo contiene un quemador Bioselect con encendido automático y un depósito de inercia para la acumulación del agua de calefacción.

Sobre los gases de combustión, se han realizado una serie de medidas (temperatura de humos (°C), CO (ppm) y NO (ppm)) utilizando el analizador de gases “TESTO 335” (figura 22).

Para ello, se realizó un orificio en la chimenea de la caldera, por donde se introdujo la sonda para las lecturas de las emisiones de gases de combustión (figura 23).



Figura 22. Analizador de gases “Testo 335”

A la hora de analizar los parámetros de combustión se realizará con las condiciones estándar establecidas por la caldera para pélets comerciales. Se ha elegido esta opción para ver el comportamiento de cada uno de los pélets fabricados en las mismas condiciones.



Figura 23. Seguimiento del proceso de combustión mediante analizador de gases portátil Testo en ambas calderas.

Una vez realizadas las mediciones de cada uno de los biocombustibles, se realiza su clasificación según la normativa UNE EN 303-5 [116] de límites de emisiones de CO. Los valores exigidos por la norma 303-5 se pueden observar en la tabla 7 que se muestra a continuación.

Tabla 7. Norma UNE-EN- 303-5.

NORMA UNE-EN-303-5. Calderas de calefacción. Parte 5 Calderas especiales para biocombustibles sólidos hasta 300 kW. Establece los siguientes límites de emisión.

Potencia útil kW	Límite de emisiones		
	CO (mg/m ³ a 10 % de O ₂)		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
≤ 50	15.000	5.000	3.000
> 50 a 150	12.500	4.500	2.500
>150 a 300	12.500	2.000	1.200

El 1 de enero de 2020 comenzó la aplicación del Reglamento que establece los requisitos de diseño ecológico para calderas de biomasa, ya que finalizó el periodo transitorio establecido por el Reglamento 2015/1189 de diseño ecológico aplicable a calderas de combustible sólido, en vigor desde agosto de 2015.

Este reglamento, de obligado cumplimiento, estipula que los equipos fabricados en Europa o que se vayan a instalar en territorio europeo deben cumplir unos requisitos

mínimos de eficiencia energética y emisiones de partículas al ambiente, así como de monóxido de carbono, compuestos orgánicos gaseosos y óxidos de nitrógeno (tabla 8). Aplica a calderas de potencia térmica nominal inferior a 500 kW que usen combustibles sólidos. Están excluidas las calderas que usen exclusivamente biomasa no procedente de madera (como cáscaras de frutos secos, huesos de aceituna, etc).

Tabla 8. Resumen de los valores a cumplir en el reglamento 2015/1189

Parámetro	Valores a cumplir (1)	
	Calderas automáticas	Calderas manuales
Eficiencia energética estacional (%)	≥ 77 (≥ 75 para <20 kW)	
CO (mg/Nm ³)	≤ 500	≤ 700
NO _x (mg/Nm ³)	≤ 200 para biomasa y ≤ 350 para combustibles sólidos fósiles	

(1) Todos los valores de emisiones están referidos a un contenido de oxígeno del 10%

En agosto de 2015 también entró en vigor el Reglamento de Ecodiseño aplicable a aparatos de calefacción local de combustible sólido (estufas, insertables, cocinas,...) de potencia térmica nominal inferior a 50 kW. El periodo transitorio establecido por dicho reglamento finalizó el 1 de enero de 2022.

Los reglamentos de Ecodiseño para equipos de climatización tienen como objetivo entre otros, fomentar el empleo eficiente de combustibles de origen renovable, contribuyendo así a los objetivos de eficiencia energética y ahorro de emisiones de la UE. En este caso los valores a cumplir son todavía más estrictos que en el reglamento 2015/1189, pasando el límite de CO de 500 (mg/Nm³) a 300 (mg/Nm³) para estufas de pélets. Los límites de emisiones de NO se mantendrían igual que en el reglamento.

3.6. Diseño y análisis estadístico de los datos.

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio científico han sido sometidos a un análisis estadístico con el programa SPSS-PC Versión 20.0.

El diseño estadístico utilizado ha sido un análisis de varianza univariado (ANOVA BIDIRECCIONAL). Para la determinación de los ensayos diferentes entre sí, se ha

utilizado la Técnica de Separación de Medias mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK, $p < 0,05$).

3.7. Ensayo de cribado y lavado de astillas de biomasa a nivel de laboratorio.

A las astillas de ciruelo, paulownia, olivo y cardo tras el proceso de lavado se les realizó una nueva caracterización para determinar la disminución del contenido en elementos minerales (cenizas).

3.8. Método experimental utilizado a nivel de laboratorio.

El método experimental utilizado (figura 24) incluye varias series de test que consisten en un descortezado, un triturado, un fraccionamiento mecánico de tamaño y un tratamiento de lavado con agua.

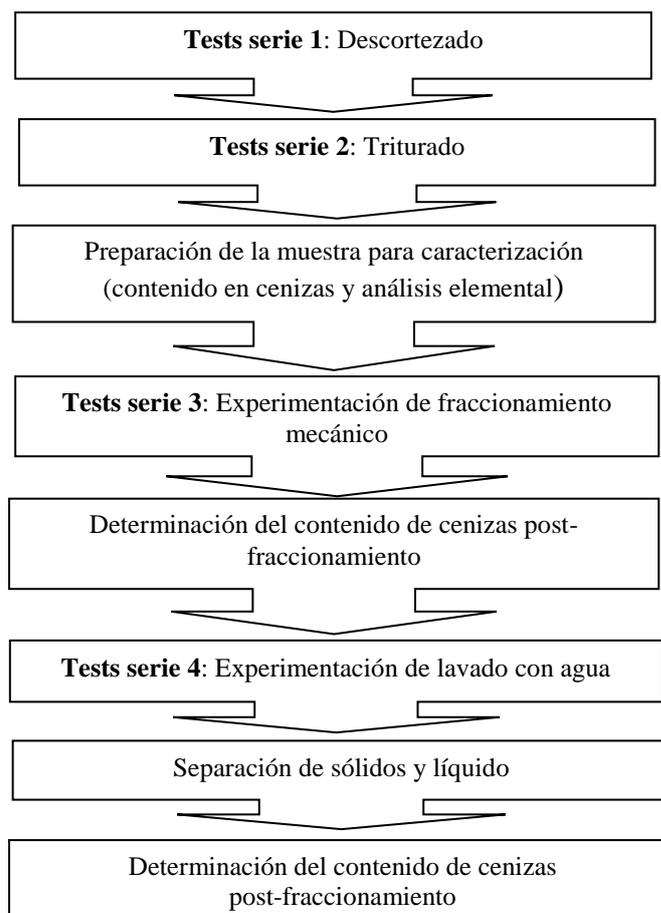


Figura 24. Diagrama de bloques ilustrando el proceso experimental.

3.8.1. Test Serie 1: Descortezado.

En este primer test del método experimental utilizado se realiza un descortezado completo a una parte de la biomasa seleccionada de cada una de las especies estudiadas (figura 25). Para ello se utilizaron una serie de pequeñas hachas que permitieron retirar de forma manual la corteza del tronco de cada una de las muestras. La finalidad principal de esta acción es reducir el porcentaje de cenizas de la materia prima.



Figura 25. Troncos de Paulownia con corteza y descortezado.

3.8.2. Test Serie 2: Triturado.

En esta fase del proceso de experimentación se realizó un triturado de la biomasa con el objetivo de reducir su tamaño para poder realizar los siguientes trabajos establecidos en el proceso experimental. Para la realización del triturado se ha utilizado una trituradora eléctrica de cuchillas fabricada por Máquinas forestales Ventura (figura 26).



Figura 26. Trituradora fabricada por Maquinas forestales Ventura

3.8.3. Test Serie 2: Fraccionamiento mecánico.

Este grupo de tests fueron realizados después de tomar las muestras de materia prima para determinaciones iniciales de las propiedades de biomasa. En primer lugar se procedió a triturar la biomasa de las muestras de los diferentes residuos agrícolas y cultivos energéticos en picadora eléctrica con un tamaño de partícula menor o igual a 150 mm. La biomasa triturada fue almacenada en recipientes estancos temporalmente hasta su alimentación a un equipo de fraccionamiento con diferentes tamices con agitador vibratorio (HAVE UWL 400, test Sieve Shaker, Figura 27). El equipo de tamizado está formado por una serie de tamices de diferentes tamaños de luz de malla (100 mm, 31,5 mm, 16,8 mm, 8 mm, 3,15 mm y 1 mm). Las muestras fueron tamizadas para separar los residuos finos y gruesos después de 10 minutos de operación (figura 28).



Figura 27. Equipo de tamizado HAVE UWL.

La fracción más fina se recogió en un recipiente en la zona inferior del equipo de separación. Todas las muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente en bolsas cerradas para su posterior análisis de propiedades físicas y químicas.

Una vez realizada toda la caracterización de la biomasa (consultada la bibliografía existente [117,74]), se realizó un lavado de biomasa para reducir el % de cenizas.



Figura 28. Biomasa cribada con distintos tamices (base y 8 mm).

3.8.4. Test Serie 3: Lavado de biomasa.

El agua fue utilizada como solvente en esta serie de tests, con el objetivo de determinar la separación de elementos solubles en agua de la biomasa frente a los elementos insolubles. La temperatura del agua, el tiempo de lavado y la relación de agua a biomasa son los principales factores en el proceso de lavado. La efectividad del lavado depende del tamaño de partícula de la biomasa, del tipo de biomasa y de las condiciones de operación del pretratamiento [118]. A continuación, se muestran las condiciones de lavado de la biomasa (tabla 9).

Tabla 9. Condiciones de lavado para los test de lavado.

Fracción	Agua
Relación agua a biomasa (peso/peso)	10
Temperatura (°C)	25 y 45
Tiempo de lavado (minutos)	5, 30, 60 y 180

La tabla 9 muestra el diseño experimental, el cual consiste en dos niveles de temperatura (25 °C para todas las materias primas y 45 °C solo para el tamiz 8), cuatro niveles de tiempo de lavado (5, 30, 60 y 180 minutos), y una relación de agua a biomasa de 10. Para cada test, una cantidad fija de biomasa (200 g) fue sumergida en un recipiente con 2 litros de agua. Se utilizaron cuatro recipientes (repeticiones) por muestra a estudiar para cada una de las condiciones planteadas. El diagrama experimental se muestra en la figura 29.

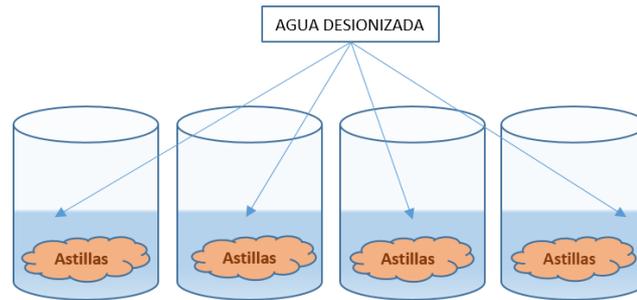


Figura 29. Diagrama esquemático del experimento de lavado.

Una vez se ha realizado el proceso de lavado, las muestras se extraían del agua y se ponían a escurrir para eliminar el agua sobrante (figura 30).



Figura 30. Proceso de lavado de biomasa.

Posteriormente al escurrido de las muestras, estas eran introducidas en bandejas para pasar a su secado total para poder realizar los distintos análisis en base seca (cenizas, análisis elemental, etc). En la figura 31 se pueden observar las muestras en las bandejas preparadas para introducirlas en la estufa de secado después de su lavado.



Figura 31. Muestras de biomasa lavadas previo a su secado.

Una vez teníamos las muestras secadas, estas eran molidas para su posterior proceso de análisis de caracterización (figura 32).



Figura 32. Muestras de poda de ciruelo molidas.

3.9. Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos.

El estudio de viabilidad realizado en este trabajo de Tesis se ha basado en el funcionamiento general de las plantas de peletizado ya existentes en las distintas zonas geográficas de España. Para ello se han tenido en cuenta los puntos críticos del proceso de fabricación de pélets (logística de transporte de la biomasa y precios de fabricación y venta de pélets) y se aportado el uso de las biomásas estudiadas en esta Tesis.

4. RESULTADOS.

4.1. Cardo (*Cynara cardunculus* L.).

4.1.1. Resultados del cribado.

En la tabla 10 podemos observar el cribado de la biomasa de cardo con distintos tamices.

Tabla 10. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de cardo.

Repetición	Sin cribar	Base	Criba 1 mm	Criba 3,15 mm	Criba 8 mm	Criba 16 mm	Criba >100 mm
1	13,95	13,97	13,34	12,91	12,58	8,63	10,69
2	14,33	13,94	13,23	13,11	12,68	8,62	10,63
3	13,44	13,93	13,26	12,84	12,92	8,62	10,72
4	14,01	13,89	13,21	13,07	12,7	8,74	10,48
MEDIAS	13,93	13,93	13,26	12,98	12,72	8,65	10,63
Dev.	0,19	0,03	0,06	0,09	0,06	0,05	0,09

En la tabla 11 se muestran los porcentajes de peso de muestra cribada en los distintos tamices en función de toda la biomasa cribada.

Tabla 11. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.

Cribas	Biomasa cribada
Base	15%
1 mm	16%
3,15 mm	24%
8 mm	40%
16 mm	2%
>100 mm	3%

4.1.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 12 podemos observar los resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de cardo en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 12. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de cardo.

Materia prima	Repetición	sin Lavar	5 minutos	30 minutos	60 minutos	180 minutos
Sin cribar	1	13,97	10,17	8,17	8,04	7,87
	1	13,94	10,66	7,94	7,56	7,51
	1	13,93	10,17	8,85	7,92	8,16
	1	13,89	10,34	8,79	7,15	7,00
	Media	13,93	10,34	8,44	7,67	7,64
	Desv.	0,03	0,20	0,37	0,37	0,37
Cribado a 3,15 mm y lavado a T ambiente	2	12,91	11,79	8,58	7,47	6,92
	2	13,11	11,04	7,86	7,94	6,96
	2	12,84	11,15	7,77	8,12	6,64
	2	13,07	11,13	8,46	7,43	6,80
	Media	12,98	11,28	8,17	7,74	6,83
	Desv.	0,09	0,34	0,32	0,24	0,08
Cribado a 8 mm y lavado a T ambiente	3	12,58	9,69	7,25	7,14	5,77
	3	12,68	9,75	7,31	6,82	5,92
	3	12,92	10,25	7,20	6,37	6,34
	3	12,70	9,40	7,00	7,36	6,02
	Media	12,72	9,77	7,19	6,92	6,01
	Desv.	0,06	0,17	0,13	0,24	0,12
Cribado a 8 mm y lavado a T 45°C	4	12,58	7,66	6,74	6,56	6,29
	4	12,68	8,03	6,95	6,45	6,54
	4	12,92	8,00	5,96	6,94	6,52
	4	12,70	8,03	6,50	6,27	6,21
	Media	12,72	7,93	6,54	6,56	6,39
	Desv.	0,06	0,17	0,21	0,14	0,14

4.1.3. Resultados del análisis elemental y contenido en Cl.

En las tablas 13, 14 y 15 se muestran los resultados del análisis elemental y el contenido en Cl realizado a la biomasa de cardo.

Tabla 13. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin Lavar	1	1,20	39,7	5,69	0,23	0,020
	2	1,23	39,7	5,71	0,22	0,020
	3	1,22	40,4	5,60	0,25	0,020
	4	1,26	40,3	5,62	0,23	0,020
	MEDIA	1,23	40,0	5,66	0,23	0,020
Lavado de 5 minutos	1	1,06	41,4	5,89	0,15	0,010
	2	1,07	41,2	5,93	0,14	0,010
	3	1,08	41,4	5,82	0,11	0,010
	4	1,10	40,8	5,85	0,11	0,010
	MEDIA	1,08	41,2	5,87	0,13	0,010
Lavado de 30 minutos	1	1,07	43,3	5,89	0,07	0,004
	2	1,07	43,6	5,87	0,07	0,004
	3	1,09	43,0	5,89	0,08	0,005
	4	1,06	42,8	5,84	0,09	0,005
	MEDIA	1,07	43,2	5,87	0,08	0,005
Lavado de 60 minutos	1	1,00	43,5	5,85	0,09	0,005
	2	0,99	43,3	5,80	0,08	0,005
	3	1,06	43,5	5,93	0,05	0,004
	4	1,02	42,6	5,87	0,07	0,005
	MEDIA	1,02	43,2	5,86	0,07	0,005
Lavado de 180 minutos	1	1,01	43,5	5,93	0,09	0,004
	2	1,02	43,8	5,97	0,09	0,004
	3	0,98	43,7	5,98	0,09	0,004
	4	0,97	43,6	5,90	0,09	0,003
	MEDIA	1,00	43,7	5,95	0,09	0,004

Tabla 14. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo cribada a 8 mm.

Tratamiento de lavado	Muestra	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin Lavar	1	1,20	41,60	5,51	0,18	0,020
	2	1,10	41,60	5,59	0,20	0,020
	3	1,05	41,50	5,63	0,18	0,021
	4	1,07	41,50	5,65	0,17	0,022
	MEDIA	1,11	41,6	5,60	0,18	0,021
Lavado de 5 minutos	1	1,22	44,1	5,90	0,11	0,010
	2	1,21	43,6	5,77	0,10	0,010
	3	1,11	43,8	5,86	0,14	0,010
	4	1,14	43,6	5,83	0,15	0,001
	MEDIA	1,17	43,8	5,84	0,13	0,008
Lavado de 30 minutos	1	0,94	44,9	5,83	0,07	0,004
	2	0,94	44,6	5,88	0,06	0,004
	3	0,89	44,8	5,93	0,08	0,005
	4	0,91	44,9	5,94	0,09	0,004
	MEDIA	0,92	44,8	5,90	0,08	0,004
Lavado de 60 minutos	1	0,99	45,5	6,04	0,06	0,003
	2	1,03	45,1	5,98	0,06	0,004
	3	0,97	45,4	5,98	0,09	0,003
	4	0,98	45,7	6,01	0,10	0,003
	MEDIA	0,99	45,4	6,00	0,08	0,003
Lavado de 180 minutos	1	0,81	44,7	6,04	0,08	0,002
	2	0,83	44,8	5,93	0,08	0,003
	3	0,87	45,1	6,15	0,06	0,003
	4	0,86	45,3	6,10	0,08	0,003
	MEDIA	0,84	45,0	6,06	0,08	0,003

Tabla 15. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de cardo cribada a 8mm y lavada con agua a 45° C.

Tratamiento de lavado	Muestra	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin Lavar	1	1,20	41,6	5,51	0,18	0,020
	2	1,10	41,6	5,59	0,20	0,020
	3	1,05	41,5	5,63	0,18	0,021
	4	1,07	41,5	5,65	0,17	0,022
	MEDIA	1,11	41,6	5,60	0,18	0,021
Lavado de 5 minutos	1	0,97	44,2	5,88	0,08	0,007
	2	0,96	44,0	5,87	0,07	0,008
	3	0,96	44,3	5,94	0,08	0,007
	4	1,03	44,0	5,93	0,09	0,007
	MEDIA	0,98	44,1	5,91	0,08	0,007
Lavado de 30 minutos	1	0,87	44,9	6,02	0,06	0,003
	2	0,84	45,0	6,06	0,06	0,003
	3	0,95	44,5	6,06	0,05	0,004
	4	0,87	45,0	6,08	0,08	0,004
	MEDIA	0,88	44,9	6,06	0,06	0,004
Lavado de 60 minutos	1	0,83	44,7	6,08	0,06	0,004
	2	0,82	44,6	6,07	0,06	0,004
	3	0,78	44,7	6,02	0,05	0,003
	4	0,86	44,9	6,09	0,05	0,003
	MEDIA	0,82	44,7	6,07	0,06	0,004
Lavado de 180 minutos	1	0,86	45,0	6,09	0,06	0,003
	2	0,82	44,8	6,06	0,05	0,003
	3	0,75	44,9	5,96	0,06	0,004
	4	0,74	44,7	6,03	0,05	0,003
	MEDIA	0,79	44,9	6,04	0,06	0,003

4.1.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las tablas 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22 se puede observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de cardo sin tamizar, tamizada a 8 mm y tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tabla 16. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	9597	10523	10523
Lavado 5 minutos	8502	8148	3679
Lavado 30 minutos	8512	6840	3435
Lavado 60 minutos	8487	7287	3554
Lavado 180 minutos	8462	6342	3557

Tabla 17. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	272	354	354
Lavado 5 minutos	247	181	93
Lavado 30 minutos	240	166	99
Lavado 60 minutos	230	167	90
Lavado 180 minutos	233	180	94

Tabla 18. Contenido en K (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	23453	24004	24004
Lavado 5 minutos	18390	16087	7035
Lavado 30 minutos	12892	11336	5123
Lavado 60 minutos	12747	9661	5124
Lavado 180 minutos	12349	9600	4966

Tabla 19. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	2502	3189	3189
Lavado 5 minutos	2419	2239	981
Lavado 30 minutos	2142	1740	815
Lavado 60 minutos	2047	1730	825
Lavado 180 minutos	1951	1519	811

Tabla 20. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	12820	14482	14482
Lavado 5 minutos	10782	11524	5165
Lavado 30 minutos	7828	8074	3926
Lavado 60 minutos	7594	7431	3612
Lavado 180 minutos	6964	7127	3211

Tabla 21. Contenido en P (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	743	702	702
Lavado 5 minutos	756	580	521
Lavado 30 minutos	600	459	404
Lavado 60 minutos	571	479	421
Lavado 180 minutos	512	413	350

Tabla 22. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de cardo.

Tratamientos de lavado	Cardo sin tamizar	Cardo tamizado T-8	Cardo tamizado T-8 a 45°
Sin lavar	252	388	388
Lavado 5 minutos	250	257	123
Lavado 30 minutos	280	226	122
Lavado 60 minutos	276	228	131
Lavado 180 minutos	274	224	114

4.1.5. Resultados del poder calorífico.

En la tabla 23 se pueden observar los resultados obtenidos de poder calorífico en las muestras de biomasa de cardo. Se ha optado por analizar el material de partida y los tratamientos de más tiempo de lavado.

Tabla 23. Poder calorífico en biomasa de cardo.

Tratamiento	Muestra	PCS, kcal/kg	PCI, kcal/kg
Sin lavar	1	3882	3590
	2	3874	3576
	3	3986	3693
	4	3920	3626
	MEDIA	3916	3621
Cribado a 8 mm y lavado a 45° durante 180 minutos	1	4122	3806
	2	4289	3979
	3	4275	3954
	4	4250	3931
	MEDIA	4234	3918
Cribado a 8 mm y lavado durante 180 minutos	1	4321	4003
	2	4377	4060
	3	4328	4016
	4	4350	4035
	MEDIA	4344	4029

4.1.6. Caracterización de los pélets de cardo.

Tabla 24. Caracterización de los pélets de cardo.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
1	13,67	0,62	41,20	5,31	0,09	39,82	0,02	3565	3287	97,5
2	13,85	0,62	40,90	5,28	0,08	39,97	0,03	3550	3274	97,0
3	13,56	0,63	41,00	5,29	0,08	40,15	0,03	3500	3223	96,9
MEDIA	13,69	0,62	41,03	5,29	0,08	39,98	0,03	3538	3261	97,1

4.2. Ciruelo (*Prunus doméstica* L.).

4.2.1. Resultados del cribado.

En la tabla 25 podemos observar el cribado de la biomasa de ciruelo con distintos tamices.

Tabla 25. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de ciruelo.

Repetición	Sin cribar	Base	Criba 1 mm	Criba 3,15 mm	Criba 8 mm	Criba 16 mm	Criba >100 mm
1	0,99	6,79	0,87	0,68	0,69	0,79	0,80
2	0,97	7,59	0,91	0,73	0,68	0,80	0,75
3	0,92	5,84	0,91	0,73	0,73	0,85	0,81
4	0,90	8,08	0,82	0,84	0,72	0,81	0,80
MEDIAS	0,95	7,08	0,88	0,75	0,71	0,81	0,79
Dev.	0,04	0,57	0,04	0,07	0,02	0,01	0,02

En la tabla 26 se muestran los porcentajes de muestra cribada en los distintos tamices en función de toda la biomasa cribada.

Tabla 26. Resultados del % de biomasa cribada en los distintos tamices.

Cribas	Biomasa cribada
Base	9%
Criba 1 mm	27%
Criba 3,15 mm	52%
Criba 8 mm	6%
Criba 16 mm	4%
Criba >100 mm	2%

4.2.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 27 se puede observar los resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de ciruelo en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 27. Resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de ciruelo.

Materia prima	Repetición	sin Lavar	5 minutos	30 minutos	60 minutos	180 minutos
Ciruelo con corteza y sin cribar	1	2,40	1,74	1,78	1,90	2,07
	1	2,38	1,72	1,78	1,92	2,08
	1	2,39	1,74	1,75	1,89	2,10
	1	2,38	1,73	1,72	1,92	2,09
	Media	2,39	1,73	1,76	1,91	2,09
	Desv.	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
Ciruelo sin corteza y sin cribar	2	0,99	0,95	0,92	0,90	0,91
	2	0,97	0,94	0,90	0,92	0,92
	2	0,92	0,94	0,92	0,91	0,90
	2	0,90	0,92	0,92	0,92	0,93
	Media	0,95	0,94	0,92	0,91	0,92
	Desv.	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01
Cribado a 3,15 mm y lavado a T ambiente	3	0,75	0,73	0,68	0,71	0,73
	3	0,73	0,72	0,69	0,70	0,75
	3	0,73	0,73	0,72	0,69	0,72
	3	0,79	0,75	0,70	0,71	0,77
	Media	0,75	0,73	0,70	0,70	0,74
	Desv.	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02
Cribado a 8 mm y lavado a T ambiente	4	0,69	0,73	0,60	0,77	0,76
	4	0,70	0,75	0,60	0,78	0,78
	4	0,72	0,70	0,62	0,79	0,73
	4	0,71	0,71	0,63	0,80	0,72
	Media	0,71	0,72	0,61	0,79	0,75
	Desv.	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03
Cribado a 8 mm y lavado a T 45°C	4	0,70	0,61	0,69	0,59	0,52
	4	0,69	0,60	0,70	0,58	0,54
	4	0,71	0,60	0,68	0,59	0,56
	4	0,72	0,62	0,70	0,57	0,55
	Media	0,71	0,61	0,69	0,58	0,54
	Desv.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

4.2.3. Resultados del análisis elemental.

En las tablas 28, 29, 30 y 31 se muestran los resultados del análisis elemental y el contenido en CI realizado a la biomasa de ciruelo.

Tabla 28. Resultado del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo con corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,18	45,9	6,05	0,02	0,0001
	2	0,18	46,1	6,06	0,02	0,0002
	3	0,19	45,9	6,09	0,01	0,0001
	4	0,18	45,5	6,04	0,01	0,0002
	MEDIA	0,18	45,9	6,06	0,02	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,17	45,4	6,15	0,02	0,0001
	2	0,16	45,4	6,14	0,01	0,0001
	3	0,16	44,8	6,14	0,01	0,0002
	4	0,16	46,0	6,15	0,01	0,0001
	MEDIA	0,16	45,4	6,15	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,18	46,3	6,09	0,01	0,0001
	2	0,18	46,2	6,08	0,01	0,0001
	3	0,18	45,6	6,10	0,01	0,0001
	4	0,19	45,6	6,09	0,01	0,0002
	MEDIA	0,18	45,9	6,09	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,16	46,0	6,09	0,01	0,0001
	2	0,15	45,9	6,10	0,01	0,0002
	3	0,16	45,5	6,10	0,01	0,0001
	4	0,16	45,5	6,09	0,01	0,0001
	MEDIA	0,16	45,7	6,10	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,19	44,8	6,07	0,01	0,0001
	2	0,19	44,7	6,09	0,01	0,0001
	3	0,18	44,9	6,09	0,01	0,0001
	4	0,17	44,9	6,08	0,01	0,0001
	MEDIA	0,18	44,8	6,08	0,01	0,0001

Tabla 29. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,13	46,6	6,06	0,02	0,0002
	2	0,13	46,6	6,10	0,01	0,0001
	3	0,12	46,7	6,07	0,01	0,0002
	4	0,12	46,3	6,02	0,01	0,0001
	MEDIA	0,13	46,6	6,06	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,14	46,9	6,14	0,01	0,0001
	2	0,13	46,4	6,08	0,01	0,0001
	3	0,13	46,0	6,02	0,01	0,0002
	4	0,14	46,0	6,06	0,01	0,0002
	MEDIA	0,13	46,3	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,12	46,4	6,07	0,01	0,0002
	2	0,11	46,2	6,05	0,01	0,0001
	3	0,11	46,1	6,05	0,01	0,0002
	4	0,12	46,1	6,08	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	46,2	6,06	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,11	46,4	6,12	0,01	0,0001
	2	0,11	46,2	6,08	0,01	0,0001
	3	0,10	46,4	6,14	0,01	0,0001
	4	0,10	46,3	6,08	0,01	0,0001
	MEDIA	0,11	46,3	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,11	46,4	6,04	0,01	0,0002
	2	0,13	46,1	6,05	0,01	0,0002
	3	0,12	46,7	6,17	0,01	0,0001
	4	0,11	46,5	6,11	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	46,4	6,09	0,01	0,0002

Tabla 30. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza y cribada a 8 mm.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,11	45,8	6,08	0,01	0,0001
	2	0,11	46,0	6,07	0,01	0,0003
	3	0,12	45,9	6,07	0,01	0,0002
	4	0,12	46,2	6,09	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	46,0	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,12	46,0	6,03	0,01	0,0001
	2	0,12	46,0	6,09	0,01	0,0001
	3	0,13	46,0	6,12	0,01	0,0002
	4	0,13	45,6	6,13	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	45,9	6,09	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,11	47,4	6,02	0,01	0,0001
	2	0,10	47,1	5,98	0,01	0,0001
	3	0,10	47,2	5,97	0,01	0,0001
	4	0,11	46,9	5,91	0,01	0,0001
	MEDIA	0,10	47,2	5,97	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,08	47,1	5,93	0,01	0,0001
	2	0,07	46,9	5,96	0,01	0,0001
	3	0,09	46,9	5,97	0,01	0,0001
	4	0,08	47,6	6,03	0,01	0,0001
	MEDIA	0,08	47,1	5,97	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,13	46,8	5,96	0,01	0,0001
	2	0,14	46,4	5,87	0,01	0,0001
	3	0,12	46,9	5,90	0,01	0,0001
	4	0,12	46,8	5,92	0,01	0,0001
	MEDIA	0,13	46,7	5,91	0,01	0,0001

Tabla 31. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,11	45,8	6,08	0,01	0,0001
	2	0,12	46,0	6,07	0,01	0,0003
	3	0,12	45,9	6,07	0,01	0,0002
	4	0,12	46,2	6,09	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	46,0	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,13	46,2	5,81	0,01	0,0001
	2	0,11	45,4	5,88	0,01	0,0002
	3	0,12	45,7	5,82	0,01	0,0003
	4	0,13	45,5	5,84	0,01	0,0002
	MEDIA	0,12	45,7	5,84	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,12	45,5	5,89	0,01	0,0002
	2	0,12	45,8	5,89	0,01	0,0001
	3	0,11	45,0	5,78	0,01	0,0001
	4	0,11	45,8	5,82	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	45,5	5,85	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,12	45,3	5,79	0,01	0,0001
	2	0,11	45,3	5,81	0,01	0,0002
	3	0,11	44,7	5,80	0,01	0,0001
	4	0,12	45,2	5,81	0,01	0,0001
	MEDIA	0,12	45,1	5,80	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,12	46,4	5,89	0,01	0,0001
	2	0,13	46,5	5,85	0,01	0,0001
	3	0,13	45,6	5,92	0,01	0,0001
	4	0,12	46,0	5,60	0,01	0,0001
	MEDIA	0,13	46,1	5,82	0,01	0,0001

4.2.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las tablas 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38 se puede observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de ciruelo con corteza y sin cribar, sin corteza y sin cribar, sin corteza y tamizada a 8 mm y sin corteza, tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tabla 32. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	4534	1537	1255	1255
Lavado 5 minutos	3942	1817	1380	1410
Lavado 30 minutos	4461	1594	1380	1822
Lavado 60 minutos	4867	1480	1863	1542
Lavado 180 minutos	4798	1357	1756	1667

Tabla 33. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	452	218	79	79
Lavado 5 minutos	600	349	89	87
Lavado 30 minutos	620	366	96	153
Lavado 60 minutos	560	238	100	76
Lavado 180 minutos	581	214	113	100

Tabla 34. Contenido en K (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	1581	1230	1002	1002
Lavado 5 minutos	1286	1048	881	979
Lavado 30 minutos	1108	805	926	950
Lavado 60 minutos	940	709	918	919
Lavado 180 minutos	844	750	920	801

Tabla 35. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	730	404	457	457
Lavado 5 minutos	566	406	449	374
Lavado 30 minutos	652	339	395	444
Lavado 60 minutos	512	399	502	333
Lavado 180 minutos	535	359	433	396

Tabla 36. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	349	241	225	225
Lavado 5 minutos	283	214	223	229
Lavado 30 minutos	282	220	236	250
Lavado 60 minutos	183	188	220	243
Lavado 180 minutos	198	195	165	192

Tabla 37. Contenido en P (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	313	299	240	240
Lavado 5 minutos	257	261	262	234
Lavado 30 minutos	228	203	227	267
Lavado 60 minutos	199	196	287	221
Lavado 180 minutos	149	170	238	189

Tabla 38. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°
Sin lavar	231	169	81	81
Lavado 5 minutos	200	237	79	91
Lavado 30 minutos	260	103	95	116
Lavado 60 minutos	320	145	103	81
Lavado 180 minutos	313	138	121	105

4.2.5. Resultados del poder calorífico.

En la tabla 39 se pueden observar los resultados obtenidos de poder calorífico en las muestras de biomasa de ciruelo. Se ha optado por analizar el material de partida y los tratamientos de más tiempo de lavado.

Tabla 39. Poder calorífico en biomasa de ciruelo.

Tratamiento	Muestra	PCS, kcal/kg	PCI, kcal/kg
Con corteza, sin cribar y sin lavar	1	4631	4317
	2	4599	4279
	3	4632	4313
	4	4601	4285
	MEDIA	4616	4298
Sin corteza, sin cribar y sin lavar	1	4567	4250
	2	4572	4253
	3	4593	4275
	4	4614	4299
	MEDIA	4587	4269
Cribado a 8 mm y lavado 180 minutos	1	4693	4349
	2	4691	4338
	3	4675	4322
	4	4670	4340
	MEDIA	4682	4337
Cribado a 8 mm y lavado a 45°C durante 180 minutos	1	4661	4377
	2	4646	4369
	3	4631	4347
	4	4650	4340
	MEDIA	4647	4358

4.2.6. Caracterización de los pélets de ciruelo.

En las tablas 40 y 41 se puede ver los resultados de la caracterización de los pélets de ciruelo con corteza, sin corteza.

Tabla 40. Caracterización de los pélets de ciruelo con corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Con corteza	1,01	0,18	47,90	6,01	0,02	50,89	-	4708	4394	97,8
Con corteza	1,10	0,18	48,02	6,00	0,02	50,68	-	4617	4303	97,5
Con corteza	0,99	0,19	48,10	5,99	0,02	50,70	-	4663	4350	97,2
MEDIA	1,03	0,18	48,01	6,00	0,02	50,76	-	4663	4349	97,5

Tabla 41. Caracterización de los pélets de ciruelo sin corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Sin corteza	0,65	0,19	48,70	5,91	0,01	50,45	-	4552	4243	96,6
Sin corteza	0,65	0,18	49,00	5,96	0,01	50,16	-	4563	4251	96,9
Sin corteza	0,80	0,19	48,80	6,01	0,01	50,20	-	4516	4202	96,3
MEDIA	0,70	0,19	48,83	5,96	0,01	50,27	-	4544	4232	96,6

4.3. Olivo (*Olea europea* L. var. *europaea*).

4.3.1. Resultados del cribado.

En la tabla 42 se puede observar el cribado de la biomasa de olivo con distintos tamices.

Tabla 42. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de olivo.

Repetición	Sin cribar	Base	Criba 1 mm	Criba 3,15 mm	Criba 8 mm	Criba 16 mm	Criba >100 mm
1	1,15	8,11	1,69	0,99	0,86	0,93	0,93
2	1,14	8,52	1,79	1,04	0,82	0,93	0,94
3	1,10	8,25	1,77	1,05	0,86	0,95	0,92
4	1,07	8,52	1,75	1,07	0,83	0,93	0,91
MEDIAS	1,12	8,35	1,75	1,04	0,84	0,94	0,93
Dev.	0,04	0,19	0,04	0,03	0,02	0,00	0,01

En la tabla 43 se muestran los porcentajes de peso de muestra cribada en los distintos tamices en función de toda la biomasa cribada.

Tabla 43. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.

Cribas	Biomasa cribada
Base	10%
Criba 1 mm	25%
Criba 3,15 mm	41%
Criba 8 mm	20%
Criba 16 mm	3%
Criba >100 mm	1%

4.3.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 44 se pueden ver los resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de olivo en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 44. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de olivo.

Materia prima	Repetición	sin Lavar	5 minutos	30 minutos	60 minutos	180 minutos
Olivo con corteza y sin cribar	1	2,12	1,53	1,47	1,20	1,07
	2	1,95	1,36	1,41	1,13	1,47
	3	1,96	1,50	1,47	1,10	1,31
	4	2,00	1,48	1,45	1,12	1,15
	Media	2,01	1,47	1,45	1,14	1,25
	Desv.	0,07	0,07	0,03	0,04	0,17
Olivo sin corteza y sin cribar	1	1,15	0,87	0,82	0,80	0,75
	2	1,14	0,85	0,88	0,84	0,79
	3	1,10	0,89	0,89	0,78	0,80
	4	1,07	0,88	0,8	0,83	0,71
	Media	1,12	0,87	0,85	0,81	0,76
	Desv.	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03
Cribado a 3,15 mm y lavado a T ambiente	1	0,99	0,88	0,78	0,66	0,71
	2	1,04	0,85	0,79	0,68	0,72
	3	1,05	0,82	0,80	0,65	0,71
	4	1,07	0,85	0,77	0,65	0,73
	Media	1,04	0,85	0,79	0,66	0,72
	Desv.	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Cribado a 8 mm y lavado a T ambiente	1	0,86	0,86	0,72	0,66	0,74
	2	0,82	0,85	0,72	0,68	0,70
	3	0,86	0,80	0,79	0,69	0,74
	4	0,83	0,83	0,78	0,68	0,76
	Media	0,84	0,84	0,75	0,68	0,74
	Desv.	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02
Cribado a 8 mm y lavado a T 45°C	1	0,86	0,81	0,80	0,63	0,72
	2	0,82	0,81	0,79	0,69	0,75
	3	0,86	0,83	0,79	0,70	0,72
	4	0,83	0,83	0,81	0,72	0,78
	Media	0,84	0,82	0,80	0,69	0,74
	Desv.	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02

4.3.3. Resultados del análisis elemental.

En las tablas 45, 46, 47 y 48 se muestran los resultados del análisis elemental y el contenido en Cl realizado a la biomasa de olivo.

Tabla 45. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo con corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,23	48,2	6,19	0,02	0,0002
	2	0,22	48,0	6,16	0,02	0,0002
	3	0,24	48,0	6,16	0,02	0,0001
	4	0,22	48,0	6,15	0,01	0,0001
	MEDIA	0,23	48,1	6,17	0,02	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,22	48,4	6,25	0,01	0,0002
	2	0,23	48,5	6,23	0,01	0,0002
	3	0,24	48,4	6,24	0,01	0,0003
	4	0,22	48,5	6,23	0,01	0,0002
	MEDIA	0,23	48,5	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,24	48,6	6,15	0,01	0,0001
	2	0,22	48,4	6,14	0,01	0,0002
	3	0,23	48,6	6,18	0,01	0,0001
	4	0,22	48,5	6,16	0,01	0,0002
	MEDIA	0,23	48,5	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,21	48,6	6,25	0,01	0,0002
	2	0,20	48,7	6,23	0,01	0,0001
	3	0,19	48,8	6,24	0,01	0,0002
	4	0,19	48,8	6,23	0,01	0,0001
	MEDIA	0,20	48,7	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 180 minutos	1	0,23	47,8	6,22	0,01	0,0002
	2	0,24	47,7	6,22	0,01	0,0001
	3	0,24	47,7	6,23	0,01	0,0002
	4	0,23	47,6	6,21	0,01	0,0002
	MEDIA	0,24	47,7	6,22	0,01	0,0002

Tabla 46. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,21	47,3	6,27	0,01	0,0001
	2	0,21	47,2	6,27	0,01	0,0002
	3	0,19	47,3	6,28	0,01	0,0001
	4	0,20	47,2	6,26	0,01	0,0002
	MEDIA	0,20	47,3	6,27	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,21	47,7	6,24	0,01	0,0002
	2	0,19	47,6	6,23	0,01	0,0001
	3	0,19	47,6	6,23	0,01	0,0002
	4	0,21	47,9	6,24	0,01	0,0001
	MEDIA	0,20	47,7	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,23	48,1	6,24	0,01	0,0002
	2	0,20	48,0	6,23	0,01	0,0001
	3	0,20	47,9	6,22	0,01	0,0001
	4	0,22	48,0	6,22	0,01	0,0002
	MEDIA	0,21	48,0	6,23	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,19	49,0	6,20	0,01	0,0001
	2	0,19	48,9	6,20	0,01	0,0001
	3	0,20	49,0	6,21	0,01	0,0002
	4	0,21	48,9	6,19	0,01	0,0002
	MEDIA	0,20	49,0	6,20	0,01	0,0002
Lavado de 180 minutos	1	0,19	48,6	6,17	0,01	0,0002
	2	0,21	48,5	6,16	0,01	0,0001
	3	0,20	48,6	6,17	0,01	0,0001
	4	0,19	48,4	6,17	0,01	0,0002
	MEDIA	0,20	48,5	6,17	0,01	0,0002

Tabla 47. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza y cribada a 8 mm.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
	2	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0001
	3	0,18	47,6	6,17	0,01	0,0002
	4	0,17	47,5	6,19	0,01	0,0002
	MEDIA	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,17	48,2	6,17	0,01	0,0002
	2	0,15	48,3	6,15	0,01	0,0001
	3	0,16	48,2	6,17	0,01	0,0002
	4	0,15	48,2	6,16	0,01	0,0002
	MEDIA	0,16	48,2	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,16	48,1	6,16	0,01	0,0001
	2	0,17	48,2	6,16	0,01	0,0001
	3	0,16	48,0	6,15	0,01	0,0002
	4	0,17	48,1	6,15	0,01	0,0002
	MEDIA	0,17	48,1	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,18	48,0	6,24	0,01	0,0002
	2	0,19	48,1	6,23	0,01	0,0001
	3	0,18	48,2	6,22	0,01	0,0002
	4	0,17	48,1	6,23	0,01	0,0001
	MEDIA	0,18	48,1	6,23	0,01	0,0002
Lavado de 180 minutos	1	0,19	48,3	6,25	0,01	0,0002
	2	0,16	48,2	6,26	0,01	0,0001
	3	0,16	48,4	6,26	0,01	0,0001
	4	0,17	48,2	6,25	0,01	0,0001
	MEDIA	0,17	48,3	6,26	0,01	0,0001

Tabla 48. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
	2	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0001
	3	0,18	47,6	6,17	0,01	0,0002
	4	0,17	47,5	6,19	0,01	0,0002
	MEDIA	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
Lavado de 5 minutos	1	0,15	48,10	6,12	0,01	0,0001
	2	0,14	48,10	6,10	0,01	0,0002
	3	0,16	48,20	6,11	0,01	0,0001
	4	0,15	48,10	6,11	0,01	0,0002
	MEDIA	0,15	48,1	6,11	0,01	0,0002
Lavado de 30 minutos	1	0,14	48,00	6,16	0,01	0,0002
	2	0,15	47,80	6,16	0,01	0,0002
	3	0,15	48,00	6,18	0,01	0,0001
	4	0,14	47,80	6,16	0,01	0,0002
	MEDIA	0,15	47,9	6,17	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,18	49,10	6,20	0,01	0,0002
	2	0,17	49,20	6,21	0,01	0,0001
	3	0,18	9,00	6,20	0,01	0,0002
	4	0,17	49,10	6,21	0,01	0,0002
	MEDIA	0,18	49,1	6,21	0,01	0,0002
Lavado de 180 minutos	1	0,18	49,00	6,19	0,01	0,0001
	2	0,18	49,10	6,21	0,01	0,0002,
	3	0,17	49,20	6,20	0,01	0,0001
	4	0,18	49,00	6,19	0,01	0,0001
	MEDIA	0,18	49,1	6,20	0,01	0,0001

4.3.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las tablas 49, 50, 51, 52, 53, 54 y 55 se puede observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de olivo con corteza y sin cribar, sin corteza y sin cribar, sin corteza y tamizada a 8 mm y sin corteza, tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tabla 49. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45°C
Sin lavar	4529	3557	2610	2610
Lavado 5 minutos	4353	2860	2476	2064
Lavado 30 minutos	4300	2777	2571	2193
Lavado 60 minutos	4166	2532	2384	2320
Lavado 180 minutos	4117	2692	2501	2143

Tabla 50. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	49	43	40	40
Lavado 5 minutos	42	40	30	26
Lavado 30 minutos	48	42	35	36
Lavado 60 minutos	42	40	42	30
Lavado 180 minutos	38	39	42	40

Tabla 51. Contenido en K (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	2116	2090	1727	1727
Lavado 5 minutos	1762	1582	1654	1552
Lavado 30 minutos	1603	1407	1460	1366
Lavado 60 minutos	1392	1310	1287	1140
Lavado 180 minutos	1163	1229	1083	874

Tabla 52. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	309	336	331	331
Lavado 5 minutos	262	285	213	167
Lavado 30 minutos	309	181	349	149
Lavado 60 minutos	368	322	260	176
Lavado 180 minutos	252	281	218	136

Tabla 53. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	361	336	463	463
Lavado 5 minutos	339	285	313	163
Lavado 30 minutos	378	181	512	164
Lavado 60 minutos	359	322	322	184
Lavado 180 minutos	258	281	265	180

Tabla 54. Contenido en P (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	347	368	424	424
Lavado 5 minutos	349	379	349	262
Lavado 30 minutos	323	395	295	285
Lavado 60 minutos	337	400	265	235
Lavado 180 minutos	313	365	219	227

Tabla 55. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de olivo.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	51	78	12	12
Lavado 5 minutos	41	71	10	18
Lavado 30 minutos	51	39	13	12
Lavado 60 minutos	37	32	12	16
Lavado 180 minutos	31	33	12	28

4.3.5. Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.

A continuación se muestran los resultados del estudio para la determinación de la temperatura de fusión de las cenizas (°C) de biomasa de olivo. Los análisis se han realizado a muestras de olivo descortezado y tamizado a 8 mm con un lavado de 180 minutos en agua desionizada a una temperatura de aproximadamente 25°C.

- T^a de deformación inicial..... 1.357 °C
- T^a de reblandecimiento..... 1.444 °C
- T^a de hemisferio..... >1.500 °C
- T^a de fluidez..... >1.500 °C

4.3.6. Resultados del poder calorífico.

En la tabla 56 se pueden observar los resultados obtenidos de poder calorífico en las muestras de biomasa de olivo. Se ha optado por analizar el material de partida y los tratamientos de más tiempo de lavado.

Tabla 56. Poder calorífico en biomasa de olivo.

Tratamiento	Muestra	PCS, kcal/kg	PCI, kcal/kg
Con corteza, sin cribar y sin lavar	1	4649	4326
	2	4625	4303
	3	4621	4299
	4	4630	4309
	MEDIA	4631	4309
Sin corteza, sin cribar y sin lavar	1	4550	4222
	2	4540	4212
	3	4535	4207
	4	4546	4219
	MEDIA	4543	4215
Cribado a 8 mm y lavado 180 minutos	1	4597	4270
	2	4587	4258
	3	4685	4355
	4	4592	4268
	MEDIA	4615	4288
Cribado a 8 mm y lavado a 45°C durante 180 minutos	1	4670	4347
	2	4672	4348
	3	4669	4344
	4	4675	4353
	MEDIA	4672	4348

4.3.7. Caracterización de los pélets de olivo.

En las tablas 57 y 58 puede ver los resultados de la caracterización de los pélets de olivo con corteza y sin corteza.

Tabla 57. Caracterización de los pélets de olivo con corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Con corteza	1,06	0,22	48,00	6,16	0,02	50,70	-	4637	4315	98
Con corteza	1,07	0,23	47,95	6,15	0,02	50,73	-	4632	4310	98,2
Con corteza	1,05	0,21	48,01	6,15	0,01	50,72	-	4635	4313	98,3
MEDIA	1,06	0,22	47,99	6,15	0,02	50,72	-	4635	4313	98,1

Tabla 58. Caracterización de los pélets de olivo sin corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Sin corteza	0,90	0,20	47,50	6,28	0,01	51,39	-	4550	4222	98,1
Sin corteza	0,87	0,21	47,01	6,26	0,01	51,90	-	4555	4228	97,9
Sin corteza	0,87	0,20	47,30	6,28	0,01	51,62	-	4560	4232	97,6
MEDIA	0,88	0,20	47,27	6,27	0,01	51,64	-	4555	4227	97,8

4.4. Paulownia (*Paulownia tomentosa*).

4.4.1. Resultados del cribado.

En la tabla 59 se puede observar el cribado de la biomasa de paulownia con distintos tamices.

Tabla 59. Resultados del % de cenizas en el cribado de la biomasa de paulownia.

Repetición	Sin cribar	Base	Criba 1 mm	Criba 3,15 mm	Criba 8 mm	Criba 16 mm	Criba >100 mm
1	0,39	1,76	0,51	0,48	0,38	0,38	0,39
2	0,55	3,29	0,55	0,44	0,38	0,32	0,37
3	0,52	3,45	0,57	0,40	0,41	0,40	0,38
4	0,44	2,57	0,59	0,41	0,41	0,40	0,38
MEDIAS	0,47	2,77	0,56	0,43	0,40	0,38	0,38
Dev.	0,07	0,64	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01

A continuación en la tabla 60 se muestran los porcentajes de peso de muestra cribada en los distintos tamices en función de toda la biomasa cribada.

Tabla 60. Resultados del % de peso de biomasa cribada en los distintos tamices.

Cribas	Biomasa cribada
Base	11%
Criba 1 mm	28%
Criba 3,15 mm	42%
Criba 8 mm	15%
Criba 16 mm	3%
Criba >100 mm	1%

4.4.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 61 se puede observar los resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de paulownia en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 61. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de paulownia.

Materia prima	Repetición	sin Lavar	5 minutos	30 minutos	60 minutos	180 minutos
Paulownia con corteza y sin cribar	1	1,36	0,50	0,84	0,80	0,74
	1	1,40	0,60	0,80	0,91	0,72
	1	1,32	0,74	0,77	0,90	0,69
	1	1,30	0,59	0,87	0,83	0,62
	Media	1,35	0,61	0,82	0,86	0,69
	Desv.	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05
Paulownia sin corteza y sin cribar	2	0,39	0,40	0,39	0,42	0,31
	2	0,55	0,44	0,38	0,38	0,36
	2	0,52	0,46	0,43	0,37	0,35
	2	0,44	0,42	0,37	0,39	0,4
	Media	0,48	0,43	0,39	0,39	0,36
	Desv.	0,07	0,02	0,01	0,02	0,04
Cribado a 3,15 mm y lavado a T ambiente	3	0,48	0,40	0,44	0,43	0,44
	3	0,44	0,43	0,39	0,40	0,41
	3	0,40	0,47	0,41	0,41	0,41
	3	0,41	0,43	0,41	0,42	0,43
	Media	0,43	0,43	0,41	0,42	0,42
	Desv.	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
Cribado a 8 mm y lavado a T ambiente	4	0,38	0,38	0,36	0,40	0,34
	4	0,38	0,37	0,36	0,40	0,36
	4	0,41	0,38	0,40	0,38	0,37
	4	0,41	0,38	0,34	0,41	0,42
	Media	0,40	0,38	0,37	0,40	0,37
	Desv.	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03
Cribado a 8 mm y lavado a T 45°C	4	0,38	0,32	0,30	0,27	0,23
	4	0,38	0,34	0,29	0,29	0,25
	4	0,41	0,35	0,29	0,28	0,25
	4	0,41	0,31	0,39	0,30	0,25
	Media	0,40	0,33	0,32	0,29	0,25
	Desv.	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01

4.4.3. Resultados del análisis elemental.

En las tablas 62, 63, 64 y 65 se muestran los resultados del análisis elemental y el contenido en Cl realizado a la biomasa de paulownia.

Tabla 62. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia con corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,25	49,0	6,27	0,03	0,0001
	2	0,26	49,1	6,27	0,02	0,0001
	3	0,25	49,0	6,27	0,02	0,0002
	4	0,26	49,0	6,26	0,03	0,0001
	MEDIA	0,26	49,0	6,27	0,03	0,0001
Lavado de 5 minutos	1	0,21	49,0	6,23	0,01	0,0001
	2	0,22	49,0	6,23	0,01	0,0001
	3	0,21	49,1	6,22	0,01	0,0001
	4	0,22	48,9	6,22	0,01	0,0002
	MEDIA	0,22	49,0	6,23	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,21	49,0	6,21	0,01	0,0001
	2	0,21	49,0	6,21	0,01	0,0001
	3	0,22	48,9	6,22	0,01	0,0001
	4	0,21	48,9	6,22	0,01	0,0001
	MEDIA	0,21	49,0	6,22	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,21	49,1	6,25	0,01	0,0001
	2	0,20	49,0	6,25	0,01	0,0001
	3	0,20	49,0	6,26	0,01	0,0001
	4	0,21	49,0	6,25	0,01	0,0001
	MEDIA	0,21	49,0	6,25	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,23	49,5	6,31	0,01	0,0001
	2	0,22	49,6	6,31	0,01	0,0001
	3	0,23	49,5	6,31	0,01	0,0001
	4	0,23	49,6	6,30	0,01	0,0001
	MEDIA	0,23	49,6	6,31	0,01	0,0001

Tabla 63. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza sin cribar.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,07	49,2	6,24	0,01	0,0001
	2	0,08	49,1	6,25	0,01	0,0001
	3	0,09	49,1	6,24	0,01	0,0001
	4	0,08	49,1	6,25	0,01	0,0001
	MEDIA	0,08	49,1	6,25	0,01	0,0001
Lavado de 5 minutos	1	0,11	48,4	6,11	0,01	0,0001
	2	0,11	48,5	6,11	0,01	0,0001
	3	0,12	48,4	6,12	0,01	0,0001
	4	0,11	48,5	6,11	0,01	0,0001
	MEDIA	0,11	48,5	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,11	48,2	6,13	0,01	0,0001
	2	0,11	48,1	6,12	0,01	0,0002
	3	0,12	48,2	6,13	0,01	0,0003
	4	0,10	48,2	6,12	0,01	0,0001
	MEDIA	0,11	48,2	6,13	0,01	0,0002
Lavado de 60 minutos	1	0,10	48,2	6,04	0,01	0,0001
	2	0,10	48,2	6,04	0,01	0,0002
	3	0,10	48,1	6,05	0,01	0,0001
	4	0,09	48,1	6,05	0,01	0,0001
	MEDIA	0,10	48,2	6,05	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,12	48,4	6,14	0,01	0,0001
	2	0,12	48,4	6,15	0,01	0,0001
	3	0,11	48,5	6,15	0,01	0,0002
	4	0,11	48,4	6,14	0,01	0,0002
	MEDIA	0,11	48,4	6,15	0,01	0,0002

Tabla 64. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza y cribada a 8 mm.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,06	47,9	6,18	0,01	0,0001
	2	0,06	48,0	6,19	0,01	0,0002
	3	0,05	48,0	6,18	0,01	0,0001
	4	0,06	47,9	6,18	0,01	0,0001
	MEDIA	0,06	48,0	6,18	0,01	0,0001
Lavado de 5 minutos	1	0,06	48,1	6,16	0,01	0,0001
	2	0,06	48,0	6,14	0,01	0,0001
	3	0,05	48,0	6,16	0,01	0,0001
	4	0,06	48,0	6,14	0,01	0,0001
	MEDIA	0,06	48,0	6,15	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,06	47,7	6,19	0,01	0,0002
	2	0,05	47,7	6,20	0,01	0,0001
	3	0,06	47,8	6,19	0,01	0,0001
	4	0,06	47,7	6,19	0,01	0,0001
	MEDIA	0,06	47,7	6,19	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,07	47,3	6,25	0,01	0,0001
	2	0,07	47,3	6,25	0,01	0,0001
	3	0,06	47,4	6,26	0,01	0,0001
	4	0,07	47,3	6,25	0,01	0,0001
	MEDIA	0,07	47,3	6,25	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,05	46,9	6,30	0,01	0,0001
	2	0,06	47,0	6,30	0,01	0,0001
	3	0,06	47,0	6,31	0,01	0,0001
	4	0,06	46,9	6,30	0,01	0,0001
	MEDIA	0,06	47,0	6,30	0,01	0,0001

Tabla 65. Resultados del análisis elemental y contenido en cloro de la biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tratamiento de lavado	Muestra	N, %	C, %	H, %	S, %	Cl, %
Sin Lavar	1	0,06	47,9	6,18	0,01	0,0001
	2	0,06	48,0	6,19	0,01	0,0002
	3	0,05	48,0	6,18	0,01	0,0001
	4	0,06	47,9	6,18	0,01	0,0001
	MEDIA	0,06	48,0	6,18	0,01	0,0001
Lavado de 5 minutos	1	0,11	47,6	6,11	0,01	0,0001
	2	0,11	47,7	6,10	0,01	0,0001
	3	0,12	47,6	6,10	0,01	0,0001
	4	0,11	47,6	6,11	0,01	0,0001
	MEDIA	0,11	47,6	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 30 minutos	1	0,10	48,0	6,13	0,01	0,0002
	2	0,10	48,0	6,13	0,01	0,0001
	3	0,11	48,1	6,14	0,01	0,0001
	4	0,11	48,1	6,13	0,01	0,0001
	MEDIA	0,10	48,1	6,13	0,01	0,0001
Lavado de 60 minutos	1	0,14	48,7	6,30	0,01	0,0002
	2	0,14	48,7	6,30	0,01	0,0001
	3	0,14	48,7	6,31	0,01	0,0001
	4	0,15	48,6	6,31	0,01	0,0001
	MEDIA	0,14	48,7	6,31	0,01	0,0001
Lavado de 180 minutos	1	0,11	48,5	6,20	0,01	0,0001
	2	0,11	48,5	6,22	0,01	0,0001
	3	0,10	48,4	6,21	0,01	0,0001
	4	0,11	48,5	6,21	0,01	0,0002
	MEDIA	0,11	48,5	6,21	0,01	0,0001

4.4.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las tablas 66, 67, 68, 69, 70, 71 y 72 se puede observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de paulownia con corteza y sin cribar, sin corteza y sin cribar, sin corteza y tamizada a 8 mm y sin corteza, tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Tabla 66. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	1988	1438	580	580
Lavado 5 minutos	937	763	590	652
Lavado 30 minutos	1636	986	582	644
Lavado 60 minutos	1836	879	652	672
Lavado 180 minutos	1940	933	633	721

Tabla 67. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	108	104	34	34
Lavado 5 minutos	58	64	41	44
Lavado 30 minutos	130	70	41	41
Lavado 60 minutos	161	55	63	43
Lavado 180 minutos	93	64	45	45

Tabla 68. Contenido en K (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	2998	2277	1263	1263
Lavado 5 minutos	1546	1322	1144	1106
Lavado 30 minutos	2072	1149	1026	931
Lavado 60 minutos	1932	925	972	905
Lavado 180 minutos	1734	804	1302	819

Tabla 69. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	790	344	90	90
Lavado 5 minutos	337	227	60	69
Lavado 30 minutos	572	295	57	86
Lavado 60 minutos	610	218	81	91
Lavado 180 minutos	686	283	89	97

Tabla 70. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	595	402	90	90
Lavado 5 minutos	111	262	31	54
Lavado 30 minutos	168	333	43	81
Lavado 60 minutos	347	77	65	77
Lavado 180 minutos	304	185	99	66

Tabla 71. Contenido en P (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	4496	689	75	75
Lavado 5 minutos	1417	304	43	45
Lavado 30 minutos	1221	150	45	40
Lavado 60 minutos	2037	393	41	39
Lavado 180 minutos	1953	511	49	35

Tabla 72. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de paulownia.

Tratamientos de lavado	Con corteza y sin cribar	Sin corteza y sin cribar	Tamizado tamiz 8 mm	Tamizado tamiz 8 mm lavado a 45° C
Sin lavar	70	57	30	30
Lavado 5 minutos	64	39	18	12
Lavado 30 minutos	63	41	24	14
Lavado 60 minutos	59	37	24	16
Lavado 180 minutos	51	39	20	17

4.4.5. Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.

A continuación se muestran los resultados del estudio para la determinación de la temperatura de fusión de las cenizas (°C) de biomasa de paulownia. Los análisis se han realizado a muestras de paulownia descortezada y tamizada a 8 mm con un lavado de 5 y 180 minutos en agua desionizada a una temperatura de aproximadamente 25°C.

Para la paulownia lavada durante 5 minutos:

- T de deformación inicial..... 1.189 °C
- T de reblandecimiento..... 1.229 °C
- T de hemisferio..... 1.269 °C
- T de fluidez..... 1.370 °C

Para la paulownia lavada durante 180 minutos:

- T de deformación inicial..... 1.245 °C
- T de reblandecimiento..... 1.450 °C
- T de hemisferio..... 1.477 °C
- T de fluidez..... 1.495 °C

4.4.6. Resultados del poder calorífico.

En la tabla 73 se pueden observar los resultados obtenidos de poder calorífico en las muestras de biomasa de paulownia. Se ha optado por analizar el material de partida y los tratamientos de más tiempo de lavado.

Tabla 73. Poder calorífico en biomasa de paulownia.

Tratamiento	Muestra	PCS, kcal/kg	PCI, kcal/kg
Con corteza, sin cribar y sin lavar	1	4705	4378
	2	4679	4351
	3	4673	4346
	4	4700	4374
	MEDIA	4689	4362
Sin corteza, sin cribar y sin lavar	1	4680	4352
	2	4718	4391
	3	4682	4356
	4	4700	4373
	MEDIA	4695	4368
Cribado a 8 mm y lavado 180 minutos	1	4685	4360
	2	4690	4359
	3	4688	4355
	4	4675	4346
	MEDIA	4685	4355
Cribado a 8 mm y lavado a 45° C durante 180 minutos	1	4695	4371
	2	4692	4367
	3	4689	4364
	4	4650	4326
	MEDIA	4682	4357

4.4.7. Caracterización de los pélets de paulownia.

En las tablas 74, 75, 76 y 77 se pueden ver los resultados de la caracterización de los pélets de paulownia con corteza, sin corteza y mezcla de paulownia + ciruelo y paulownia + olivo.

Tabla 74. Caracterización de los pélets de paulownia con corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Con corteza	1,02	0,22	49,10	6,28	0,02	49,64	-	4624	4296	98
Con corteza	0,99	0,25	49,00	6,27	0,03	49,73	-	4616	4289	98,2
Con corteza	1,03	0,23	48,90	6,26	0,02	49,82	-	4630	4303	98,1
MEDIA	1,01	0,23	49,00	6,27	0,02	49,73	-	4623	4296	98,1

Tabla 75. Caracterización de los pélets de paulownia sin corteza.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Sin corteza	0,40	0,07	48,90	6,24	0,01	50,62	-	4698	4372	90,6
Sin corteza	0,41	0,08	48,80	6,24	0,01	50,70	-	4658	4332	90,4
Sin corteza	0,43	0,07	49,10	6,25	0,01	50,39	-	4695	4368	91,1
MEDIA	0,41	0,07	48,93	6,24	0,01	50,57	-	4684	4357	90,7

Tabla 76. Caracterización de los pélets de mezcla de paulownia + ciruelo.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Ciruelo +Paulownia	0,60	0,10	48,40	5,94	0,01	50,89	-	4667	4356	96,1
Ciruelo +Paulownia	0,56	0,11	48,90	5,99	0,01	50,42	-	4695	4382	96,4
Ciruelo +Paulownia	0,58	0,10	48,66	6,01	0,01	50,65	-	4639	4325	96,2
MEDIA	0,58	0,10	48,65	5,98	0,01	50,65	-	4667	4354	96,2

Tabla 77. Caracterización de los pélets de mezcla de paulownia + olivo.

Muestra	Cenizas %	N %	C %	H %	S %	O %	Cl %	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Durabilidad %
Olivo +Paulownia	0,69	0,22	47,95	6,20	0,01	51,39	-	4601	4277	96,9
Olivo +Paulownia	0,70	0,21	47,90	6,21	0,01	51,90	-	4599	4274	97,0
Olivo +Paulownia	0,70	0,21	47,98	6,21	0,01	51,62	-	4605	4280	97,1
MEDIA	0,70	0,21	47,94	6,21	0,01	51,64	-	4602	4277	97,0

4.5. Ensayos de combustión en calderas.

A continuación en las tablas 78-87 se pueden ver los resultados de las medidas realizadas en las calderas de biomasa a los distintos pélets estudiados en esta tesis. En la tabla 78 se puede observar que no hay datos de medición de gases en la caldera Ökofen, esto es debido a que al ser una caldera de última generación y necesitar pélets de máxima calidad se ha optado por no usar los pélets de cardo al tener un % muy elevado de cenizas y así evitar posibles averías. Por otro lado, para los pélets de ciruelo descortezado (tabla 80)

tampoco ha sido posible realizar las medidas de gases de combustión en la caldera Lasian porque se carecía de suficiente cantidad de pélets.

Tabla 78. Datos de medida de gases de combustión de pélets “A1” comerciales.

PÉLETS DE BIOMASA "A1" COMERCIALES										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1^a	2^a	3^a	4^a	Media	1^a	2^a	3^a	4^a	Media
T de humos (°C)	156,80	176,50	179,40	183,80	174,13	33,60	33,40	34,30	35,20	34,13
T ambiente (°C)	14,90	15,00	15,80	16,50	15,55	14,10	14,50	15,40	15,02	14,76
% O₂	14,38	14,67	14,97	14,75	14,69	15,79	15,56	15,35	15,36	15,52
CO (ppm)	535,00	483,00	445,00	442,00	476,25	34,00	30,00	32,50	33,00	32,38
% CO₂	6,49	6,21	5,92	6,13	6,19	5,13	5,52	5,25	5,35	5,31
Landa	3,13	3,27	3,43	3,31	3,29	3,98	3,71	3,65	3,69	3,76
NO (ppm)	57,00	52,00	52,00	57,00	54,50	33,00	36,00	32,00	33,50	33,63
Rendimiento de la caldera	83,70	80,70	79,80	79,80	81,00	99,70	100,60	100,20	99,90	100,10

Tabla 79. Datos de medida de gases de combustión de pélets cardo.

PÉLETS DE BIOMASA DE CARDO										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1^a	2^a	3^a	4^a	Media	1^a	2^a	3^a	4^a	Media
T de humos (°C)	101,00	105,20	106,20	106,10	104,63	-	-	-	-	-
T ambiente (°C)	15,10	16,20	16,30	16,35	15,99	-	-	-	-	-
% O₂	17,45	18,31	18,20	18,10	18,02	-	-	-	-	-
CO (ppm)	2995,00	2704,00	2850,00	2801,00	2837,50	-	-	-	-	-
% CO₂	3,32	3,50	3,65	3,60	3,52	-	-	-	-	-
Landa	5,60	7,33	7,00	7,10	6,76	-	-	-	-	-
NO (ppm)	74,00	42,00	55,00	50,00	55,25	-	-	-	-	-
Rendimiento de la caldera	77,40	70,50	72,10	71,60	72,90	-	-	-	-	-

Tabla 80. Datos de medida de gases de combustión de pélets de ciruelo con corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE CIRUELO CON CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	Media	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	Media
T de humos (°C)	147,40	148,90	147,20	146,30	147,45	35,00	35,20	36,40	36,70	35,83
T ambiente (°C)	20,10	20,00	20,20	21,10	20,35	15,90	16,80	19,30	19,50	17,88
% O ₂	14,59	16,23	16,30	16,10	15,81	15,51	15,57	15,67	15,65	15,60
CO (ppm)	640,00	851,00	754,00	850,00	773,75	105,00	122,00	124,00	110,00	115,25
% CO ₂	6,28	4,65	4,59	4,50	5,01	5,41	5,35	5,25	5,30	5,33
Landa	3,23	4,31	4,38	4,33	4,06	3,78	3,82	3,89	3,85	3,84
NO (ppm)	110,00	65,00	72,00	70,00	79,25	66,00	69,00	59,00	63,00	64,25
Rendimiento de la caldera	84,70	80,20	79,50	80,10	81,13	99,00	99,20	98,40	98,90	98,88

Tabla 81. Datos de medida de gases de combustión de pélets de ciruelo sin corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE CIRUELO SIN CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	Media	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	Media
T de humos (°C)	-	-	-	-	-	36,30	37,40	37,10	38,20	37,25
T ambiente (°C)	-	-	-	-	-	19,80	16,50	17,40	17,90	17,90
% O ₂	-	-	-	-	-	14,98	14,55	14,53	14,32	14,60
CO (ppm)	-	-	-	-	-	266,00	339,00	411,00	491,00	376,75
% CO ₂	-	-	-	-	-	5,72	6,34	6,55	6,56	6,29
Landa	-	-	-	-	-	3,44	3,21	3,40	3,10	3,29
NO (ppm)	-	-	-	-	-	38,00	57,00	72,00	66,00	58,25
Rendimiento de la caldera	-	-	-	-	-	99,50	99,00	99,50	98,70	99,18

Tabla 82. Datos de medida de gases de combustión de pélets de olivo con corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE OLIVO CON CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1ª	2ª	3ª	4ª	Media	1ª	2ª	3ª	4ª	Media
T de humos (°C)	139,90	157,40	154,00	149,60	150,23	31,70	36,70	35,00	34,70	34,53
T ambiente (°C)	20,80	20,50	20,60	20,50	20,60	19,90	19,10	20,00	20,10	19,78
% O ₂	15,65	15,30	16,13	16,37	15,86	17,18	15,21	16,05	16,50	16,24
CO (ppm)	667,00	660,00	615,00	860,00	700,50	58,00	189,00	97,00	124,00	117,00
% CO ₂	5,23	5,58	4,76	4,16	4,93	3,76	5,62	4,87	4,43	4,67
Landa	2,86	3,62	4,23	4,81	3,88	5,42	3,63	4,19	4,60	4,46
NO (ppm)	91,00	103,00	88,00	71,00	88,25	44,00	63,00	59,00	52,00	54,50
Rendimiento de la caldera	83,00	82,20	80,10	77,10	80,60	99,20	98,70	98,80	98,00	98,68

Tabla 83. Datos de medida de gases de combustión de pélets de olivo sin corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE OLIVO SIN CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1ª	2ª	3ª	4ª	Media	1ª	2ª	3ª	4ª	Media
T de humos (°C)	132,70	143,00	163,10	160,90	149,93	45,20	41,20	45,70	42,30	43,60
T ambiente (°C)	19,60	20,20	20,70	20,70	20,30	20,00	20,60	20,60	20,20	20,35
% O ₂	15,31	14,77	15,84	15,88	15,45	14,52	15,27	14,54	14,68	14,75
CO (ppm)	930,00	585,00	713,00	742,00	742,50	144,00	150,00	155,00	170,00	154,75
% CO ₂	5,55	6,40	5,04	5,00	5,50	6,38	4,26	6,28	6,25	5,79
Landa	3,62	3,17	4,00	4,02	3,70	3,20	3,26	3,24	3,30	3,25
NO (ppm)	79,00	91,00	73,00	74,00	79,25	61,00	60,00	59,00	62,00	60,50
Rendimiento de la caldera	84,50	85,60	80,20	80,10	82,60	97,00	98,20	96,90	96,90	97,25

Tabla 84. Datos de medida de gases de combustión de pélets de paulownia con corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE PAULOWNIA CON CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1ª	2ª	3ª	4ª	Media	1ª	2ª	3ª	4ª	Media
T de humos (°C)	148,10	160,80	140,30	140,60	147,45	31,60	35,70	39,60	38,90	36,45
T ambiente (°C)	15,00	16,00	17,10	17,70	16,45	14,80	16,20	16,80	17,70	16,38
% O₂	15,55	14,54	15,42	15,59	15,28	15,56	14,91	14,18	14,21	14,72
CO (ppm)	1193,00	996,00	778,00	733,00	925,00	20,00	174,00	161,00	159,00	128,50
% CO₂	5,30	6,31	5,45	5,29	5,59	4,38	5,99	6,71	6,60	5,92
Landa	3,77	3,19	3,70	3,81	3,62	4,67	3,41	3,04	3,09	3,55
NO (ppm)	95,00	110,00	94,00	92,00	97,75	37,00	51,00	54,00	54,00	49,00
Rendimiento de la caldera	80,90	82,50	83,00	82,60	82,25	100,00	99,70	98,00	98,60	99,08

Tabla 85. Datos de medida de gases de combustión de pélets de paulownia sin corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE PAULOWNIA SIN CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1ª	2ª	3ª	4ª	Media	1ª	2ª	3ª	4ª	Media
T de humos (°C)	172,60	161,00	168,80	165,30	166,93	35,40	35,50	35,20	40,20	36,58
T ambiente (°C)	17,50	18,70	18,30	18,20	18,18	17,40	18,50	18,60	18,50	18,25
% O₂	14,94	12,81	16,21	15,40	14,84	15,01	14,97	15,22	14,87	15,02
CO (ppm)	580,00	300,00	429,00	500,00	452,25	67,00	45,00	25,00	30,00	41,75
% CO₂	5,94	8,06	4,70	4,95	5,91	5,90	5,94	5,70	6,15	5,92
Landa	3,41	2,54	4,31	3,43	3,42	3,47	3,44	3,59	3,33	3,46
NO (ppm)	66,00	90,00	49,00	62,00	66,75	42,00	43,00	41,00	44,00	42,50
Rendimiento de la caldera	80,60	86,80	76,80	80,20	81,10	100,10	100,20	100,10	99,00	99,85

Tabla 86. Datos de medida de gases de combustión de pélets de mezcla paulownia + ciruelo sin corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE MEZCLA PAULOWNIA + CIRUELO SIN CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1^a	2^a	3^a	4^a	Media	1^a	2^a	3^a	4^a	Media
T de humos (°C)	165,60	160,80	170,30	165,10	165,45	37,20	36,80	37,00	37,10	37,03
T ambiente (°C)	18,50	19,80	19,60	19,90	19,45	18,,2	18,60	18,90	19,00	18,83
% O₂	14,62	15,45	14,44	15,66	15,04	15,40	16,10	15,80	15,85	15,79
CO (ppm)	402,00	532,00	448,00	445,00	456,75	125,00	130,00	150,00	145,00	137,50
% CO₂	6,25	5,44	6,44	5,24	5,84	5,32	5,41	5,22	5,35	5,33
Landa	3,25	3,72	3,16	3,87	3,50	3,82	3,85	3,92	3,89	3,87
NO (ppm)	75,00	60,00	71,00	56,00	65,50	58,00	55,00	63,00	60,00	59,00
Rendimiento de la caldera	82,60	80,40	82,60	79,70	81,33	99,60	99,90	100,00	99,80	99,83

Tabla 87. Datos de medida de gases de combustión de pélets de mezcla paulownia + olivo sin corteza.

PÉLETS DE BIOMASA DE MEZCLA PAULOWNIA + OLIVO SIN CORTEZA										
Parámetros de medida	Caldera Lasian					Caldera Ökofen				
	1^a	2^a	3^a	4^a	Media	1^a	2^a	3^a	4^a	Media
T de humos (°C)	154,10	157,30	164,30	164,00	159,93	36,50	34,80	36,80	37,10	36,30
T ambiente (°C)	16,20	16,50	172,00	17,60	55,58	17,90	15,30	18,40	19,00	17,65
% O₂	14,24	14,55	15,00	15,48	14,82	14,89	15,60	15,90	15,85	15,56
CO (ppm)	741,00	846,00	918,00	1016,00	880,25	146,00	105,00	120,00	145,00	129,00
% CO₂	6,62	6,21	5,86	5,38	6,02	6,01	5,10	5,60	5,35	5,52
Landa	3,06	3,21	3,44	3,73	3,36	3,40	3,80	3,90	3,89	3,75
NO (ppm)	83,00	74,00	74,00	67,00	74,50	51,00	48,00	52,00	60,00	52,75
Rendimiento de la caldera	84,20	81,10	81,10	79,50	81,48	99,50	99,50	99,80	99,80	99,65

4.6. Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos.

Se estudia el coste de producción y el precio de pélets procedente de biomasa de paulownia descortezada y poda de olivar descortezada, y su comparación con el coste actual y precio de los pélets de madera. Se ha elegido la biomasa mencionada anteriormente porque su mezcla analizada en esta tesis cumple con las condiciones de un pélet A1, excepto en la durabilidad.

El coste de los agri-pélets se estima que es de 92-95 € t⁻¹ para grandes plantas, el cual es comparable con el coste de pélets de madera producidos en pequeñas plantas locales de pélets (99-109 € t⁻¹) [119].

La actividad económica generada por la producción de pélets en zonas rurales puede ser importante.

Un esquema de la cadena de suministro local de una planta pequeña de agri-pélets y astillas se muestra en la figura 33.

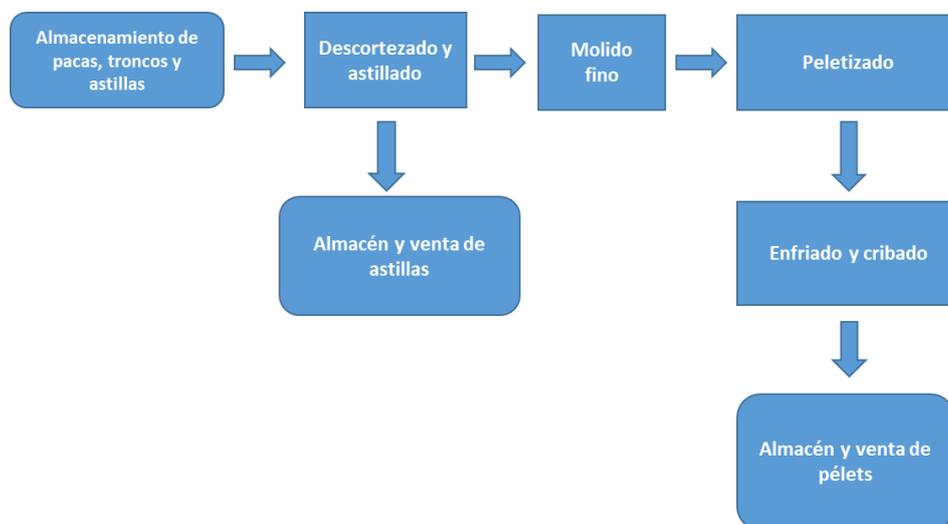


Figura 33. Esquema de una planta de producción de biocombustibles sólidos.

El coste de la biomasa residual puesta en la planta de pélets y astillas es de 31-49 € t⁻¹ [119]. El coste de la biomasa de cynara y paulownia puesta en planta es de 50 € t⁻¹ y 100

€ t⁻¹ respectivamente (Tablas 88 y 89). Los costes de producción de los agri-pélets varían entre 92-95 € t⁻¹ para la biomasa residual y la procedente del cultivo de cynara, y de 150 € t⁻¹ para la de paulownia. El coste de la biomasa es la principal contribución al coste de producción.

Tabla 88. Costes de cultivo de *Cynara cardunculus* L.

Labores del cultivo	Coste/ha (euros)
Año 0	
Preparación del terreno (2 pases de chisel o vertedera)	150
Abono de fondo (400 kg 8-15-15 a 0,38 € kg ⁻¹)	152
Reparto de abono e incorporación con grada	50
Tratamiento herbicida	40
Semilla (3 kg ha ⁻¹ a 20 € kg ⁻¹)	60
Siembra	45
Tratamiento Insecticida	40
Segadora y empacado (a partir del segundo año)	0
SUBTOTAL	532
Gastos generales y valor del terreno	100
TOTAL DE GASTOS	632
Años 1 al 10	
Vida útil de la plantación de 10 años. Amortización	64
Abono de fondo (250 kg 8-15-15 a 0,40 € kg ⁻¹)	100
Reparto de abono e incorporación con grada	50
Tratamiento Insecticida	40
Segadora y empacado (35 € ha ⁻¹ + 154 € ha ⁻¹)	100
Producción estimada (10 t año ⁻¹)	
SUBTOTAL	354
Gastos generales y valor del terreno	100
TOTAL DE GASTOS ANUALES	454
TOTAL DE GASTOS TONELADA	46

Los costes de producción de los agri-pélets estudiados son comparables con los costes de producción de los pélets de madera en pequeñas plantas, excepto para los pélets de paulownia.

Tabla 89. Costes de cultivo de paulownia.

Labores del cultivo	Coste/ha (euros)
Año 0	
Subsolado	140
Alzado	70
Abono de fondo (700 kg 8-15-15 a 0,3 € kg ⁻¹)	210
Reparto de abono e incorporación con grada	30
Aporcado	30
Plantación (1666 plantas ha ⁻¹ a 1 € planta ⁻¹)	1666
Tratamiento herbicida	40
Material de riego por goteo	2200
Destoconado	400
SUBTOTAL	4786
Años 1 al 16	
Vida útil de la plantación de 16 años. Amortización	300
Gastos de mantenimiento (riego, abonado, insecticidas, etc)	425
Arrendamiento del terreno anual	400
Transporte y recolección, anual	300
Turno de corte cada 3 años	
Gastos considerados para 100 ha de cultivo	
Producción estimada (17 t año ⁻¹ al 12 % de humedad)	
TOTAL DE GASTOS ANUALES	1425
TOTAL DE GASTOS TONELADA	100

El precio de venta de los pélets A1 en el mercado en 2021 a salida de planta son de 250 € t⁻¹ a granel y de 270 € t⁻¹ en sacos de 15 kg (precios obtenidos de una oferta presentada a un concurso de suministro de biomasa para calefacción y ACS). Se dispone de un margen de 150 € t⁻¹ para la biomasa de poda y cynara, y de 100 € t⁻¹ en el caso de la biomasa de paulownia para beneficio de la planta de pélets y agricultores. Para una producción de pélets A1 de 50% de poda de olivo + 50% de paulownia ambos descortezados el margen de beneficio sería de 125 € t⁻¹. La aplicación de estos pélets a nivel local en zonas rurales podría ser viable en pequeñas plantas.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1. Discusión de resultados 1: Cardo (*Cynara cardunculus* L.).

5.1.1. Resultados del cribado.

En la figura 34 podemos observar como con el cribado de la de la biomasa se consigue un descenso constante del contenido en cenizas, este hecho fue descrito por Nakashimaa *et al.* (2017)[83] el cual decía que la separación por tamaño de partícula puede ser un método eficiente y adecuado para la reducción del contenido en cenizas, ya que permite el proceso de separación de los tamaños de partículas más pequeños que contiene la mayor parte de los minerales. Es importante destacar la reducción en el % de cenizas que se produce en el cribado de la biomasa de la criba de 8 mm a la de 16 mm, llegando a ser éste de más de un 4%. Por otro lado se ve un ligero cambio en la tendencia de reducción del % de cenizas al pasar de unas cribas a otras, con un aumento aproximadamente del 2% entre la criba de 16 mm a la de 100 mm. El efecto de obtener mayor porcentaje de cenizas en las fracciones más finas del cribado fue recogido por Peng Y. (2018) [119] en su tesis doctoral, en ella la fracción más fina de paja de colza molida, rastrojo de maíz y paja de trigo después del fraccionamiento mecánico tuvo el mayor contenido en cenizas, $15,4\pm 0,94\%$, $22,4\pm 1,10\%$ y $9,60\pm 0,25\%$ m.s., respectivamente.

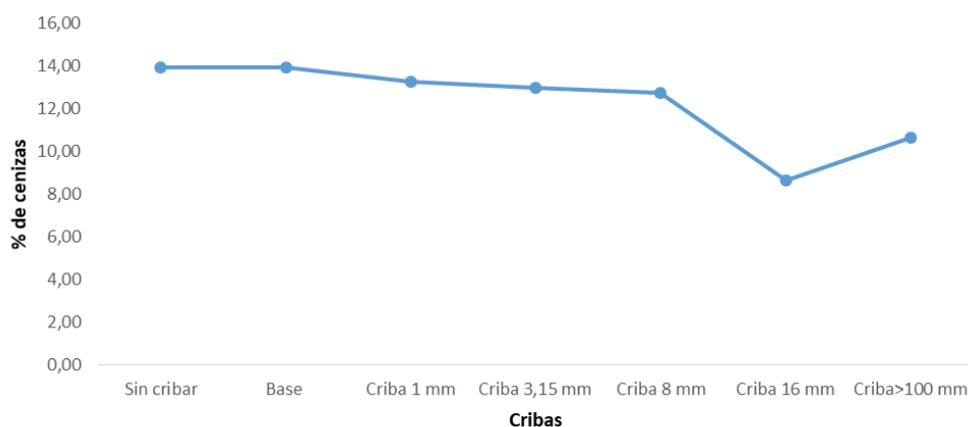


Figura 34. Resultados del % de cenizas en biomasa de cardo cribada.

A continuación en la figura 35 se muestran los porcentajes de muestra cribada en las distintas cribas en función de toda la biomasa total cribada.

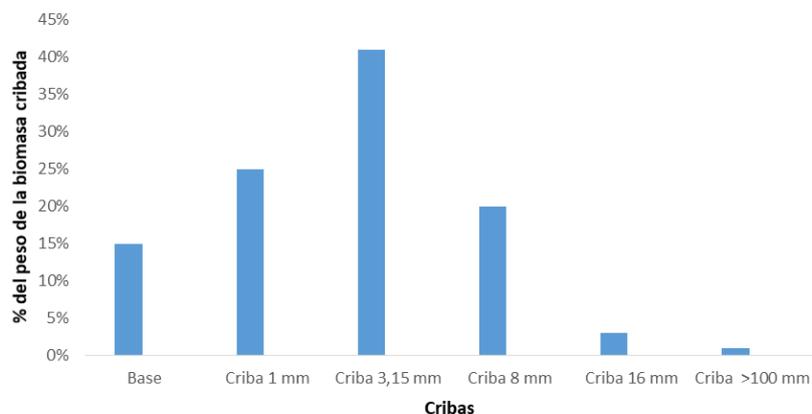


Figura 35. Resultado en % del peso de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).

En la figura 35 se puede ver como el mayor % de biomasa cribada (41%) se encuentra en la criba de 3,15 mm, seguido con poca diferencia por la de 1 mm (25%) y 8 mm (20%).

5.1.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 90 se observan los resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de cardo en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 90. Resultado del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de cardo.

Criba	Sin lavar	Lavado 5 minutos	Lavado 30 minutos	Lavado 60 minutos	Lavado 180 minutos
Sin cribar	13,93±0,03	10,34±0,20	8,44±0,37	7,67±0,37	7,63±0,37
3,15 mm	12,98±0,09	11,28±0,34	8,17±0,32	7,74±0,24	6,83±0,08
8 mm	12,72±0,06	9,77±0,17	7,19±0,13	6,92±0,24	6,01±0,12
8 mm y lavado a 45°C	12,72±0,06	7,93±0,17	6,54±0,21	6,56±0,14	6,39±0,14

El proceso de lavado de la biomasa de cardo muestra un claro efecto en la reducción del contenido en ceniza de la misma (figura 36), dicha reducción está en torno a un 50 % tanto para el material sin cribar como para el cribado a 3,15 y 8 mm. Es importante destacar que los tratamientos iniciales de lavado (5 y 30 minutos) son los más efectivos para disminuir el contenido en cenizas, ya que es cuando se consigue un mayor descenso en el % de cenizas. Autores como Hensgen y Wachendorf (2018) [82] vieron que la tasa de reducción de las concentraciones de cenizas en la biomasa de los pastizales fue del 37,5%, mientras que Yu *et al* (2014) [120] para el miscanthus se redujo en un 39%.

El porcentaje de cenizas inicial (13,93%) es mayor que el obtenido por otros autores [91] que obtuvieron valores de un 7%, esto puede ser debido al estado fenológico del momento de la cosecha de la planta o a factores externos del proceso de recogida de la biomasa que pueden implicar un aumento en el contenido en cenizas [54,56].

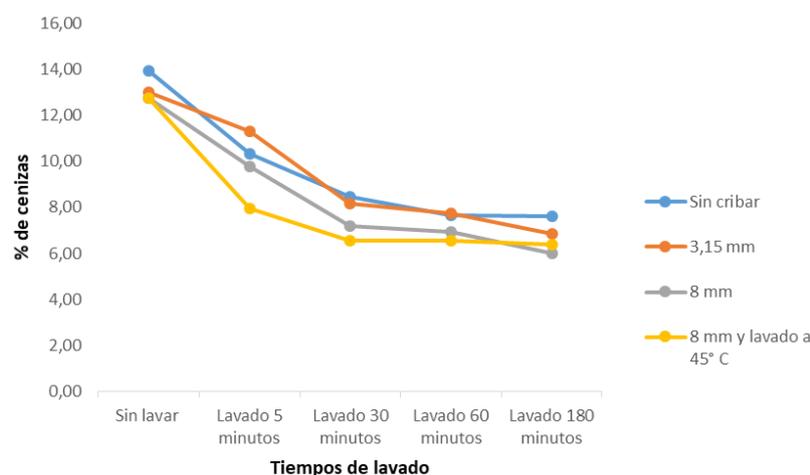


Figura 36. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.

En la figura 37 se puede observar como en función del tratamiento de lavado que vayamos a dar, cual es la mejor forma de preparar la biomasa para el mismo. Para ello, se ha realizado un estudio estadístico donde las letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK). Para el resto de las figuras el estudio se incluye en el pie de la figura.

En el caso de que no vayamos a realizar un lavado de la biomasa sería interesante utilizar la biomasa cribada a 8 mm puesto que existen diferencias significativas respecto al material sin cribar o cribado a 3,15 mm.

Para un lavado de 5 minutos, existen diferencias significativas entre todos los formatos de biomasa utilizados, siendo el cribado de 8 mm con la temperatura de lavado a 45°C el más efectivo (7,93%) para la reducción del % de cenizas. Si se opta por un lavado de 30 o 60 minutos el menor % de cenizas se obtiene en la biomasa cribada a 8 mm y lavada a 45°C con un 6,54 y 6,56 % respectivamente, pero sería más interesante optar por la biomasa cribada a 8 mm y lavada a temperatura ambiente debido a que no hay diferencias significativas con el anterior tratamiento y no gastaríamos energía en calentar el agua.

Por último si se va a realizar un lavado de 180 minutos, la mejor opción sería utilizar la biomasa de cardo cribada a 8 mm que a pesar de no presentar diferencias significativas con la cribada a 3,15 mm y la de 8 mm a 45° C es con la que se consigue un % de cenizas menor (6,01%).

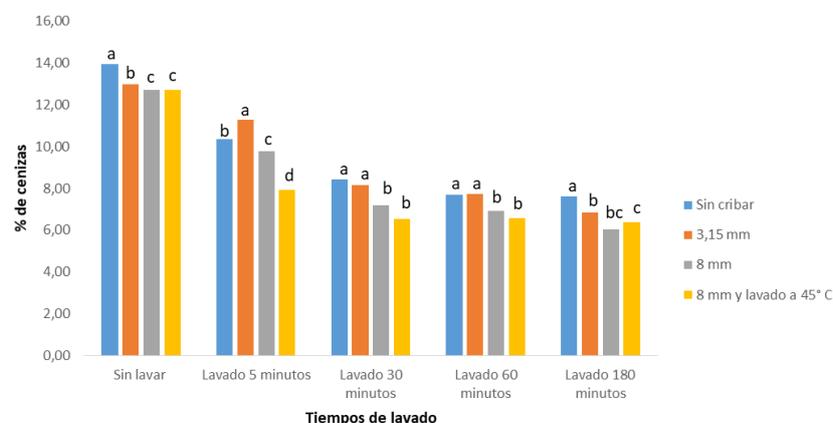


Figura 37. Contenido en cenizas de la biomasa de cardo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

Cuando se quiere reducir el % de cenizas en biomasa de cardo y no se va a cribar, el tratamiento de lavado más eficiente sería el de 60 minutos como se aprecia en la figura 38. Este tratamiento es significativamente mejor que no lavar o lavar a 30 y 60 minutos. Con respecto a su comparativa con el lavado de 180 minutos no presentan diferencias significativas entre ellos, pero si es más eficiente reducir el tiempo de lavado para

conseguir el mismo resultado. Si partimos de un material cribado a 3,15 mm el mejor tratamiento de lavado sería el de 180 minutos, puesto que se consigue el contenido más bajo de cenizas (6,83%) y es significativamente diferente a todos los demás. Para el caso de la biomasa cribada a 8 mm se cumple lo mismo que con la criba de 3,15 mm siendo el lavado de 180 minutos el más eficiente. Por último, en el caso del cribado a 8 mm y lavado a 45° C, los mejores resultados se obtienen con los lavados de 30, 60 y 180 minutos sin presentar diferencias significativas entre ellos, así pues lo más conveniente sería elegir el lavado de 30 minutos.

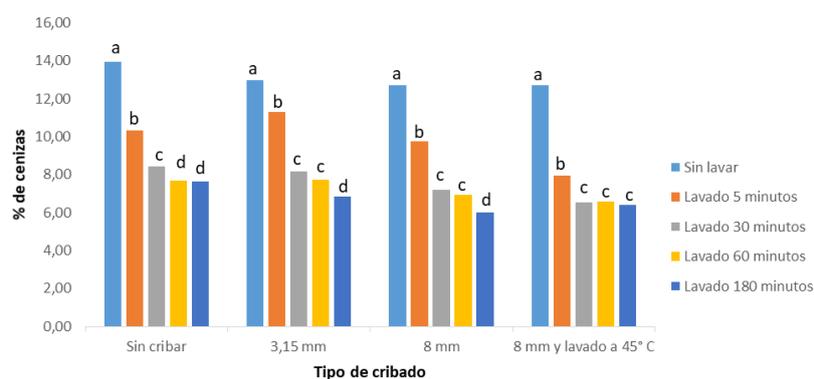


Figura 38. Contenido en cenizas de la biomasa de cardo con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.3. Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.

A continuación en este apartado se analizarán los resultados obtenidos del análisis elemental realizado a la biomasa de cardo en sus distintos formatos y tiempos de lavado. Aunque se comenten todos los resultados obtenidos de N, C, H, S y Cl es importante resaltar que la norma para clasificación de biocombustibles sólidos solo considera limitantes para la calidad de los mismos el N, S y Cl.

En las tablas 91, 92 y 93 se muestran los resultados medios del análisis elemental realizado a la biomasa de cardo, los cuales se irán analizando por separado en los siguientes subapartados.

Tabla 91. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo sin cribar

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	1,23	40,0	5,66	0,23	0,020
Lavado de 5 min	1,08	41,2	5,87	0,13	0,010
Lavado de 30 min	1,07	43,2	5,87	0,08	0,005
Lavado de 60 min	1,02	43,2	5,86	0,07	0,005
Lavado de 180 min	1,00	43,7	5,95	0,09	0,005

Tabla 92. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo cribada a 8 mm

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	1,11	41,6	5,60	0,18	0,021
Lavado de 5 min	1,17	43,8	5,84	0,13	0,008
Lavado de 30 min	0,92	44,8	5,90	0,08	0,004
Lavado de 60 min	0,99	45,4	6,00	0,08	0,004
Lavado de 180 min	0,84	45,0	6,06	0,08	0,003

Tabla 93. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de cardo cribada a 8 mm y lavada a 45° C

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	1,11	41,6	5,60	0,18	0,021
Lavado de 5 min	0,98	44,1	5,91	0,08	0,007
Lavado de 30 min	0,88	44,9	6,06	0,06	0,004
Lavado de 60 min	0,82	44,7	6,07	0,06	0,004
Lavado de 180 min	0,79	44,9	6,04	0,06	0,003

5.1.3.1. Contenido en nitrógeno.

En la tabla 94 se puede ver como existen diferencias significativas entre la biomasa sin cribar y la biomasa cribada (tamiz 8 y tamiz 8 con lavado a 45° C) en los procesos de no lavado y lavado a 30 y 180 minutos. Por otro lado, con los lavados de 5 y 60 minutos si hay diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos.

Tabla 94. Contenido en nitrógeno en biomasa de cardo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar	1,23 a	1,08 a	1,07 a	1,02 a	1,00 a
T8	1,11 b	1,03 b	0,92 b	0,99 b	0,84 b
T8 a 45°C	1,11 b	0,98 c	0,88 b	0,82 c	0,79 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la gráfica 39 se puede observar como con los distintos tiempos de lavados se consigue una reducción del contenido en nitrógeno en todos los formatos de la biomasa de cardo. Estas reducciones también fueron obtenidas por otros autores [82], los cuales consiguieron reducir en un 23% la concentración de nitrógeno para la biomasa de pastizales. En esta tesis las reducciones obtenidas para las distintas biomazas fueron de un 24,3% para el material sin cribar, de un 23,4% para el tamizado a 8 mm y de un 27,9% para el tamizado a 8 mm y lavado con temperatura de 45°C.

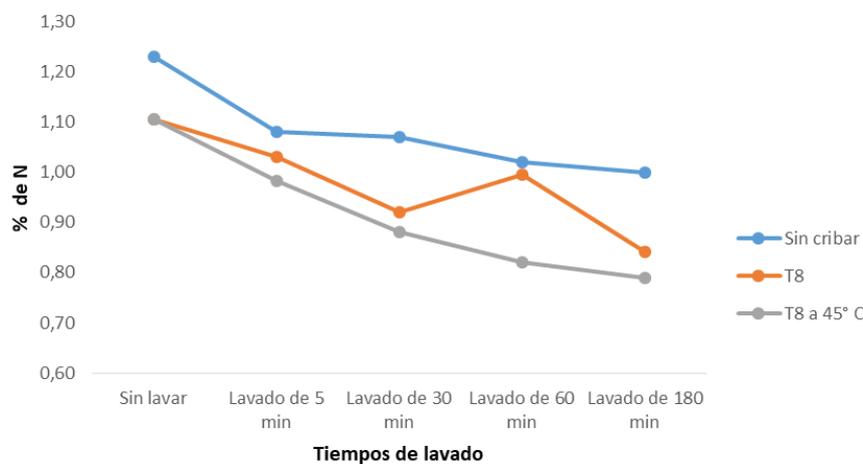


Figura 39. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada.

Cuando se dispone de biomasa de cardo sin cribar, el mejor tratamiento de lavado para la reducción del contenido en nitrógeno sería un lavado de 60 minutos porque a pesar de que con el de 180 minutos se reduce algo más el % de nitrógeno no hay diferencias significativas entre ellos (figura 40). Para el material tamizado a 8 mm y el tamizado a 8 mm y lavado con agua a 45° C todos los tratamientos de lavado son diferentes

significativamente entre ellos, siendo el lavado de 180 minutos el más eficiente en ambos casos para la reducción del contenido en nitrógeno.

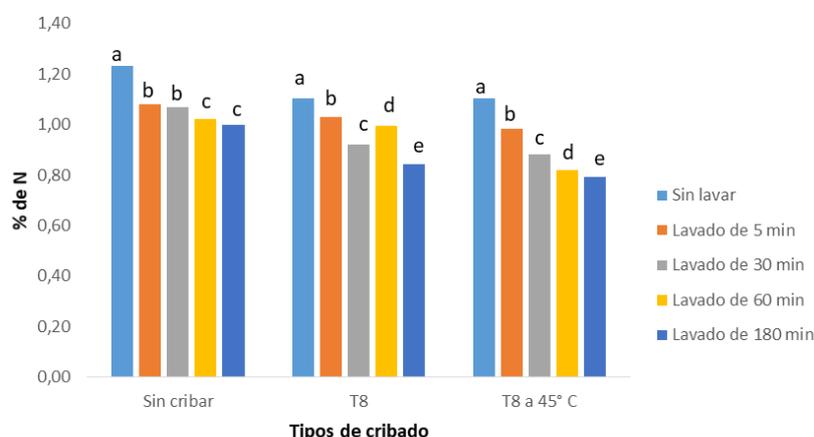


Figura 40. Contenido en nitrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada. . Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.3.2. Contenido en carbono.

En la tabla 95 se puede ver como existen diferencias significativas entre la biomasa sin cribar y la biomasa cribada (tamiz 8 y tamiz 8 con lavado a 45° C) en los procesos de no lavado y lavado a 30 minutos. Por otro lado, con los lavados de 5, 60 y 180 minutos si hay diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos.

Tabla 95. Contenido en carbono en biomasa de cardo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar	40,00 a	41,20 a	43,20 a	43,20 a	43,70 a
T8	41,55 b	43,78 b	44,80 b	45,43 b	44,98 b
T8 a 45°C	41,55 b	44,13 c	44,85 b	44,73 c	44,85 c

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

Cuando se realiza el lavado de la biomasa de cardo se puede observar (figura 41) como el contenido en carbono se incrementa de forma constante tanto con el tiempo de lavado como con el cribado de la misma, este factor es muy positivo porque autores como García

et al. (2012) [121], demostraron que un mayor contenido en carbono favorecía el incremento del poder calorífico.

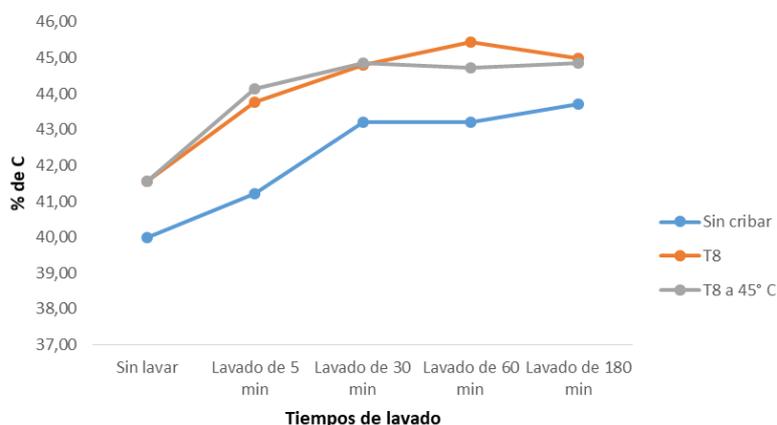


Figura 41. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de cardo lavada y cribada.

En la figura 42 se observa que no hay diferencias significativas para el contenido en carbono en los lavados de 30, 60 y 180 minutos cuando tenemos el cardo sin cribar o se ha cribado a 8 mm y lavado con temperatura a 45°C. En cambio si esa misma biomasa la lavamos 5 minutos o no la lavamos, el contenido en carbono es diferente significativamente entre ellos y todos los demás. Por otro lado, el contenido en carbono para el cardo tamizado a 8 mm presenta diferencias significativas para todos los tratamientos de lavado, excepto para los lavados de 30 y 180 minutos.

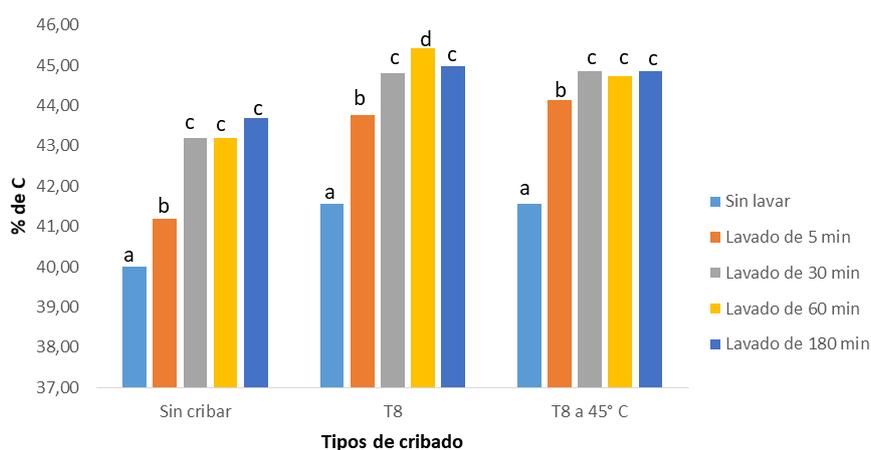


Figura 42. Contenido en carbono de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.3.3. Contenido en hidrógeno.

En la tabla 96 se muestra como prácticamente no hay diferencias significativas en el contenido de hidrógeno para los distintos lavados en la biomasa de cardo. Únicamente hay diferencias significativas entre el material cribado y el sin cribar cuando se realiza un lavado de 60 minutos. El contenido en hidrógeno es importante para la determinación del poder calorífico pero no es un elemento limitante para la calidad de los biocombustibles.

Tabla 96. Contenido en hidrógeno en biomasa de cardo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar	5,66 a	5,87 a	5,87 a	5,86 a	5,95 a
T8	5,60 a	5,84 a	5,90 a	6,00 b	6,06 a
T8 a 45°C	5,60 a	5,91 a	6,06 a	6,07 b	6,04 a

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

Al realizar los distintos lavados de la biomasa de cardo (sin cribar, cribada a 8 mm, y cribada a 8 mm y lavada a 45°C) podemos apreciar (figura 43) como el contenido de hidrógeno sufre un ligero incremento en su concentración. El comportamiento de la curva es similar a lo ocurrido con el contenido en carbono de cardo.

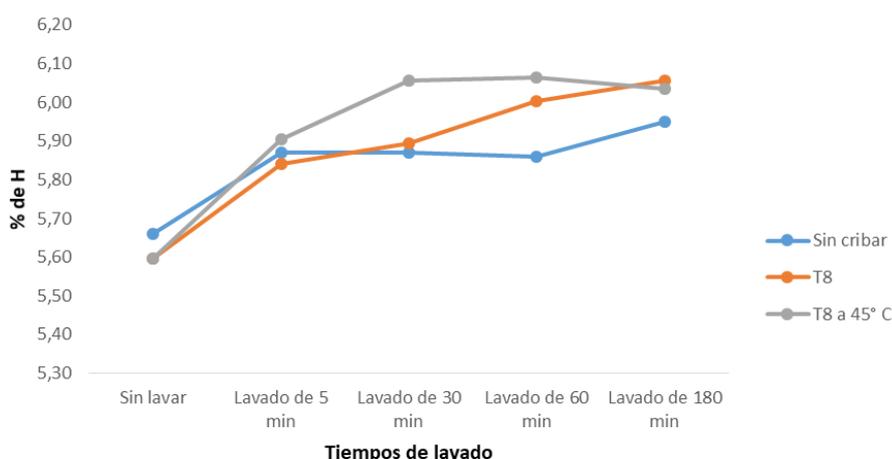


Figura 43. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada.

En la figura 44 se puede observar como no existen diferencias significativas en el contenido de hidrógeno para el cardo sin cribar cuando se realizan los distintos lavados, únicamente al no lavar la biomasa el contenido de hidrógeno es diferente significativamente a todos los demás. Cuando disponemos de cardo tamizado a 8 mm, si no lavamos la biomasa el % de hidrógeno es significativamente diferente a todos los demás, en cambio si comparamos el lavado de 5 minutos con el de 30 y el de 60 con el de 180 minutos no presentan diferencias significativas entre ellos pero si con el resto. Por último, cuando al cardo tamizado a 8 mm le realizamos los lavados a 45°C se puede ver como el contenido en hidrógeno no presenta diferencias significativas en los lavados de 30, 60 y 180 minutos, mientras que el material sin lavar o lavado a 5 minutos son diferentes significativamente a todos los demás.

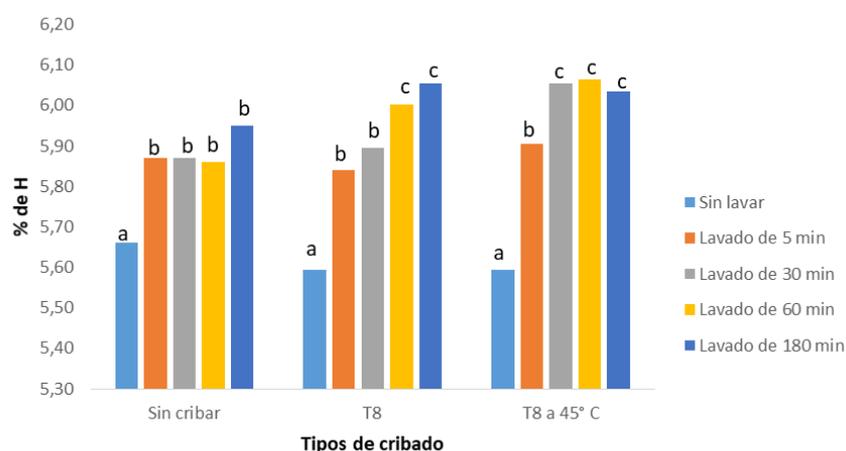


Figura 44. Contenido en hidrógeno de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.3.4. Contenido en azufre.

En la tabla 97 se puede ver como en el caso de realizar un lavado de 5 o de 60 minutos el contenido en azufre no va a presentar diferencias significativas en los distintos tipos de biomasa de cardo, mientras que si no se va a realizar ningún lavado de la biomasa se ve como sí existen diferencias significativas entre el material sin cribar y el cribado. El cardo cribado a 8 mm y lavado a 45°C sí presenta diferencias significativas con los demás al lavarlos durante 30 minutos, mientras que con un lavado de 180 minutos el % de carbono es diferente significativamente en todos los casos.

Tabla 97. Contenido en azufre en biomasa de cardo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar	0,23 a	0,13 a	0,08 a	0,07 a	0,09 a
T8	0,18 b	0,13 a	0,08 a	0,08 a	0,08 b
T8 a 45°C	0,18 b	0,08 b	0,06 b	0,06 a	0,06 c

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 45 se muestra claramente como con los tiempos de lavado conseguimos una reducción drástica del contenido en azufre. Esta disminución del contenido de azufre con el lavado de la biomasa en herbáceos ha sido demostrada por otros autores [82] con reducciones del 38,3 % para pastizales. En la biomasa de cynara se observó una reducción del contenido en azufre superior al 50% con los tiempos de lavado.

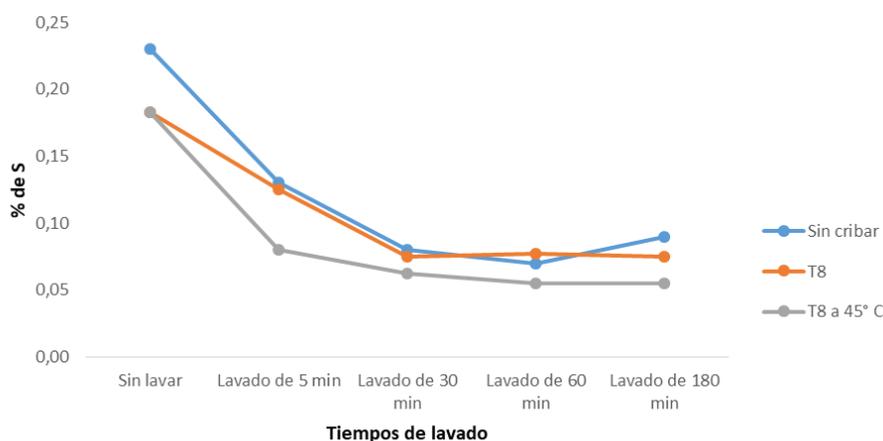


Figura 45. Evolución del contenido en azufre de la biomasa de cardo lavada y cribada.

Cuando se observa la figura 46 se puede advertir como el contenido en azufre de la biomasa de cardo sin cribar y la cribada a 8 mm y lavado a 45°C se comportan igual con los distintos lavados realizados. En todos los casos el % de azufre no presenta diferencias significativas en los lavados de 30, 60 y 180 minutos. Cuando se realiza un lavado de 5 minutos o no se lava la biomasa, el contenido de azufre presenta diferencias significativas para el cardo sin cribar y el cribado a 8 mm con lavado a 45°C, mientras que en el caso del cribado a 8 mm no hay diferencias significativas.

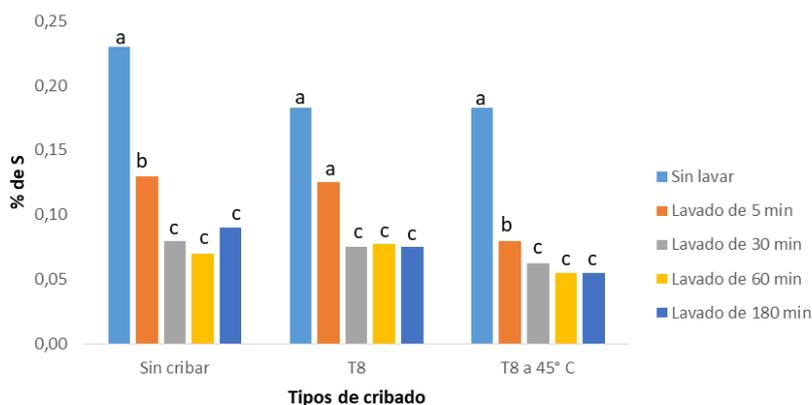


Figura 46. Contenido en azufre de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.3.5. Contenido en cloro.

En la tabla 98 se puede ver qué diferencias significativas presenta el cloro en los distintos tipos de biomasa de cardo en cada uno de los lavados realizados. Si no se realiza ningún lavado a la biomasa se aprecia como no hay diferencias significativas para el contenido en cloro, en cambio cuando se realiza el lavado de 5 minutos el contenido en cloro es diferente significativamente en cada uno de los tipos de biomasa de cardo. En el caso de los lavados de 30, 60 y 180 minutos las diferencias significativas en el contenido de cloro se presentan entre el material cribado y el sin cribar.

Tabla 98. Contenido en cloro en biomasa de cardo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar	0,020 a	0,010 a	0,005 a	0,005 a	0,005 a
T8	0,021 a	0,008 b	0,004 b	0,004 b	0,003 b
T8 a 45°C	0,021 a	0,007 c	0,004 b	0,004 b	0,003 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 47 se observa de forma clara como se reduce entre un 75-86 % el contenido en cloro para la biomasa de cardo con el aumento del tiempo de lavado. Autores como Hensgen y Wachendorf (2018) [82] obtuvieron reducciones del 92 % en el contenido en cloro para biomazas herbáceas de pastizales, lo que demuestra la gran efectividad que

tienen los lavados en las biomásas herbáceas para la reducción del cloro. Este hecho es fundamental para la calidad de un biocombustible, ya que el cloro de la biomasa en la combustión de la misma puede provocar depósitos y corrosión en la caldera [122].

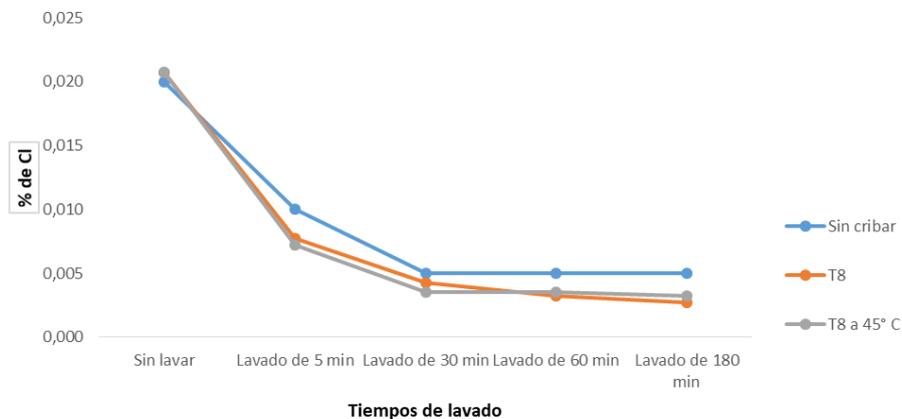


Figura 47. Evolución del contenido en cloro de la biomasa de cardo lavada y cribada.

La figura 48 muestra claramente como el comportamiento del contenido en cloro en los distintos tipos de biomasa de cardo (sin lavar, cribado a 8 mm y cribado a 8 mm y lavado a 45°C) es el mismo con los distintos lavados. En todos los casos, el % de cloro no presenta diferencias significativas en los lavados de 30, 60 y 180 minutos. En cambio para el cardo sin lavar o lavado a 5 minutos la concentración de cloro es diferente significativamente a todos los demás. En todos los casos los niveles de cloro están por debajo de lo exigido por la norma 17225 para biomásas herbáceas ($\leq 0,10\%$).

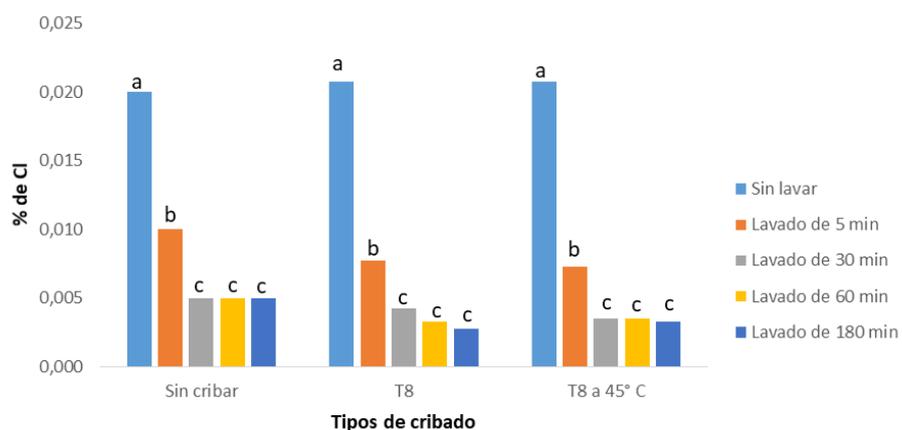


Figura 48. Contenido en cloro de la biomasa de cardo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las figuras 49, 50, 51, 52, 53, 54 y 55 podemos observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de cardo sin tamizar, tamizada a 8 mm, y tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

En la figura 49 se puede observar como la concentración de Ca en la biomasa de cardo se reduce con el tiempo de lavado tanto para la biomasa cribada (tamiz 8 y tamiz 8 lavado a 45° C) como para la biomasa sin cribar. Es importante reseñar cómo la disminución del contenido en Ca se produce en los primeros 5 minutos de lavado, siendo prácticamente igual para los demás tiempos. Por otro lado, los descensos son más acusados en la biomasa cribada con el tamiz 8 que con la que está sin cribar, además de observarse una clara influencia de la temperatura de lavado del agua en los primeros 5 minutos para la bajada del contenido en Ca.

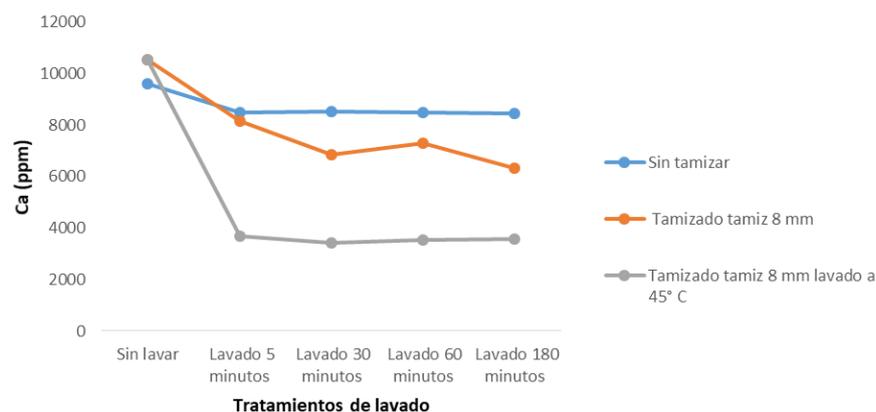


Figura 49. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de cardo.

En la figura 50 se aprecia cómo el contenido en Fe de la biomasa de cardo se reduce en los primeros 5 minutos de lavado y se mantiene constante o incluso se incrementa ligeramente para los lavados de mayor tiempo. Con la biomasa cribada a 8 mm y lavada a temperatura de 45° C se consigue la mayor reducción del contenido en Fe.

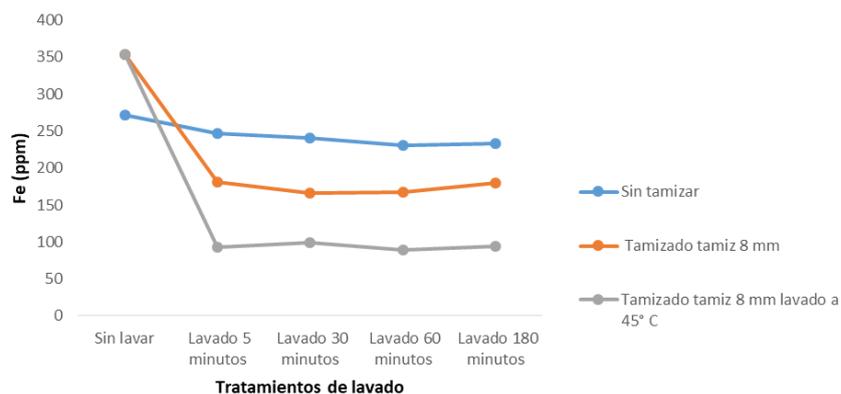


Figura 50. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de cardo.

El efecto del lavado en la disminución de la concentración de K (figura 51) en la biomasa de cardo se produce en los primeros 30 minutos del mismo, siendo esta disminución muy acusada en los primeros 5 minutos para el material cribado a 8 mm y lavado a 45° C como se aprecia en la figura 51. Los tiempos de lavado de 60 y 180 minutos no tienen ningún efecto y por tanto no son interesantes realizarlos. Reducciones de hasta un 83 % en el contenido en K fueron obtenidas por algunos autores [82] para pastizales, lo que confirma los resultados obtenidos en un cultivo herbáceo como es el cardo.

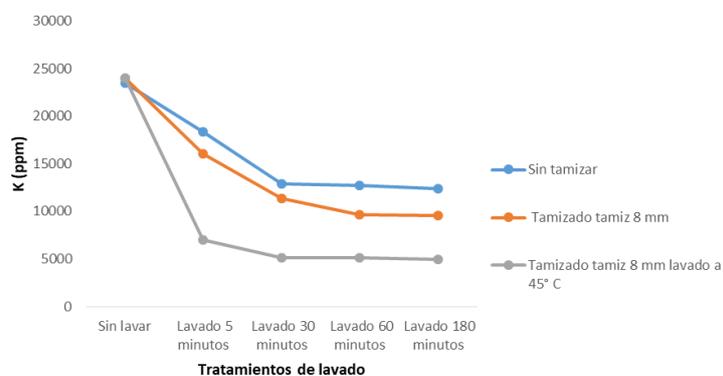


Figura 51. Contenido en K (ppm) de la biomasa de cardo.

Para los efectos del lavado en la concentración del Mg (figura 52) son válidos los comentarios realizados en los elementos anteriores, puesto que se comportan de forma prácticamente igual con los tiempos de lavado. Autores como Hensgen y Wachendorf (2018) [82] obtuvieron reducciones del 32 % en el contenido en Mg para biomásas herbáceas de pastizales.

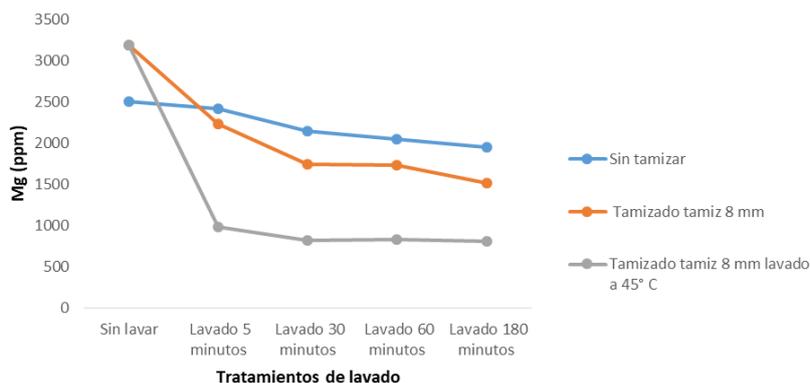


Figura 52. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de cardo.

En la figura 53 se ve como el Na se comporta de forma muy similar a los elementos analizados anteriormente, si bien es verdad que en este caso la disminución de la concentración del mismo en la biomasa se produce durante todos los tiempos de lavado.

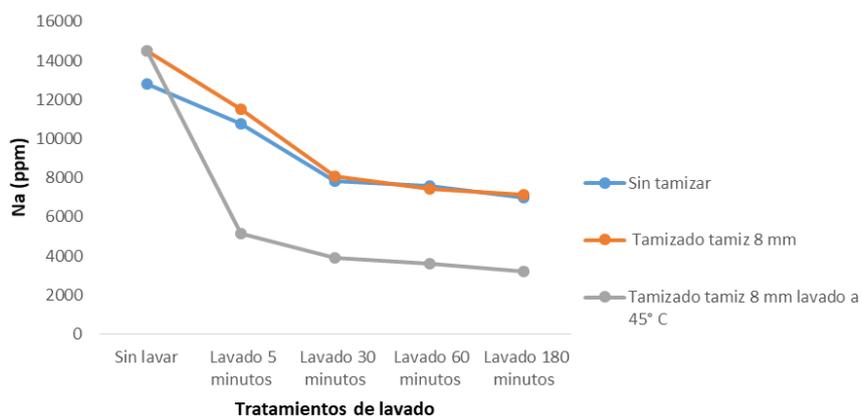


Figura 53. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de cardo.

En el caso del contenido de P en la biomasa de cardo (figura 54) se puede apreciar como con los tratamientos de lavado conseguimos una disminución de su concentración desde el material sin lavar hasta el lavado a 180 minutos. Es interesante destacar como en todos los casos el contenido en P se incrementa ligeramente en la fase de lavado de 30 a 60 minutos.

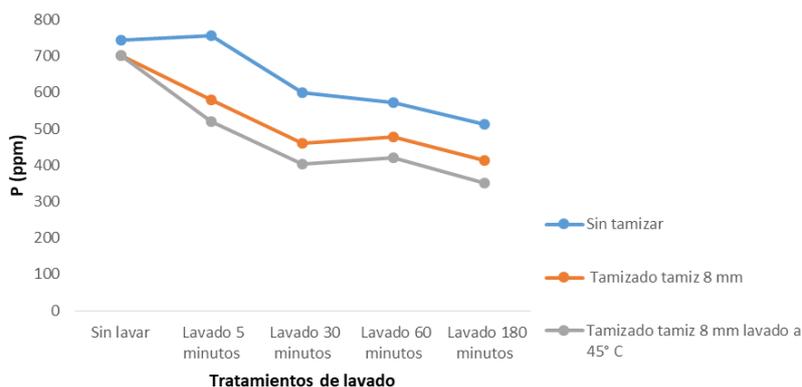


Figura 54. Contenido en P (ppm) de la biomasa de cardo.

En la figura 55 se advierte un cambio en el comportamiento del contenido de Al para la biomasa de cardo sin tamizar respecto a la tamizada a 8 mm y 8 mm con lavado a T 45° C. Este cambio consiste en un incremento de su concentración respecto del material de partida a partir de los 5 minutos de lavado. Por otro lado, el material tamizado se comporta de manera muy similar al resto de elementos estudiados consiguiendo el mayor descenso en los primeros 5 minutos.

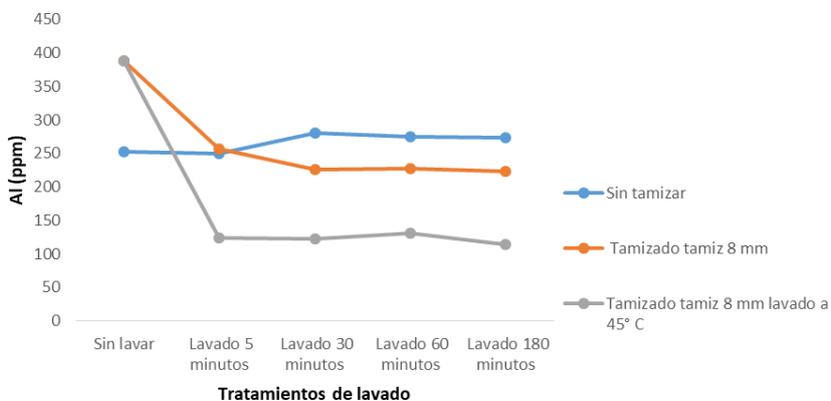


Figura 55. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de cardo.

5.1.5. Resultado de la temperatura de fusibilidad de las cenizas.

Los fenómenos de sinterización de las cenizas en cynara pueden ser esperadas a temperaturas superiores a 900°C [123]. Cynara presenta problemas de formación de escorias a temperaturas superiores a 750°C [124], esto puede ser debido a sus altos contenidos en potasio y cloro.

5.1.6. Resultados del poder calorífico.

La figura 56 muestra el resultado del PCS y del PCI de los distintos tipos de formatos analizados en la biomasa de cardo. Se puede observar cómo el comportamiento de ambos poderes caloríficos es igual para cada uno de los tipos de material estudiados debido a que el PCI se calcula en base al resultado de PCS obtenidos en el calorímetro.

El estudio estadístico refleja cómo existen unas diferencias significativas entre cada uno de los tipos de biomasa de cardo analizadas y cómo con el cribado y lavado se consigue incrementar el poder calorífico. Este incremento puede ser debido a que con los lavados de la biomasa se redujo el contenido en cenizas y se aumentó el contenido en carbono de la misma.

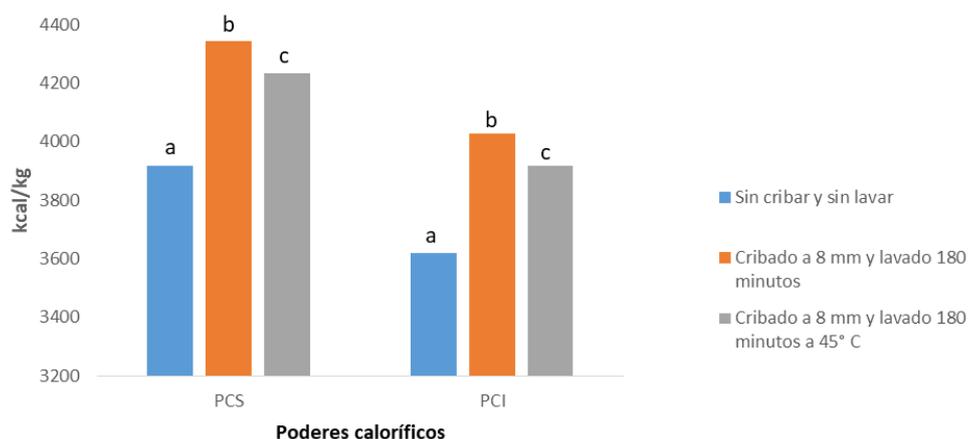


Figura 56. Poder calorífico en biomasa de cardo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.1.7. Caracterización de los pélets de cardo.

En la tabla 99 se puede observar los resultados de la caracterización de los pélets de cardo, en la cual se obtuvo un porcentaje de cenizas bastante alto en comparación con el obtenido por otros autores como Fernández [91]. Esta diferencia puede ser debida a que Fernández analizó el contenido en cenizas solo del tallo de la planta siendo esta la parte donde está más lignificado y menos cenizas hay, mientras que en nuestro caso se utilizó la planta

entera para hacer los pélets. Con este resultado se puede decir que el mayor % de cenizas en la planta de cardo se encuentra en hojas y capítulos.

A la hora de comparar el % de cenizas obtenido con el exigido por la norma 17225-6 para la clasificación de biocombustibles sólidos herbáceos, se puede advertir que está muy lejos de los valores límites establecidos en dicha norma ($A \leq 6\%$). Otros dos parámetros que quedan por debajo de la norma son el PCI y la durabilidad. En el caso de la durabilidad si entraría dentro de la segunda categoría de pelets herbáceo, puesto que la norma exige para ese caso un 96%.

Una vez observados los resultados obtenidos en esta tesis para la biomasa de cardo y comprobando que el contenido en cenizas es el principal factor limitante de calidad de los pelets, sería interesante realizar un peletizado de la biomasa lavada y cribada con menor porcentaje de cenizas (6,01%). Con ello se conseguiría reducir el porcentaje de cenizas en los pélets a lo exigido por la norma y esto ayudaría a su vez a incrementar el PCI.

Tabla 99. Caracterización de los pélets de cardo.

UNE-EN ISO 17225-6. "Especificaciones de pélets producidos a partir de biomasa herbácea".			Pélets de cardo	Cumple la norma 17225-6 Si/No
Propiedades	Unidades	A		
Cenizas	% en base seca	≤ 6	13,6	No
PCI	kcal/kg	≥ 3500	3.261	No
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 1,5$	0,62	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,20$	0,1	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,10$	0,03	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	97,1	No

5.2. Discusión de resultados 2: Ciruelo (*Prunus doméstica L.*).

5.2.1. Resultados del cribado.

En la figura 57 se muestra claramente cómo con el cribado de la biomasa conseguimos demostrar que el mayor porcentaje de cenizas se encuentra en las partículas más finas. La biomasa recogida en la base o criba de menor tamaño tiene 6 veces más cenizas que todos los demás tamaños de partículas obtenidas. La separación por tamaño de partícula puede ser un método eficiente y adecuado para la reducción del contenido en cenizas, ya que permite el proceso de separación de los tamaños de partículas más pequeños que contienen la mayor parte de los minerales [83].

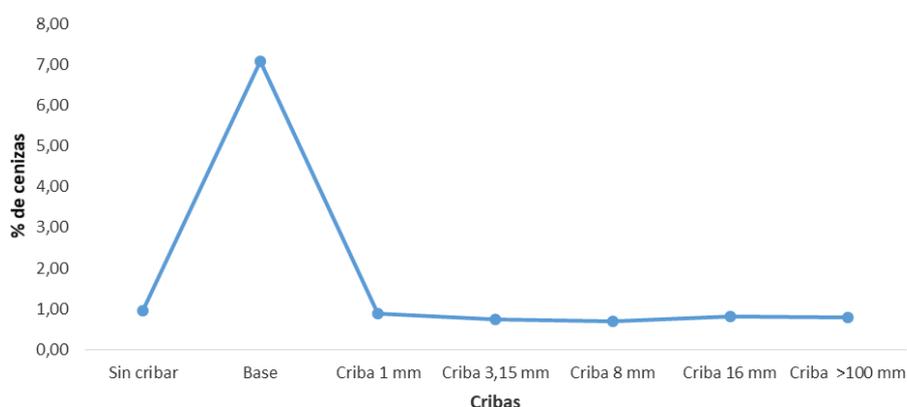


Figura 57. Resultados del % en peso de cenizas en biomasa de ciruelo cribada.

A continuación en la figura 58 se puede ver como la mitad de la biomasa de ciruelo cribada es recogida por el tamiz 3,15 mm seguido de la de 1 mm con un 28 % aproximadamente y con menores valores las demás cribas. El resultado obtenido es similar al alcanzado con la biomasa de cardo, si bien es verdad que en este último las diferencias de porcentajes entre cribas eran menores.

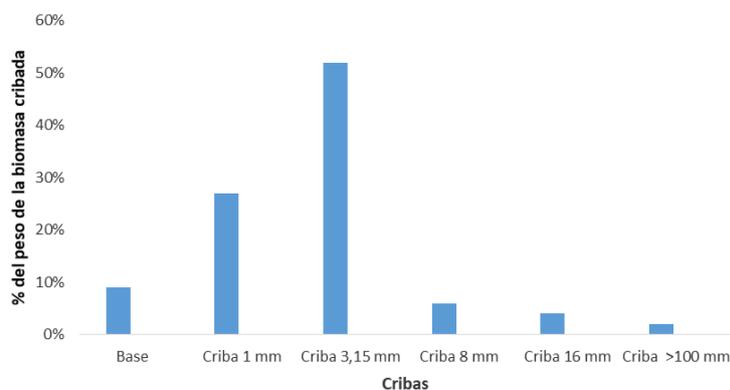


Figura 58. Resultado en % de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).

5.2.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 100 podemos observar los resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado (5, 30, 60, y 180 minutos) realizados a la biomasa de ciruelo en sus distintos formatos (sin cribar y cribada).

Tabla 100. Resultados del % de cenizas en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de ciruelo.

Criba	Sin lavar	Lavado 5 minutos	Lavado 30 minutos	Lavado 60 minutos	Lavado 180 minutos
Con corteza y sin cribar	2,39±0,01	1,73±0,01	1,76±0,03	1,91±0,01	2,09±0,01
Sin corteza y sin cribar	0,95±0,04	0,94±0,01	0,92±0,01	0,91±0,01	0,92±0,01
3,15 mm	0,75±0,03	0,73±0,01	0,70±0,01	0,70±0,01	0,74±0,02
8 mm	0,71±0,01	0,73±0,02	0,62±0,01	0,76±0,01	0,75±0,03
8 mm y lavado a 45°C	0,71±0,01	0,61±0,01	0,69±0,01	0,58±0,01	0,54±0,01

En la tabla 100 se pueden ver los valores medios en cuanto al contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo tras los tratamientos de lavado, descortezado y cribado. Es muy importante resaltar como con los distintos tratamientos realizados a la biomasa se ha conseguido reducir el % de cenizas por debajo del exigido por la norma 17225 ($\leq 0,7\%$) para pélets de máxima calidad (A1). De todos los resultados obtenidos quizás el más recomendable sería el cribado sin lavar puesto que estaríamos prácticamente en el valor límite de la norma y no utilizaríamos aguas de lavado.

Observando la tabla 100 y la figura 59 se puede confirmar que el mayor porcentaje de cenizas se encuentra en la corteza de la biomasa y que eliminándola se consigue reducirla en más de la mitad del contenido inicial. El descortezado es el proceso de separar la corteza (material sobre el cambium vascular) del tronco leñoso [125]. Según Martínez *et al.* (2012) [126] la cantidad de ceniza de una biomasa viene determinada por el porcentaje de corteza que ésta conlleve. La corteza está formada por polisacáridos, lignina, sustancias extractables y sustancias inorgánicas, y éstas no participan en la combustión y generan las cenizas. El contenido total de extractivos de la corteza oscila del 31 al 39%

comparada con aproximadamente el 10% en la madera [127]. Schmidt *et al.* [75] encontraron una tasa de reducción media de cenizas en la biomasa lavada del 25%, 32% y 38%, para abeto, haya y roble, respectivamente.

La madera, generalmente, tiene un bajo contenido en cenizas, mientras que la corteza presenta considerablemente mayor contenido en cenizas, que puede generar escorias en la caldera provocando una mayor demanda de mantenimiento. El alto contenido en cenizas genera más emisiones de partículas [128].

Los sistemas y estrategias de descortezado son utilizadas para incrementar el valor de la biomasa leñosa, separando madera y corteza en dos fuentes de productos de valor añadido [129].

La figura 59 muestra la evolución del contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo con los tiempos de los lavados. Es importante destacar cómo el material con corteza reduce el contenido en cenizas en los primeros 5 minutos para posteriormente comenzar a incrementarlo. Por otro lado, el contenido en cenizas en el material descortezado y cribado se comporta de una manera más estable y prácticamente no hay variaciones que resaltar. El procesado de la madera es más efectivo cuando la madera es homogénea y el comportamiento de la biomasa para su conversión en biocombustible también se incrementa con el empleo de biomasa leñosa homogénea [130].

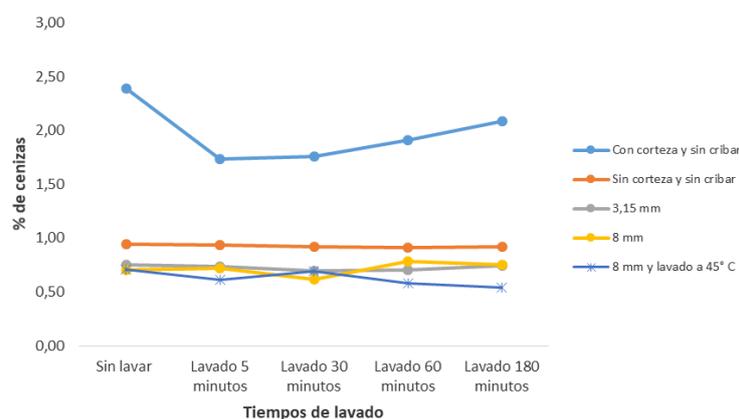


Figura 59. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.

Cuando se dispone de la biomasa de ciruelo en sus distintos formatos (con corteza, sin corteza, cribada a 3,15 y 8 mm) y no se le va a realizar el tratamiento de lavado (figura 60), lo más eficiente para la reducción del contenido en cenizas sería utilizar la biomasa tamizada a 3,15 u 8 mm. ya que no presentan diferencias significativas entre ellas con el

% más bajo de cenizas. Para un lavado de 5 minutos habría que utilizar el material cribado a 8 mm y lavado con temperatura de 45° C puesto que conseguiríamos reducir el porcentaje de cenizas por debajo de lo exigido en la norma ($0,6 \leq 0,7$ %). También es importante señalar que con los materiales de 3,15 y 8 mm se conseguiría llegar al límite establecido en la norma pero de forma muy próxima al límite de 0,7%.

En el caso del lavado de 30 minutos se podría utilizar cualquier formato de biomasa de ciruelo cribada ya que se conseguiría bajar el % de cenizas por debajo del 0,7 % exigido en la norma. Si por otro lado se decide realizar un lavado de 60 minutos para reducir el % cenizas según la norma 17225, la mejor opción sería utilizar la biomasa cribada a 3,15 mm porque a pesar de que con la biomasa cribada a 8 mm y lavada a 45° C también bajamos del límite exigido por la norma, en este caso el tratamiento conlleva un gasto mayor de energía que en el anterior. Por último, en el caso de realizar el lavado de 180 minutos, la mejor opción en cuanto a la reducción del porcentaje de cenizas es del lavado a 45° C del material cribado a 8 mm (0,54 % de cenizas), aunque la opción de utilizar los cribados de 3,15 y 8 mm sería muy interesante de valorar porque están al límite de la norma.

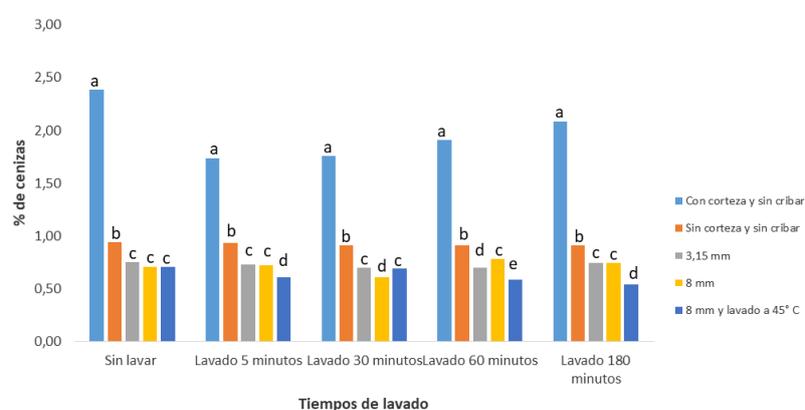


Figura 60. Contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 61 se muestra qué tiempo de lavado sería el más eficiente para reducir el % de cenizas por debajo del 0,7 % que nos marca la norma de calidad de los biocombustibles sólidos. Si se dispone únicamente de un material astillado, lo más adecuado sería realizar un lavado de 5 minutos porque a pesar de no bajar del límite exigido en la norma, se

estaría reduciendo el % de cenizas en un 30%. En el caso de disponer de un material descortezado, la mejor opción es no realizar ningún proceso de lavado ya que no hay diferencias significativas entre cada uno de ellos y no se conseguiría bajar ni igualar el 0,7% de cenizas. Cuando disponemos de material cribado, los tratamientos de lavados más efectivos y que conseguimos reducir el % de cenizas a lo exigido por la norma serían de 30 minutos para el material cribado a 3,15 y 8 mm, y de 180 minutos si el material cribado a 8 mm lo lavamos a 45° C. Es importante resaltar que en varios casos hay tratamientos cuyo % de cenizas está muy próximo al límite establecido por la norma.

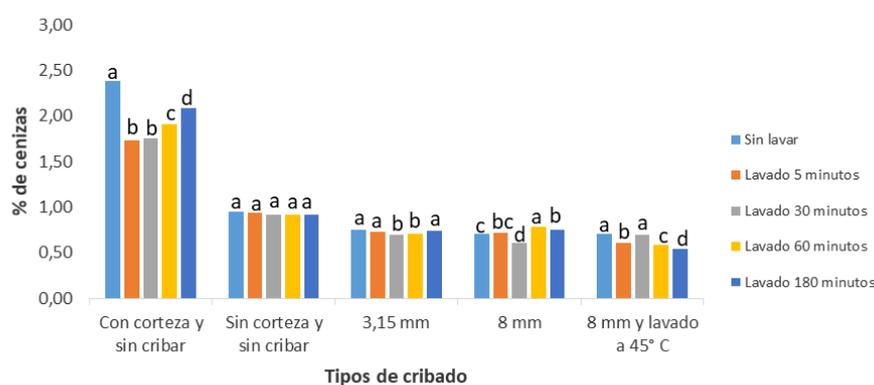


Figura 61. Contenido en cenizas de la biomasa de ciruelo con distintos cribados. . Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.3. Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.

A continuación en este apartado se analizarán los resultados obtenidos del análisis elemental realizado a la biomasa de ciruelo en sus distintos formatos y tiempos de lavado. Aunque se comenten todos los resultados obtenidos de N, C, H, S y Cl es importante resaltar que la norma para clasificación de biocombustibles sólidos sólo considera limitantes para la calidad de los mismos el N, S y Cl.

En las tablas 101, 102, 103 y 104 se muestran los resultados medios del análisis elemental realizado a la biomasa de ciruelo, los cuales se irán analizando por separado en los siguientes subapartados.

Tabla 101. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo con corteza y sin cribar

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,18	45,9	6,06	0,02	0,0002
Lavado de 5 min	0,16	45,40	6,15	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,18	45,93	6,09	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,16	45,73	6,10	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,18	44,80	6,08	0,01	0,0001

Tabla 102. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza y sin cribar

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,13	46,55	6,06	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,13	46,33	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 30 min	0,12	46,20	6,06	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,11	46,33	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,12	46,43	6,09	0,01	0,0002

Tabla 103. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,12	45,98	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,13	45,90	6,09	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,10	47,15	5,97	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,08	47,13	5,97	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,13	46,73	5,91	0,01	0,0001

Tabla 104. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de ciruelo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,12	45,98	6,08	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,12	45,70	5,84	0,01	0,0002
Lavado de 30 min	0,12	45,53	5,85	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,11	45,13	5,80	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,13	46,13	6,19	0,01	0,0001

5.2.3.1. Contenido en nitrógeno.

En la tabla 105 que muestra el resultado de ANOVA se observa que en todos los casos el material con corteza presenta diferencias significativas con todos los demás tipos de materias primas (descortezada, cribada T8 mm y T8 mm a 45°C) en los distintos tiempos de lavado. Por otro lado, una vez que hemos eliminado la corteza de la biomasa de ciruelo se puede apreciar como las diferencias en las concentraciones de N son mínimas a pesar de aparecer diferencias significativas entre ellas. Analizando la tabla 104 de forma global se puede afirmar que el tratamiento de tamizado de 8 mm junto con el lavado a temperatura ambiente durante 60 minutos de la biomasa de ciruelo descortezada obtiene el valor más bajo (0,08 %) en cuanto a la concentración de N.

Tabla 105. Contenido en nitrógeno en biomasa de ciruelo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,18 a	0,16 a	0,18 a	0,16 a	0,18 a
Sin cribar sin corteza	0,13 b	0,13 b	0,12 b	0,11 b	0,12 b
T8	0,12 b	0,12 c	0,10 c	0,08 c	0,13 b
T8 a 45°C	0,12 b	0,12 c	0,12 b	0,11 b	0,13 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 62 se advierte claramente como el efecto de los lavados en la disminución del contenido en N es mínimo, a excepción del material tamizado a 8 mm en el cual a los 30 y 60 minutos si se reduce de forma más marcada la concentración de N.

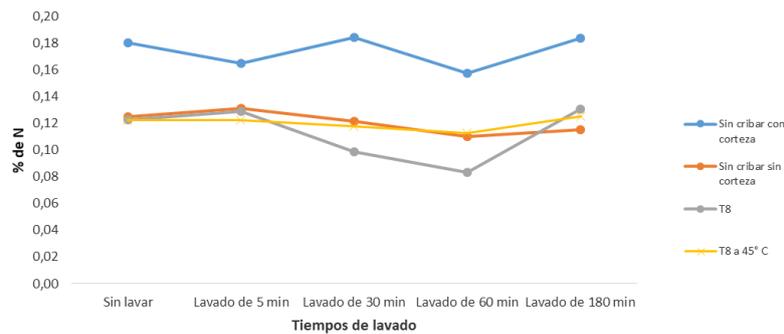


Figura 62. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.

La figura 63 permite ver de forma clara las diferencias significativas que hay entre los distintos tiempos de lavados realizados a la biomasa de ciruelo. Observando de forma general la figura se puede decir que los lavados de 60 minutos son los que presentan la mayor reducción del contenido en N, si bien es importante reseñar que a excepción de la biomasa cribada a 8 mm en la cual el lavado de 60 minutos es diferente significativamente a todos los demás, en los demás casos se podría optar por un tratamiento de lavado inferior puesto que no hay diferencias significativas entre ellos.

Durante la combustión el nitrógeno se convierte en N₂ gaseoso y en NO_x casi en su totalidad, lo que constituye un gran impacto medioambiental, por lo tanto es interesante que el nivel de nitrógeno en la composición de la biomasa sea mínimo para generar bajos niveles de NO_x en los gases de combustión [121]. En este estudio, los valores de N de la biomasa de ciruelo están dentro de los rangos indicados por varios autores [73] y por debajo de los exigidos por la norma de calidad para pélets A1 (≤ 0,3 %), por lo tanto no habría problemas en su uso como biocombustible.

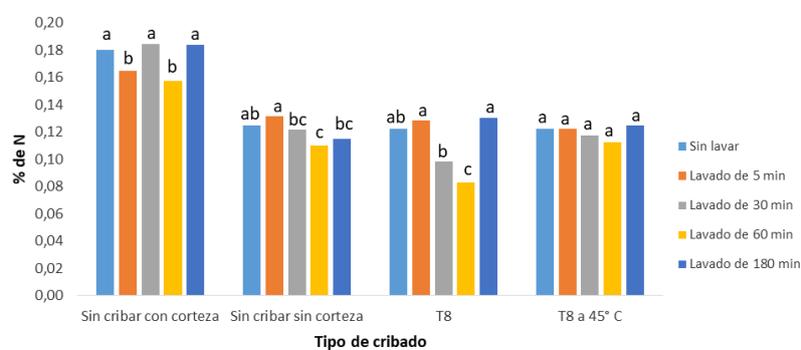


Figura 63. Contenido en nitrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.3.2. Contenido en carbono.

En la tabla 106 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizado al contenido de C en la biomasa de ciruelo, en ellos se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de materias primas utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 1%). El rango de valores de C obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 45,1 y 47,2 %, estos valores son similares a los obtenidos por otros autores [121] que indicaban valores medios de 45,5 % y algo por debajo a los obtenidos por Telmo *et al* (2010)[73].

Al observar la tabla 106 se puede afirmar que si no se va a lavar la biomasa o el lavado es de 5 minutos la mejor opción es usar ciruelo descortezado y sin cribar. Si el lavado es de 30 o 60 minutos se recomienda tamizar la biomasa a 8 mm, mientras que para un lavado de 180 minutos es igual utilizar el material descortezado y sin cribar que cribado a 8 mm.

Tabla 106. Contenido en carbono en biomasa de ciruelo.

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	45,9 b	45,4 b	45,9 bc	45,7 c	44,8 c
Sin cribar sin corteza	46,6 a	46,3 a	46,2 b	46,3 b	46,4 ab
T8	46,0 b	45,9 ab	47,2 a	47,1 a	46,7 a
T8 a 45°C	46,0 b	45,7 ab	45,5 c	45,1 d	46,1 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 64 se puede observar como la evolución del contenido de carbono con los distintos tiempos de lavado es muy variable en función del tipo de biomasa de ciruelo utilizada. En el caso del material con corteza y el tamizado a 8 mm la evolución del contenido en carbono son prácticamente iguales, mientras que en los otros dos casos a partir de los 5 minutos se comportan de forma distinta.

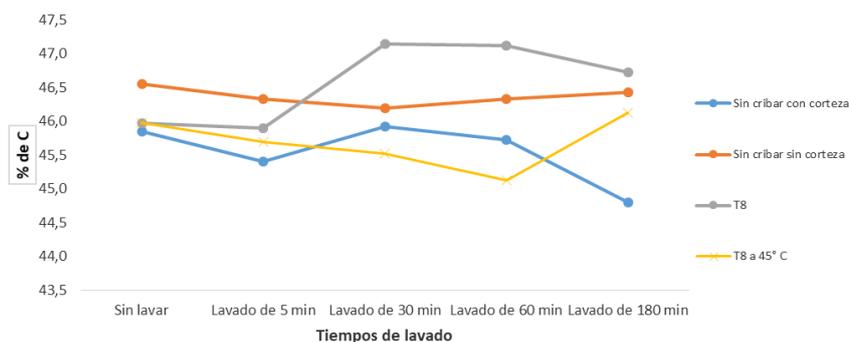


Figura 64. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.

En la figura 65 se muestran las diferencias significativas que hay en el contenido en carbono entre los distintos lavados para cada uno de los tipos de biomasa de ciruelo que se han analizado. Cuando se realiza solamente el astillado de la biomasa, el lavado de 180 minutos es diferente significativamente a los demás, en cambio si el material utilizado es descortezado no presenta ninguna diferencia significativa con los lavados. Por otro lado, cuando se tiene el material tamizado a 8 mm si no se lava o se realiza el lavado de 5 minutos, no hay diferencias significativas entre ellos, pero si con los demás lavados que, a su vez tampoco presentan diferencias entre ellos. Para el ciruelo tamizado y lavado con agua a 45°C el lavado de 60 minutos obtiene la concentración más baja de carbono, y es diferente significativamente a todos los tratamientos menos al de 30 minutos.

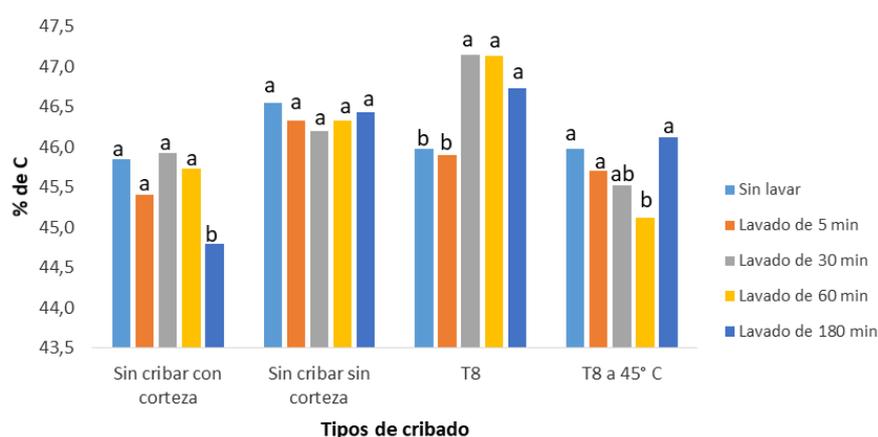


Figura 65. Contenido en carbono de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

La mayoría de las plantas movilizan el CO₂ de la atmósfera hasta los cloroplastos, donde tendrá lugar la fijación del dióxido de carbono gracias a la actividad carboxilasa de la

enzima rubisco (plantas C3) [131]. No obstante, la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, como ocurre con los combustibles fósiles [132].

5.2.3.3. Contenido en hidrógeno.

En la tabla 107 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizado al contenido de H en la biomasa de ciruelo. Se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de materias primas utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 0,3%). El rango de valores de H obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 6,15 y 5,80 %, estos valores son similares a los obtenidos por otros autores en ciruelo [98] y a los obtenidos por Telmo *et al* (2010) [73].

Autores como García *et al* (2012) [121] indican que el contenido de H es positivo porque ayuda a aumentar el poder calorífico de la biomasa. El contenido en H no presenta diferencias significativas cuando no se le realiza ningún lavado a la biomasa. Para el lavado de 5 minutos únicamente se encuentran diferencias significativas en el ciruelo tamizado a 8 mm y lavado con agua a 45°C. En el caso del lavado de 30 minutos si se puede apreciar como hay diferencias significativas en el contenido en hidrógeno tanto si cribamos o no cribamos, como si lavamos a 45°C. Por último, para lavados de 60 y 180 minutos la cantidad de H de la biomasa presenta diferencias significativas en el caso de utilizar material cribado o no.

A la hora de analizar la evolución del contenido de H con los tiempos de lavado, se puede apreciar en la figura 66 como únicamente se produce una disminución del mismo cuando la biomasa de ciruelo está tamizada. A su vez la disminución de la concentración de hidrógeno es más acusado al utilizar el agua a 45° C.

Tabla 107. Contenido en hidrógeno en biomasa de ciruelo.

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	6,06 a	6,15 a	6,09 a	6,10 a	6,08 a
Sin cribar sin corteza	6,06 a	6,08 a	6,06 a	6,11 a	6,09 a
T8	6,08 a	6,09 a	5,97 b	5,97 b	5,91 b
T8 a 45°C	6,08 a	5,84 b	5,85 c	5,80 b	5,82 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

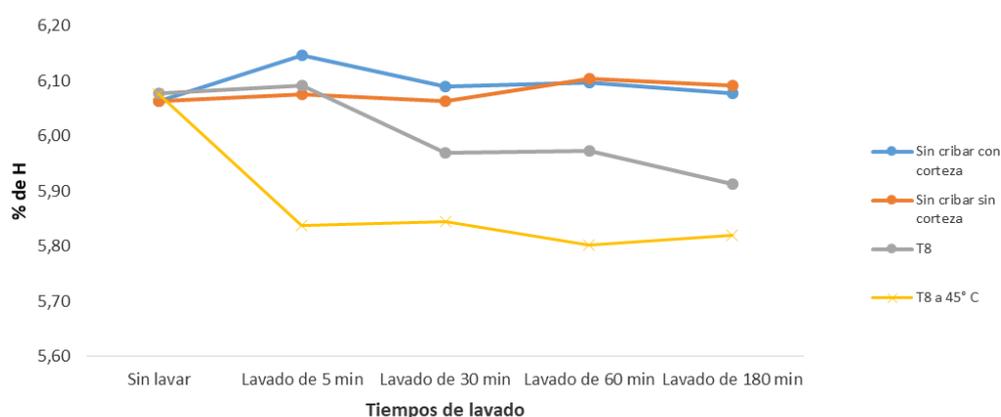


Figura 66. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada.

En la figura 67 se muestran las diferencias significativas que presenta el contenido de H en los distintos tiempos de lavado para cada tipo de biomasa, observándose diferencias significativas entre algunos tratamientos pero con unas variaciones en los valores de concentración de hidrógeno muy bajos.

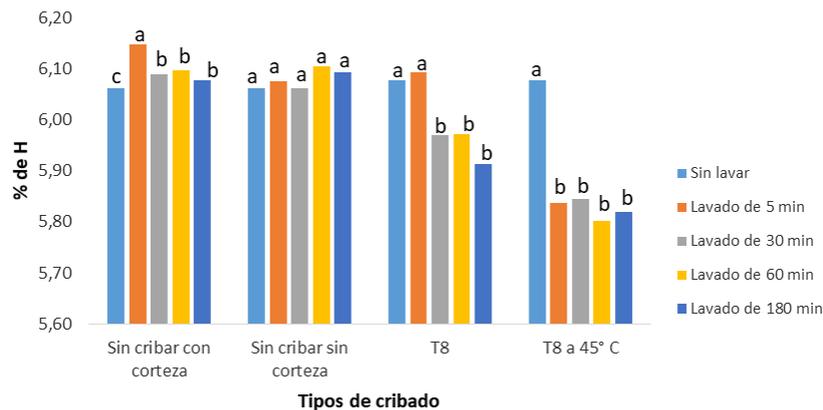


Figura 67. Contenido en hidrógeno de la biomasa de ciruelo lavada y cribada. . Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.3.4. Contenido en azufre.

En la tabla 108 se muestran los valores del contenido en azufre en la biomasa de ciruelo para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar, la cantidad de azufre que presenta el ciruelo es mínima y por tanto no hay diferencias en cada uno de los tratamientos.

El azufre es absorbido por los estomas de las hojas bajo la forma de dióxido de azufre, contaminante atmosférico resultante de la combustión de la madera, el petróleo y del carbón [129]. En la biomasa se busca la mínima presencia de azufre en su composición elemental ya que el contenido de azufre genera SO₂ que puede generar sulfatos. Estos compuestos no constituyen un gran problema ya que la biomasa vegetal tiene muy bajas cantidades de azufre y no contribuye a la formación de lluvia ácida [121].

Los niveles de azufre obtenidos en este estudio están por debajo a los obtenidos por otros autores [73,98] y dentro del rango dado por Vassilev *et al.* (2010) [133]. En todos los tratamientos están por debajo del 0,04 % exigido por la norma de clasificación de biocombustibles de calidad, por la tanto las emisiones de SO₂ que puedan generar la combustión de la biomasa de ciruelo va a ser mínima o nula.

Tabla 108. Contenido en azufre en biomasa de ciruelo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Sin cribar sin corteza	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
T8 a 45°C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.3.5. Contenido en cloro.

En la tabla 109 se observan los valores del contenido en cloro en la biomasa de ciruelo para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar la cantidad de cloro que presenta el ciruelo es mínima y las diferencias significativas entre tratamientos aunque las hay son en términos muy bajos. Pero sí sería interesante resaltar que a pesar de que las cantidades de cloro son muy bajas, éste se comporta al igual que en el cynara disminuyendo su cantidad inicial después de los tratamientos.

El contenido en cloro en la biomasa de ciruelo es prácticamente nula y está muy por debajo de lo exigido en la norma que debe ser inferior al 0,02%, autores como Suárez *et al.* [122] obtuvieron resultados en su mayoría por debajo del 0,1 % e incluso valores de cero para pélets de poda de frutales y residuos forestales de pino.

La liberación de especies asociadas al cloro durante la combustión es la causa principal de la corrosión en la parrilla del dispositivo de combustión, además está bastante claro que el cloro facilita la liberación de K, causando problemas de ensuciamiento [132]. Por lo tanto, con el uso de biomasa de frutales se consigue evitar ese problema por carecer prácticamente de cloro en su composición.

Tabla 109. Contenido en cloro en biomasa de ciruelo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,0002 a	0,0001 b	0,0001 b	0,0001 a	0,0001 b
Sin cribar sin corteza	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0001 a	0,0002 a
T8	0,0002 a	0,0001 b	0,0001 b	0,0001 a	0,0001 b
T8 a 45°C	0,0002 a	0,0002 a	0,0001 b	0,0001 a	0,0001 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las figuras 68, 69, 70, 71, 72, 73 y 74 podemos observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de ciruelo sin tamizar, tamizada a 8 mm y tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C. Hay autores que afirman que está claro que las cenizas de la biomasa contienen nutrientes de las plantas como Ca, Mg, Na, K y P, pero el problema es si estos compuestos están en formas insolubles en agua (vidrio, silicatos o fosfatos) o en forma de sales [122].

En la figura 68 se puede observar cómo la concentración de calcio se encuentra principalmente en la corteza de la biomasa, pasando de tener hasta casi 5000 ppm en el material con corteza a menos de 2000 ppm en el material sin corteza. En el caso de los lavados vemos como para el material descortezado apenas tienen influencia en el contenido en Ca, mientras que en la biomasa con corteza en los primeros 5 minutos se produce una pequeña bajada en la concentración de Ca pero con el aumento del tiempo de lavado la concentración del mismo aumenta hasta volver prácticamente al valor inicial.

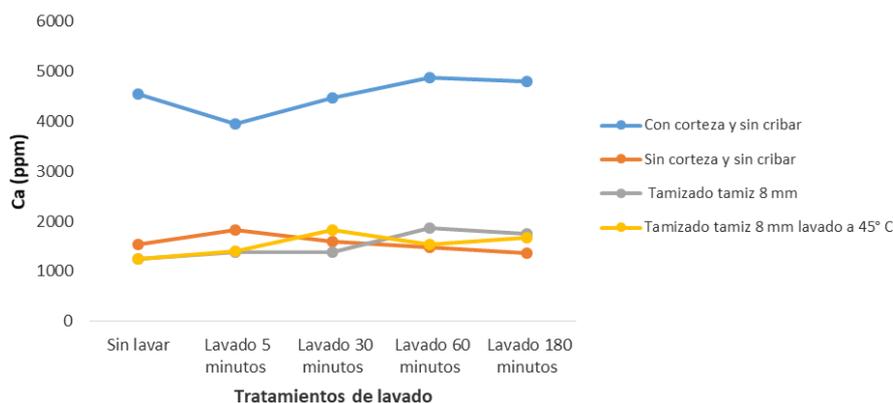


Figura 68. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de ciruelo.

A la hora de analizar el comportamiento del contenido de Fe en la biomasa de ciruelo con los distintos tiempos de lavado (figura 69), se puede decir que el comportamiento del mismo sigue dos líneas similares. Una sería para el material sin cribar con corteza y descortezado y la otra para el material descortezado y cribado con el tamiz 8 y tamiz 8 lavado a 45° C. En el primer caso se produce un incremento del contenido en Fe con los lavados de 5 y 30 minutos para posteriormente bajar su concentración con un lavado de 60 minutos y mantenerse constante hasta los 180 minutos. Por otro lado, en el segundo caso, la concentración de Fe sufre un ligero incremento con los distintos tiempos de lavado pero su comportamiento es prácticamente constante.

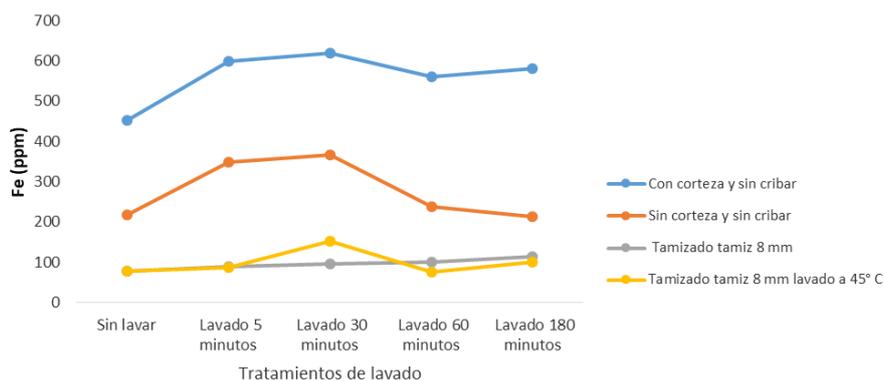


Figura 69. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de ciruelo.

En la figura 70 se advierte claramente como en todos los casos y con los distintos tiempos de lavados se consigue llevar la concentración de K (ppm) al mismo valor. Para el material con corteza y descortezado es donde se produce el mayor descenso en la

concentración de K, puesto que para los materiales tamizados el valor de partida es muy similar al conseguido al final del tratamiento. La disminución del contenido en K por el lavado de astillas fue justificado por varios autores [135,136], ya que se provocaba una desmineralización de la madera.

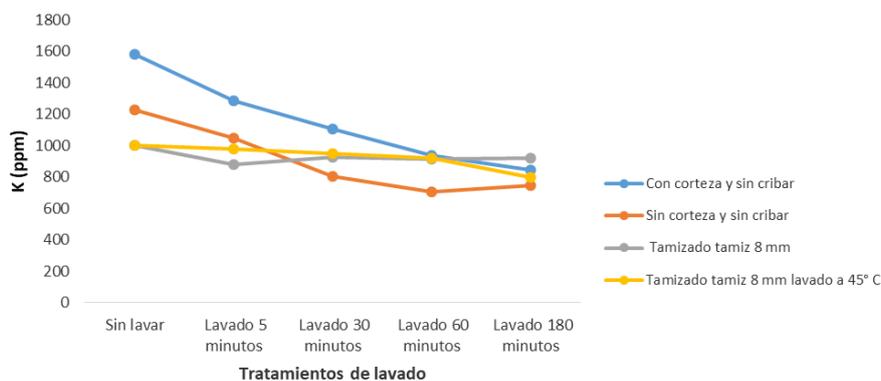


Figura 70. Contenido en K (ppm) de la biomasa de ciruelo.

En cuanto al contenido de Mg en la biomasa de ciruelo se puede decir que al igual que en los elementos comentados anteriormente, la mayor concentración del mismo se encuentra en la corteza (figura 71), y esto hace que la disminución de Mg sea más acentuada en el material con corteza que en el resto. También se puede afirmar que su comportamiento con los distintos lavados es muy variable sufriendo continuas bajadas y subidas con los tiempos de lavado.

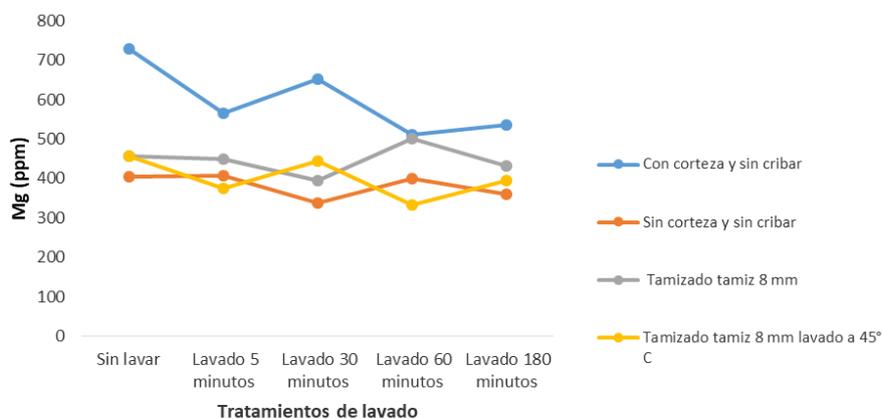


Figura 71. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de ciruelo.

En la figura 72 se muestra como con los lavados realizados a la biomasa de ciruelo se consigue una reducción del contenido en Na. Es importante resaltar que los mayores descensos en cuanto a la concentración de Na se producen por el descortezado de la biomasa y por el lavado de 5 minutos en el material con corteza. Los resultados obtenidos son similares al de autores como Tharakan *et al.* (2003) [137] que confirmaron que la mayor concentración de Na se encontraba en la corteza de la biomasa. Por otro lado la disminución en la concentración de Na también fue conseguida con el lavado de biomasa por otros autores [135,136].

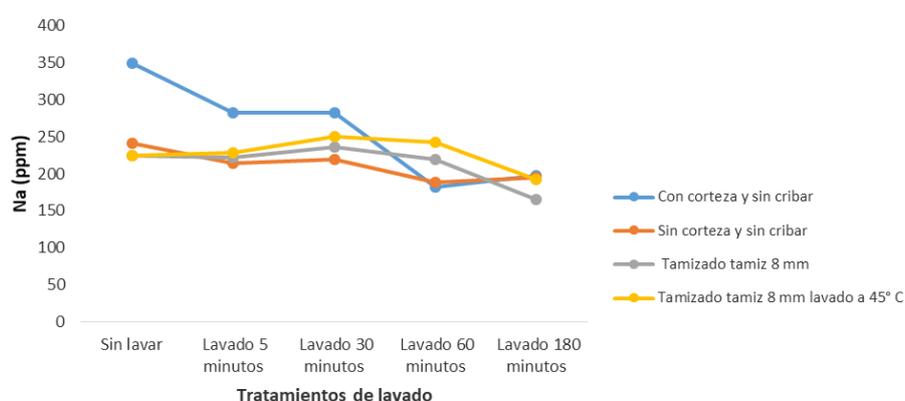


Figura 72. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de ciruelo.

Con los tratamientos de lavados realizados a la biomasa se puede conseguir una reducción de más de mitad del contenido en fósforo, este efecto se aprecia claramente en la figura 73 para el ciruelo con corteza y descortezado. En los demás casos la evolución del contenido en P es más variable e incluso para el material tamizado a 8 mm y lavado a 45° C se produce un ligero incremento a partir de los 30 minutos de lavado. La disminución en la concentración de fósforo también fue conseguida con el lavado de biomasa por otros autores [135,136].

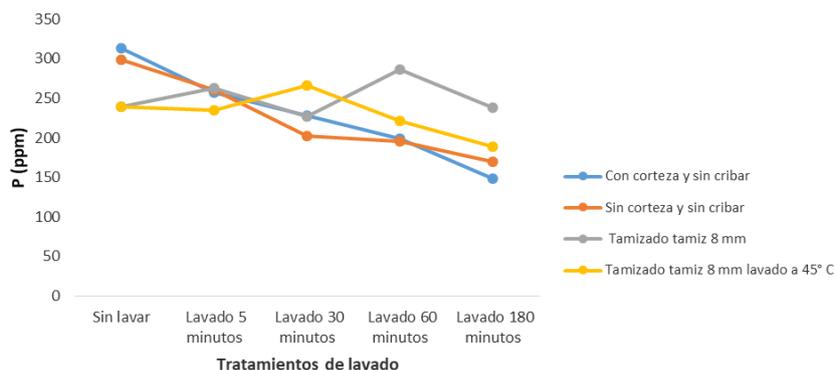


Figura 73. Contenido en P (ppm) de la biomasa de ciruelo.

En la figura 74 se observa una clara disminución en la concentración de aluminio entre la biomasa cribada y la que está sin cribar. En el caso de la biomasa cribada, los efectos de los lavados son mínimos, mientras que para el ciruelo con corteza los lavados provocan un incremento de la concentración de Al, para el material descortezado se produce el efecto contrario.

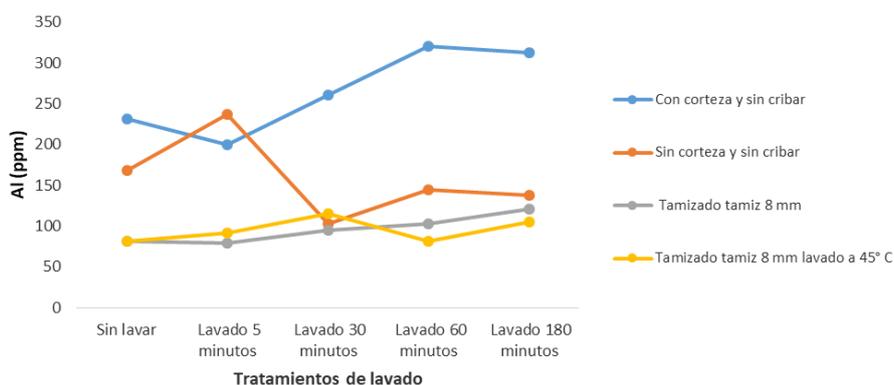


Figura 74. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de ciruelo.

5.2.5. Resultado de la temperatura de fusibilidad de cenizas.

La biomasa de ciruelo tiene los valores más bajo de cloro y potasio de las biombras leñosas estudiadas y del orden de 10 veces menor que la biomasa herbácea de cynara por lo que los posibles problemas de sinterización de las cenizas pueden ser considerados prácticamente nulos en calderas de combustión.

5.2.6. Resultados del poder calorífico.

En la figura 75 se puede ver como existen diferencias significativas entre los tratamientos que llevan un cribado y lavado de la biomasa y los que no. En el caso del material con corteza y el descortezado no hay diferencias significativas entre ellos, al igual que tampoco hay diferencias por lavar el material cribado con más o menos temperatura. Es importante destacar que con el cribado y lavado de la biomasa se consigue un incremento del PCS y PCI de la biomasa de ciruelo. Hay autores [132] que indican que el poder calorífico de la biomasa se reduce con un mayor contenido en cenizas, hecho que justificaría los resultados del material cribado que tiene menor % de cenizas que el resto, pero no se cumpliría en el caso del material con corteza y el descortezado. Por otro lado, según algunos autores el poder calorífico está relacionado con el contenido en lignina y extraíbles (grupo de compuestos que afectan a la calidad de la madera). En general la madera contiene un 20-40% de lignina en base a su peso [138]. Bueno *et al.* (2012) [132] confirman que una de las últimas líneas de investigación está destinada a estudiar la influencia de la celulosa, hemicelulosa y lignina respecto a propiedades como el poder calorífico. No obstante aseguraban que “el poder calorífico es más alto cuanto mayor es la lignina y extraíbles, porque contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa)”.

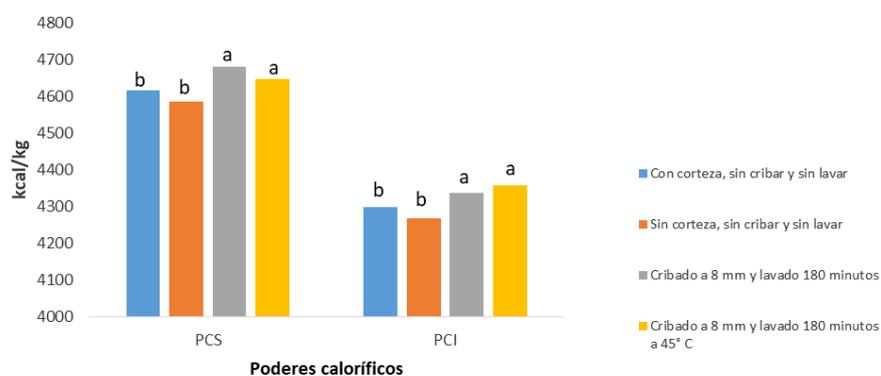


Figura 75. Poder calorífico en biomasa de ciruelo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.2.7. Caracterización de los pélets de ciruelo.

A continuación en las tablas 110 y 111 se pueden ver los resultados de la caracterización de los pélets de biomasa de ciruelo con corteza y descortezado. El objetivo principal de

la presente tesis es el poder conseguir unos pélets de máxima calidad a partir de los residuos de poda de ciruelo, olivo, paulownia y cardo. Para determinar si los pélets fabricados eran de máxima calidad se les realizó una comparación con los parámetros de calidad exigidos por la norma UNE.-ISO 177225. A continuación se indican los valores exigidos por la norma en determinados parámetros:

Como se puede apreciar en la tabla 110, los pélets de poda de ciruelo cumplen con los requisitos establecidos en la norma a excepción del contenido en cenizas ($1,03 \leq 0,7 \%$). Para el tipo A1 los resultados obtenidos del contenido en cenizas son algo inferiores a los obtenidos por otros autores [122] que fueron de 1.44% para pélets de poda de árboles frutales de Extremadura y bastante más bajos que el obtenido por Bilandzija et al. (2012) [98] para la poda de ciruelo (3,89%).

Tabla 110. Caracterización de los pélets de ciruelo con corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de ciruelo con corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	1,03	No
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.349	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,18	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,02	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	97,5	Si

Una vez analizados los pélets con corteza y tras el estudio realizado anteriormente con el descortezado de la biomasa de ciruelo que confirmaba el descenso en el contenido en cenizas, se ha optado por realizar un peletizado de la biomasa descortezada. Los resultados obtenidos (tabla 111) han corroborado lo obtenido en el estudio consiguiendo reducir el porcentaje de cenizas al exigido por la norma 17225 (0,7%). Además del

contenido en cenizas se han reducido otros parámetros importantes de calidad como es el contenido en S, importante para la reducción de emisiones de SO₂ en la combustión de los pélets. Por otro lado, y en este sentido de forma negativa, se ha comprobado que al eliminar la corteza se ha reducido el % de durabilidad de los pélets, bajándolo por debajo del límite de la norma e impidiendo catalogarlo como A1.

Tabla 111. Caracterización de los pélets de ciruelo sin corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de ciruelo sin corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	≤ 0,7	0,7	Si
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4,232	Si
Nitrógeno	% en base seca	≤ 0,3	0,19	Si
Azufre	% en base seca	≤ 0,04	0,01	Si
Cloro	% en base seca	≤ 0,02	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	≥ 97,5	96,6	No

5.3. Discusión de resultados 3: Olivo (*Olea europea* L. var. *europaea*).

5.3.1. Resultados del cribado.

En la figura 76 se muestra cómo la biomasa recogida en la base o criba de menor tamaño tiene 7 veces más cenizas que el resto de tamaños de partículas obtenidas. Esta mayor acumulación de cenizas en las partículas de menor tamaño ya ha sido comentada en los casos anteriores.

Es muy importante resaltar (figura 76) que el comportamiento de la biomasa de olivo descortezada se ha comportado de la misma manera que el ciruelo descortezado, realizando la misma gráfica en ambos casos.

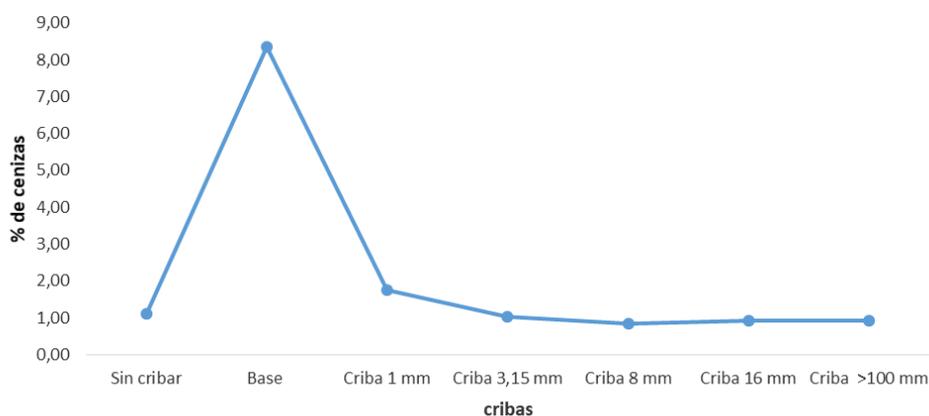


Figura 76. Resultados del % de cenizas en biomasa de olivo cribada.

En la figura 77 se puede ver cómo algo más del 40% de la biomasa de ciruelo cribada es recogida por el tamiz 3,15 mm seguido de la de 1 mm con un 25 % aproximadamente y a más distancia las demás cribas. La curva que sigue la evolución de los porcentajes de biomasa cribada es prácticamente igual a la del cardo y el ciruelo, si bien es verdad que los % de recogida del olivo son más parecidos al cardo.

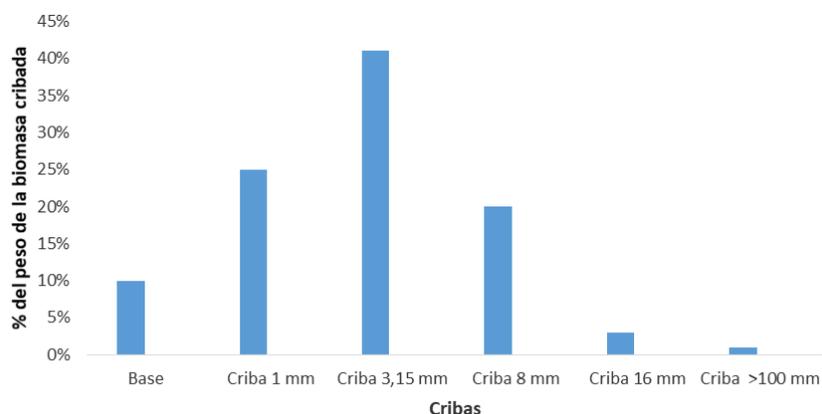


Figura 77. Resultado en % de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).

5.3.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 112 se pueden ver los valores medios en cuanto al contenido en cenizas de la biomasa de olivo tras los tratamientos de lavado, descortezado y cribado. Es muy importante resaltar que con los distintos tratamientos realizados a la biomasa se ha conseguido reducir el % de cenizas por debajo del exigido por la norma 17225 ($\leq 0,7\%$)

para pélets de máxima calidad (A1). De todos los resultados obtenidos, quizás los más recomendables serían el cribado a 3,15 y 8 mm con un lavado de 60 minutos puesto que se estaría por debajo del valor límite de la norma.

Observando la tabla 112 y la figura 78 se puede confirmar que el mayor porcentaje de cenizas se encuentra en la corteza de la biomasa y que eliminándola se consigue reducirla en más de la mitad del contenido inicial. Según Martínez *et al.* (2012) [126] la cantidad de cenizas de una biomasa viene determinada por el porcentaje de corteza que éste conlleve. La corteza está formada por polisacáridos, lignina, sustancias extractables y sustancias inorgánicas, y estas últimas no participan en la combustión y generan las cenizas.

La madera, generalmente, tiene un bajo contenido en cenizas, mientras que la corteza tiene considerablemente mayor contenido en cenizas, lo cual puede generar escorias en la caldera provocando una mayor demanda de mantenimiento. El alto contenido en cenizas genera más emisiones de partículas [127].

Los sistemas y estrategias de descortezado son utilizadas para incrementar el valor de la biomasa leñosa, separando madera y corteza en dos fuentes de productos de valor añadido [129]. La corteza separada puede ser usada como fuente de fibra, taninos, tintes, gomas, resinas, látex, productos alimenticios, saborizantes y productos medicinales. La corteza tiene alto contenido en extractivos tales como el ácido salicílico, con valor farmacéutico y puede ser aplicado como antiinflamatorio, antipirético y analgésico [139]. Un uso común de la corteza es como mantillo. La tasa de descomposición de la corteza es más lenta que la de la madera.

La figura 78 muestra la evolución del contenido en cenizas de la biomasa de olivo con los tiempos de lavados, en ella es importante observar que el material con corteza reduce el contenido en cenizas hasta los 60 minutos de lavado para posteriormente comenzar a incrementarlo ligeramente (180 minutos). Este incremento en el % de cenizas con el aumento del tiempo de lavado es comparable a lo sucedido con la biomasa de ciruelo, si bien es verdad que en este caso ha ocurrido en el último periodo de lavado y no a partir de los 5 minutos como en el ciruelo. Por otro lado, el contenido en cenizas en el material descortezado y cribado se comporta de una manera más estable, efecto mencionado por

otros autores en sus estudios [130]. Es muy importante indicar que a partir de los 60 minutos de lavado, el % de cenizas de las materias primas cribadas en todos sus formatos está por debajo del exigido en la norma de calidad de biocombustibles sólidos (0,7%).

Tabla 112. Resultados del % de ceniza en los distintos tiempos de lavado a la biomasa de olivo.

Criba	Sin lavar	Lavado 5 minutos	Lavado 30 minutos	Lavado 60 minutos	Lavado 180 minutos
Con corteza y sin cribar	2,01±0,07	1,47±0,07	1,45±0,03	1,14±0,04	1,25±0,17
Sin corteza y sin cribar	1,12±0,04	0,87±0,01	0,85±0,03	0,81±0,02	0,76±0,03
3,15 mm	1,04±0,03	0,85±0,02	0,79±0,01	0,66±0,01	0,72±0,01
8 mm	0,84±0,02	0,84±0,01	0,75±0,03	0,68±0,01	0,74±0,02
8 mm y lavado a 45°C	0,84±0,02	0,82±0,01	0,80±0,01	0,69±0,04	0,74±0,02

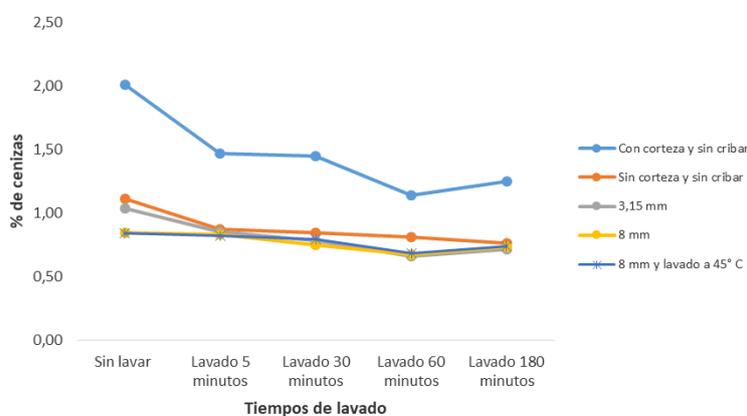


Figura 78. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.

Cuando se dispone de la biomasa de olivo en sus distintos formatos (con corteza, sin corteza, cribada a 3,15 y 8 mm) y no se le va a realizar el tratamiento de lavado (figura 79), lo más eficiente para la reducción del contenido en cenizas sería utilizar la biomasa tamizada a 8 mm con ambas temperaturas de lavado. Para un lavado de 5 minutos, el menor % de cenizas se obtendría con cualquiera de los formatos de biomasa descortezada, puesto que no presentan diferencias significativas entre ellos, únicamente el ciruelo con

corteza presenta un mayor % de cenizas (1,47%), y es diferente significativamente a los demás. En los casos de los lavados de 30 y 60 minutos, el % de ceniza en los distintos formatos de biomasa se comporta de la misma manera, con el olivo con corteza y descortezado ambos sin cribar siendo diferente significativamente entre ellos y los demás formatos, y no presentando diferencias significativas para el material cribado a 3,15, 8 mm y 8 mm con lavado a 45°C. Es muy importante indicar que en el caso del lavado de 60 minutos, el % de cenizas conseguido en los materiales cribados está dentro de la norma de calidad exigida ($\leq 0,7\%$). Si por otro lado se decide realizar un lavado de 180 minutos para reducir el % cenizas según la norma 17225, éste se comportaría igual que el lavado de 5 minutos pero con la gran diferencia de que en este caso si se consigue reducir el contenido en cenizas a lo exigido en la norma.

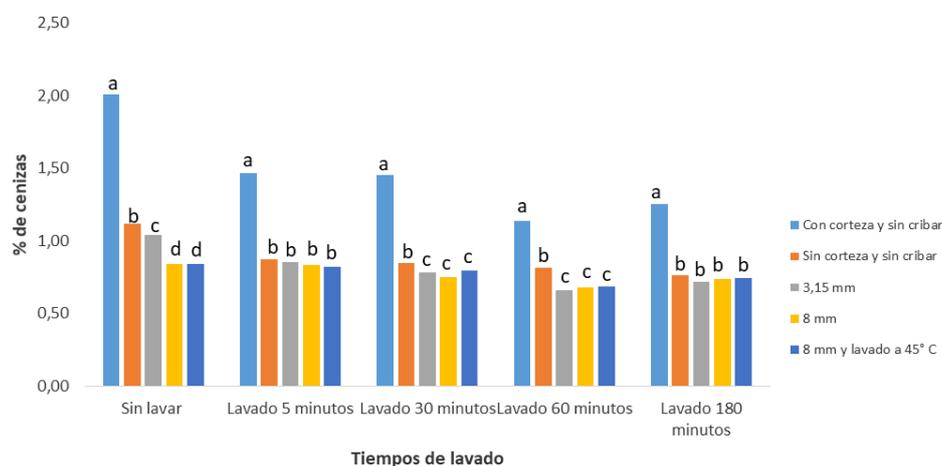


Figura 79. Contenido en cenizas de la biomasa de olivo con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 80 se muestra qué tiempo de lavado sería el más eficiente para reducir el % de cenizas por debajo del 0,7 % que nos marca la norma de calidad de los biocombustibles sólidos. Si se dispone únicamente de un material astillado, lo más adecuado sería realizar un lavado de 60 minutos porque a pesar de no estar por debajo del límite exigido en la norma, se estaría reduciendo el % de cenizas en casi un 50%. En el caso de disponer de un material descortezado, la mejor opción es realizar un lavado de 5 minutos porque a pesar de haber diferencias significativas con el de 180 minutos solo reducimos un 0,1 %. Cuando disponemos de material cribado (3,15, 8 y 8 mm con lavado a 45°C), el

tratamiento de lavado más efectivo y que consigue reducir el % de cenizas a lo exigido por la norma es el de 60 minutos.

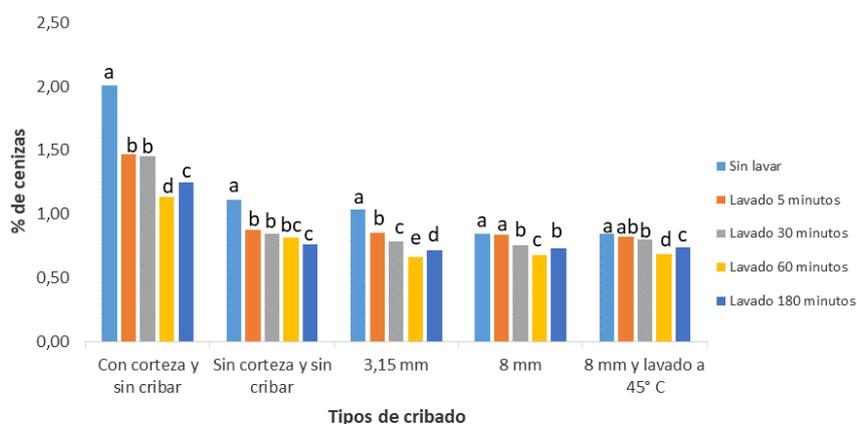


Figura 80. Contenido en cenizas de la biomasa de olivo con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.3. Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.

A continuación en este apartado se analizarán los resultados obtenidos del análisis elemental realizado a la biomasa de olivo en sus distintos formatos y tiempos de lavado.

En las tablas 113, 114, 115 y 116 se muestran los resultados medios del análisis elemental realizado a la biomasa de olivo, los cuales se irán analizando por separado en los siguientes subapartados.

Tabla 113. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo con corteza y sin cribar

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,23	48,1	6,17	0,02	0,0002
Lavado de 5 min	0,23	48,5	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 30 min	0,23	48,5	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,20	48,7	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 180 min	0,24	47,7	6,22	0,01	0,0002

Tabla 114. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza y sin cribar

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,20	47,3	6,27	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,20	47,7	6,24	0,01	0,0002
Lavado de 30 min	0,21	48,0	6,23	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,20	49,0	6,60	0,01	0,0002
Lavado de 180 min	0,20	46,5	6,17	0,01	0,0002

Tabla 115. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,16	48,2	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 30 min	0,17	48,1	6,16	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,18	48,1	6,22	0,01	0,0002
Lavado de 180 min	0,17	48,3	6,26	0,01	0,0001

Tabla 116. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de olivo sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,17	47,5	6,18	0,01	0,0002
Lavado de 5 min	0,15	48,1	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,15	47,9	6,17	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,18	49,1	6,21	0,01	0,0002
Lavado de 180 min	0,18	49,0	6,20	0,01	0,0001

5.3.3.1. Contenido en nitrógeno.

En la tabla 117 se muestra el resultado ANOVA y se puede observar que en todos los casos el tratamiento realizado (descortezado, cribado y lavado a 45°C) ha conseguido reducir el contenido de nitrógeno en la biomasa de olivo. Para la biomasa sin lavar se ha reducido de 0,23% del material de partida al 0,17% del tamizado a 8 mm y lavado a 45°C, en el lavado de 5 y 30 minutos se ha pasado de 0,23% a 0,15%, en el de 60 minutos se ha bajado la concentración de nitrógeno de 0,20 al 0,18%, y por último para el lavado de 180 minutos se ha reducido de un 0,24% a un 0,18%. Analizando la tabla 117 de forma global se puede apreciar como en todos los casos el tratamiento de tamizado en sus dos formatos han presentado diferencias significativas con la biomasa con corteza y con la descortezada. Por otro lado, al comparar los tratamientos de tamizado a 8 mm con diferente temperatura de agua se puede afirmar, que únicamente tiene influencia en el lavado de 30 minutos, pero que es tan poco el margen de reducción que conseguimos que no merece la pena gastar energía en el uso de agua caliente.

Tabla 117. Contenido en nitrógeno en biomasa de olivo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,23 a	0,23 a	0,23 a	0,20 a	0,24 a
Sin cribar sin corteza	0,20 b	0,20 b	0,21 a	0,20 a	0,20 b
T8	0,17 c	0,16 c	0,17 b	0,18 b	0,17 c
T8 a 45°C	0,17 c	0,15 c	0,15 c	0,18 b	0,18 c

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 81 se advierte claramente que el efecto de los lavados en la disminución del contenido en N es mínimo, ya que se están consiguiendo variaciones en el mayor de los casos de un 0,03%. Se podría destacar que en el caso del lavado a 60 minutos hay pequeñas variaciones de concentración de N, siendo estas variaciones de reducción para el material con corteza y descortezado y de aumento para los demás. Posteriormente, en el lavado de 180 minutos se vuelve prácticamente al valor inicial de N.

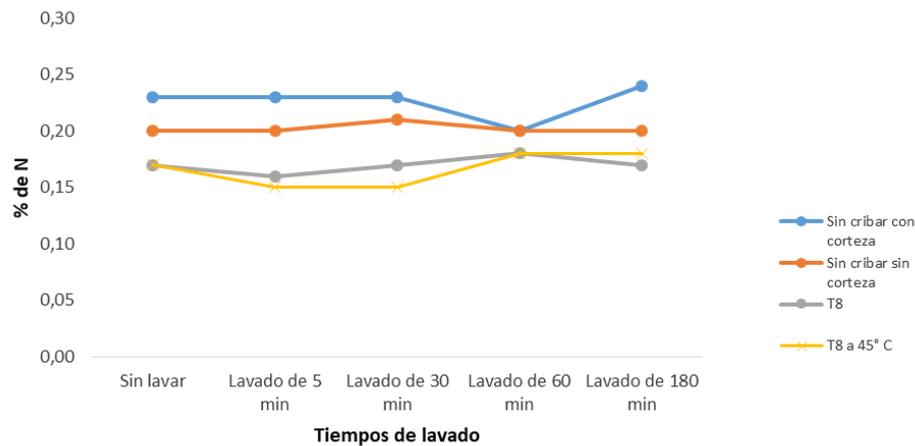


Figura 81. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada.

La figura 82 permite ver de forma clara las diferencias significativas que hay entre los distintos tiempos de lavados realizados a la biomasa de olivo. Para el caso del material con corteza, solamente se reduce el % de N de forma significativa si se lava durante 60 minutos, mientras que si el olivo es descortezado los lavados no tienen ninguna influencia en el contenido en nitrógeno. Si a la biomasa se le realiza además del descortezado un tamizado de 8 mm se conseguirá la mayor disminución del contenido en nitrógeno de forma significativa con el lavado de 30 y 60 minutos, tanto con el agua a 45°C.

En este estudio los valores de la biomasa de olivo están dentro del rango indicados por varios autores [73] y por debajo de los exigidos por la norma de calidad para pélets A1 (≤ 0.3 %), por lo tanto no habría problemas en su uso como biocombustible.

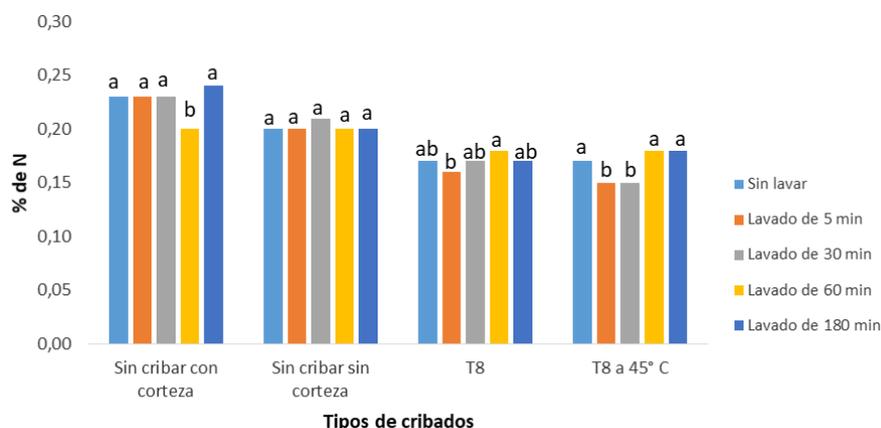


Figura 82. Contenido en nitrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.3.2. Contenido en carbono.

En la tabla 118 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizados al contenido de C en la biomasa de olivo, en ellos se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de materias primas utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 1%). El rango de valores de C obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 47,3 y el 49,1 %, estos valores son superiores a los obtenidos por otros autores [121] que indicaban valores para la poda de olivo de 45,36 %, pero están dentro de los valores dados por Telmo *et al* (2010) [73] para biomásas leñosas.

Al observar la tabla 118 no interesa ni descortezar ni cribar la biomasa a no ser que se vaya a realizar un lavado de 60 o 180 minutos, debido a que en estos últimos son los únicos casos donde se produce un pequeño incremento del contenido en carbono.

Tabla 118. Contenido en carbono en biomásas de olivo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	48,1 a	48,5 a	48,5 a	48,7 c	47,7 d
Sin cribar sin corteza	47,3 c	47,7 c	48,0 bc	49,0 b	48,5 b
T8	47,5 b	48,2 b	48,1 b	48,1 d	48,3 c
T8 a 45°C	47,5 b	48,1 b	47,9 c	49,1 a	49,0 a

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

Al observar la figura 83 se puede ver que la evolución del contenido en carbono con los distintos tiempos de lavado es de forma creciente conforme se incrementa el tiempo de lavado hasta los 60 minutos, a partir de este tiempo y hasta los 180 minutos el % de carbono empieza a decrecer excepto para la biomasa tamizada a 8 mm.

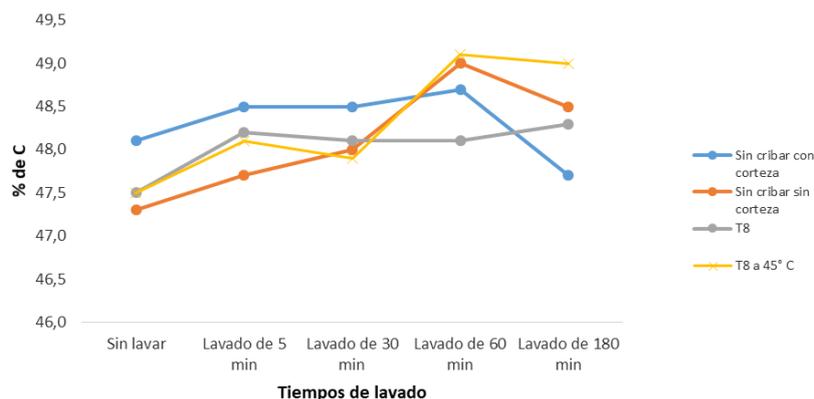


Figura 83. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de olivo lavada y cribada.

En la figura 84 se muestran las diferencias significativas que hay en el contenido en carbono entre los distintos lavados para cada tipo de biomasa de olivo que se ha analizado. Cuando se realiza solamente el astillado de la biomasa, el contenido de carbono presenta diferencias significativas en todos los casos a excepción de los lavados de 5 y 30 minutos, obteniéndose el mayor % de C con el lavado de 60 minutos y el menor con el lavado de 180 minutos. En el caso de la biomasa descortezada, el contenido en carbono es diferente significativamente en todos los lavados, marcando el mayor contenido en carbono a los 60 minutos de lavado y el menor sin lavar la biomasa. Si el material es tamizado a 8 mm, la menor concentración de carbono se obtendría sin lavar la biomasa. En el caso de que el olivo tamizado a 8 mm se lavase con el agua a temperatura de 45°C, se seguiría cumpliendo lo mismo que en el caso anterior para el menor contenido de carbono pero no en el de mayor concentración que sería para el lavado de 60 o 180 minutos.

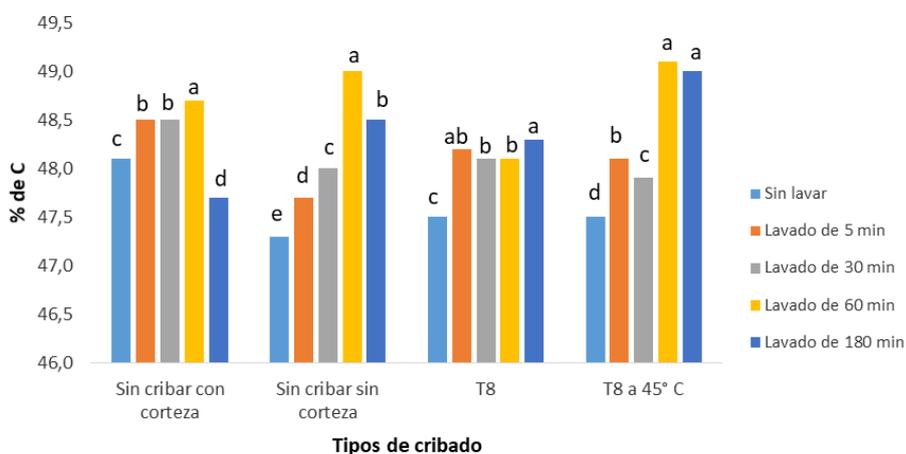


Figura 84. Contenido en carbono de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.3.3. Contenido en hidrógeno.

En la tabla 119 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizados al contenido de H en la biomasa de olivo. Se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de materias primas utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 0,16 %). El rango de valores de H obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 6,27 y 6,11 %, estos valores son algo inferiores a los obtenidos por otros autores en olivo [121] y a los obtenidos por Telmo *et al* (2010) [73].

El contenido en H sólo presenta diferencias significativas en el caso del olivo descortezado para la biomasa sin lavar y el lavado de 30 minutos. Para el lavado de 5 minutos el olivo con corteza y descortezado no presentan diferencias significativas entre ellos, pero sí con los demás tratamientos que a su vez son diferentes significativamente entre ellos. Por último, en el caso del lavado de 180 minutos el contenido en hidrógeno en todos los tratamientos es diferente significativamente entre ellos.

Tabla 119. Contenido en hidrógeno en biomazas de olivo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	6,17 b	6,24 a	6,16 b	6,24 a	6,22 b
Sin cribar sin corteza	6,27 a	6,24 a	6,23 a	6,20 b	6,17 d
T8	6,18 b	6,16 b	6,16 b	6,22 a	6,26 a
T8 a 45°C	6,18 b	6,11 c	6,17 b	6,21 b	6,20 c

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

A la hora de analizar la evolución del contenido de H con los tiempos de lavado, se puede apreciar en la figura 85 que únicamente el olivo sin corteza sigue una tendencia constante de bajada del contenido en hidrógeno. En cambio en todos los demás casos al final del proceso de lavado se produce un ligero incremento en su contenido.

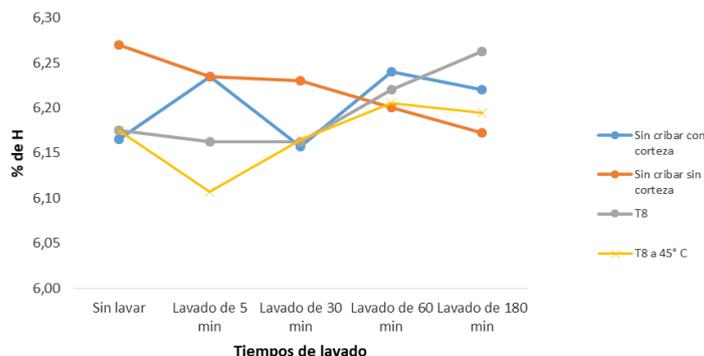


Figura 85. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada.

En la figura 86 se muestran las diferencias significativas que presenta el contenido de H en los distintos tiempos de lavado para cada tipo de biomasa. En el olivo con corteza, el menor contenido de hidrógeno se encuentra en el material sin lavar o lavado a 30 minutos no habiendo diferencias significativas entre ellos, pero sin con el resto de lavados. En el caso del material descortezado el mayor contenido de H se encuentra cuando no lavamos la biomasa y el menor al lavarla durante 180 minutos, en ambos casos la diferencia es significativa con los demás casos. Por otro lado, cuando se tamiza la biomasa de olivo a 8 mm y se realizan los lavados, la cantidad de hidrógeno es significativamente diferente entre todos los lavados a excepción de los lavados de 5 y 30 minutos. En este caso, la mayor cantidad de hidrógeno se encuentra después del lavado de 180 minutos y la menor en los lavados de 5 y 30 minutos. Por último, cuando lavamos el olivo tamizado a 45°C la menor cantidad de H se encuentra en el lavado de 5 minutos de manera diferente a todos los demás y la mayor cantidad de H en la biomasa estaría en los lavados de 60 y 180 minutos que no presentan diferencias significativas entre ellos.

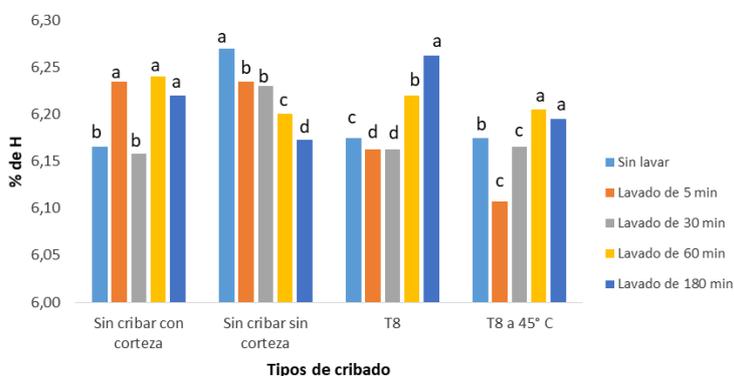


Figura 86. Contenido en hidrógeno de la biomasa de olivo lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.3.4. Contenido en azufre.

En la tabla 120 se muestran los valores del contenido en azufre en la biomasa de olivo para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar la cantidad de S que presenta el olivo es mínima y por tanto no hay diferencias en cada uno de los tratamientos.

Los niveles de azufre obtenidos en este estudio están por debajo a los obtenidos por otros autores [121,140] y dentro del rango dado por Vassilev *et al.* (2010) [133]. La diferencia de contenido en S con otros autores puede ser debido a la variación del contenido de minerales de la biomasa e incluso a la influencia en el abonado del cultivo. En todo caso, los tratamientos están por debajo del 0,04 % exigido por la norma de clasificación de biocombustibles de calidad, por la tanto las emisiones de SO₂ que puedan generar la combustión de la biomasa de olivo va a ser mínima o nula.

Tabla 120. Contenido en azufre en biomasa de olivo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,02 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
Sin cribar sin corteza	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
T8	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
T8 a 45°C	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.3.5. Contenido en cloro.

En la tabla 121 se observan los valores del contenido en cloro en la biomasa de olivo para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar, la cantidad de Cl que presenta el olivo, al igual que el ciruelo, es mínima y las diferencias significativas entre tratamientos aunque las hay son en términos muy bajos.

El contenido en cloro en la biomasa de olivo es prácticamente nula y está muy por debajo de lo exigido en la norma que debe ser inferior al 0,02%. Autores como Suárez *et al.* (2015)[122] obtuvieron resultados en su mayoría por debajo del 0,1 % e incluso valores de cero para pélets de poda de frutales y residuos forestales de pino.

Tabla 121. Contenido en cloro en biomasa de olivo

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a
Sin cribar sin corteza	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a
T8	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0001 b
T8 a 45°C	0,0002 a	0,0001 a	0,0002 a	0,0002 a	0,0001 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las figuras desde la 87-93 se pueden observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de olivo con corteza y descortezado sin tamizar, tamizada a 8 mm y tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

Respecto al contenido en calcio de la biomasa de olivo, se puede ver en la figura 87 que su comportamiento con los distintos tiempos de lavado es similar al de la biomasa de ciruelo. En ambos casos la mayor concentración del mismo se encuentra en la corteza, por tanto con solo eliminarla ya estamos consiguiendo reducirlo de forma considerable. También se puede observar con la evolución de la figura que se consigue reducir el contenido de Ca más por los procesos de descortezado y tamizado que por los lavados, ya que la concentración del Ca del material sin lavar y del lavado a 180 minutos apenas tiene variación. Quizás en el caso de la biomasa sin corteza y la tamizada a 8 mm lavada a 45° C sería interesante el lavado de 5 minutos para reducir el contenido en Ca, debido a que en esos tratamientos si se puede ver una reducción acusada del Ca (aproximadamente 500 ppm).

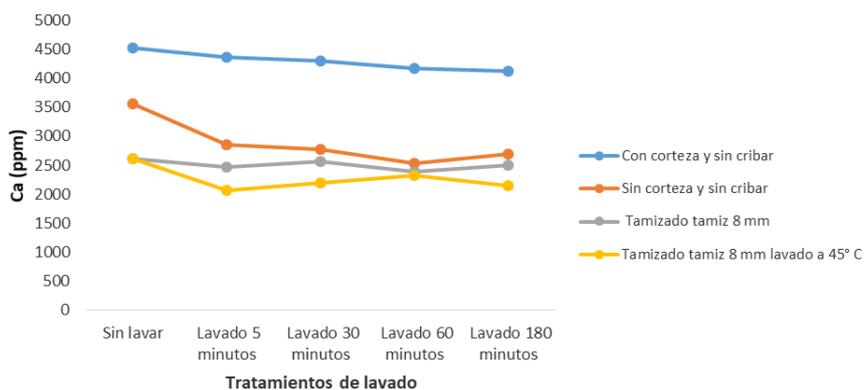


Figura 87. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de olivo.

En la figura 88 se advierte que el comportamiento del Fe con los distintos tratamientos de lavado es muy variable en todas las muestras a excepción del olivo descortezado y sin cribar. Los tratamientos prolongados en el tiempo no son nada interesantes para la reducción del contenido en Fe de la biomasa de olivo porque la concentración del mismo apenas varía después de 180 minutos. Únicamente se consigue una reducción de la concentración del Fe después de un lavado de 5 minutos y en menor medida con el descortezado y cribado de la biomasa.

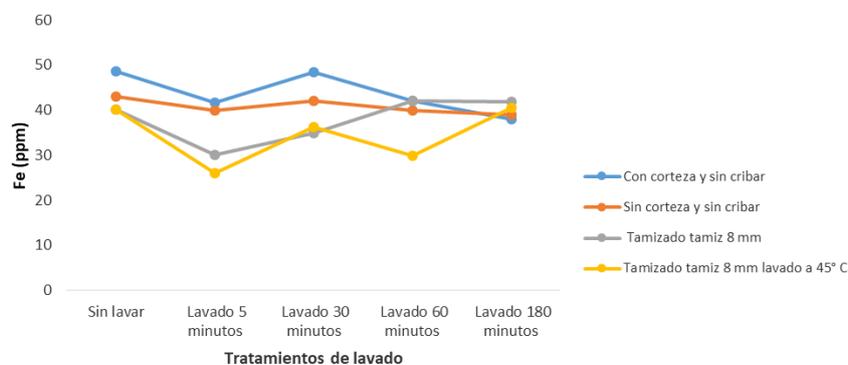


Figura 88. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de olivo.

El efecto que producen los distintos tiempos de lavado en la concentración de K en la biomasa de olivo son claramente identificables en la figura 89. En ella se aprecia claramente una reducción constante del mismo con el aumento del tiempo de lavado, llegando a ser al final de los 180 minutos de aproximadamente 1000 ppm.

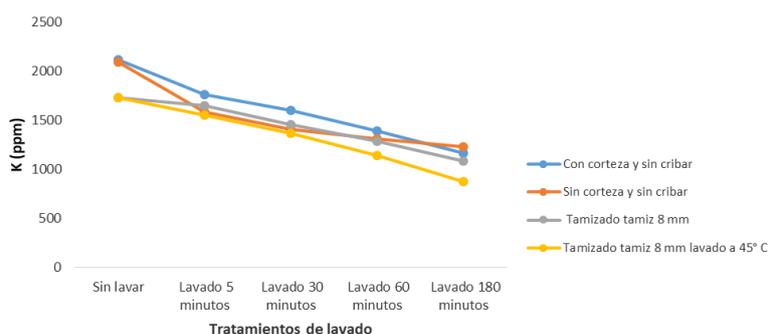


Figura 89. Contenido en K (ppm) de la biomasa de olivo.

Observando la figura 90 se aprecia que únicamente en el material tamizado a 8 mm y lavado con una temperatura del agua a 45° C la concentración de Mg va disminuyendo conforme se van aumentando los minutos de lavado, a excepción del tramo entre 30 y 60 minutos que se produce un ligero incremento de su concentración. En los casos de la biomasa de olivo con corteza sin cribar y descortezada cribada a 8 mm lo recomendable para la bajada del contenido en Mg es realizar lavados de 5 minutos, puesto que a partir de ese tiempo la concentración del mismo es igual o incluso superior. Por último, para el material descortezado sin cribar se ve claramente que los lavados no deben superar los 30 minutos de tiempo porque a partir de ese momento se produce un incremento en el contenido de Mg.

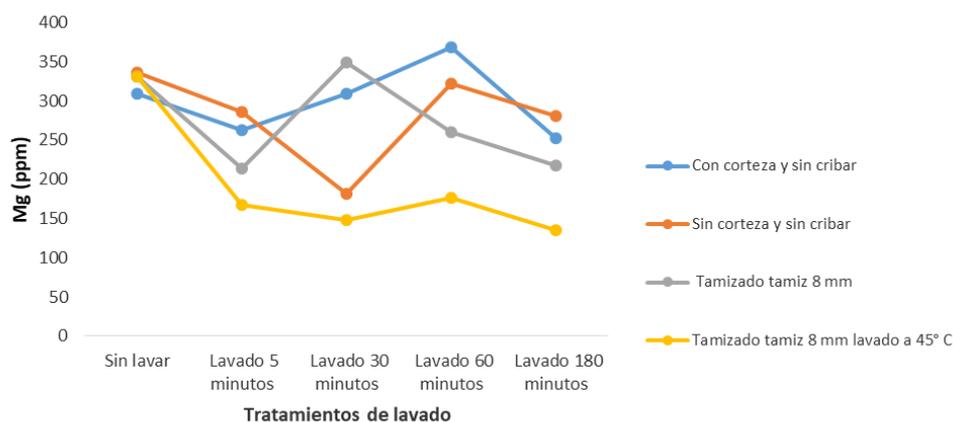


Figura 90. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de olivo.

A la hora de analizar el comportamiento de la concentración de sodio en la biomasa de olivo con los distintos tiempos de lavado (figura 91), se puede decir que en todos los casos se produce una disminución del contenido de sodio con los lavados de 5 y 180 minutos. Observando la figura se podría afirmar que los dos tratamientos de lavado más efectivos

para la reducción del Na en la biomasa de olivo serían el de 5 minutos para la biomasa tamizada a 8 mm lavada a 45° C y el de 30 minutos para el material descortezado y sin tamizar.

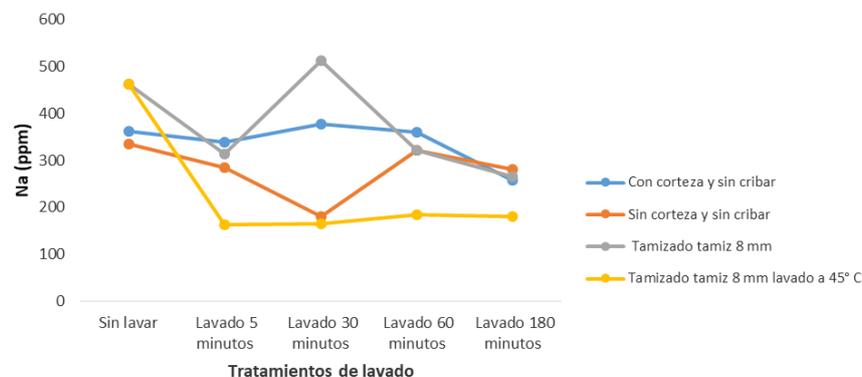


Figura 91. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de olivo.

En la figura 92 se puede ver que los mayores descensos en el contenido de P de la biomasa de olivo se consiguen con los lavados del material tamizado, por el contrario tanto el material con corteza como el descortezado apenas sufre una reducción de su contenido en fósforo después de los lavados.

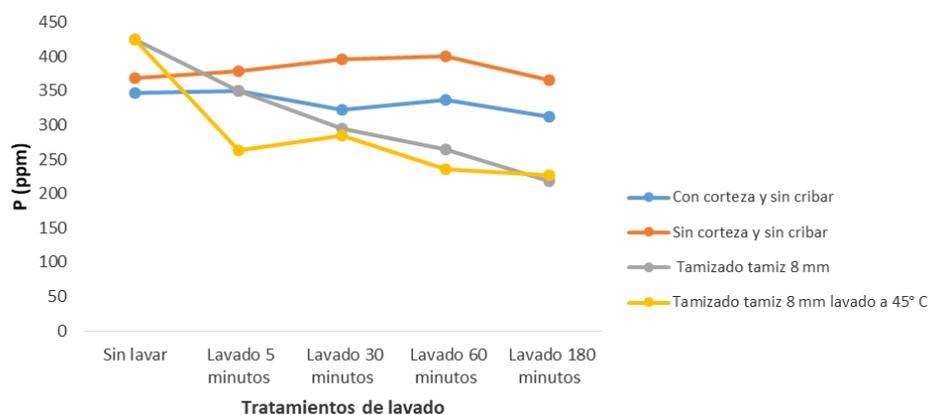


Figura 92. Contenido en P (ppm) de la biomasa de olivo.

En la figura 93 se muestra que el mayor contenido de Al de la biomasa de olivo se encuentra en la corteza y que con el tamizado de la misma se consigue reducirlo cinco veces. Los tratamientos de lavado son efectivos en el material con corteza y en el descortezado, para el material tamizado a 8 mm es indiferente el lavado y para el tamizado

a 8 mm con lavado a 45° C se produce un incremento de la concentración de Al de 60 a 180 minutos.

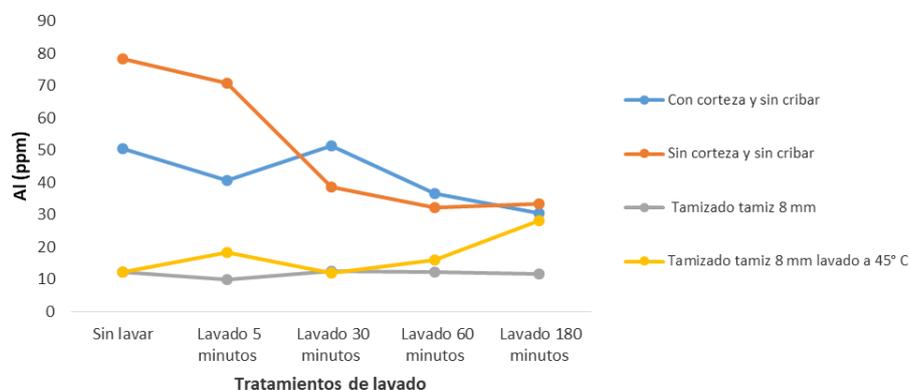


Figura 93. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de olivo.

5.3.5. Resultados de la temperatura de fusión de cenizas.

A continuación se muestran los resultados del estudio para la determinación de la temperatura de fusión de las cenizas (°C) de biomasa de olivo. Los análisis se han realizado a muestras de olivo descortezado y tamizado a 8 mm con un lavado de 180 minutos en agua desionizada a una temperatura de aproximadamente 25°C.

- T de deformación inicial..... 1.357 °C
- T de reblandecimiento..... 1.444 °C
- T de hemisferio..... >1.500
- T de fluidez..... >1.500

La temperatura de fusibilidad de cenizas es aquella a la cual las cenizas se funden y se pueden quedar adheridas sobre determinadas partes de la caldera, siendo principalmente la zona de la parrilla y del cenicero. Esto puede provocar un mal funcionamiento de la caldera y un aumento en los costes de limpieza.

Observando los resultados obtenidos con la biomasa de olivo, se puede afirmar que la biomasa de olivo no presentaría problemas de fusibilidad ya que su temperatura de fluidez se encuentra por encima de los 1.500°C y las temperaturas óptimas de las cámaras de combustión en las calderas de biomasa suelen estar entre 600 y 900°C.

5.3.6. Resultados del poder calorífico.

En la figura 94 se puede ver que el mayor poder calorífico se consigue con el material cribado a 8 mm y lavado a 45°C (4.672 kcal/kg) seguido del olivo con corteza y sin cribar (4.631 kcal/kg). En ambos casos no existen diferencias significativas entre ellos. Por otro lado, la biomasa de olivo descortezada y sin cribar es la que tiene el poder calorífico más bajo (4.543 kcal/kg) además de ser diferente significativamente a todas las demás.

Una vez analizados los resultados se puede apreciar como los valores de PCI en todos los casos están por encima del exigido por la norma de calidad 17225 (4.000 kcal/kg). Los valores obtenidos están dentro del amplio intervalo establecido por IDAE 2007 y 2009 [30,141], que para biomasa de olivo está entre 2.890 kcal/kg y 4.700 kcal/kg. Así mismo, otros autores [142] obtuvieron resultados similares para el PCS.

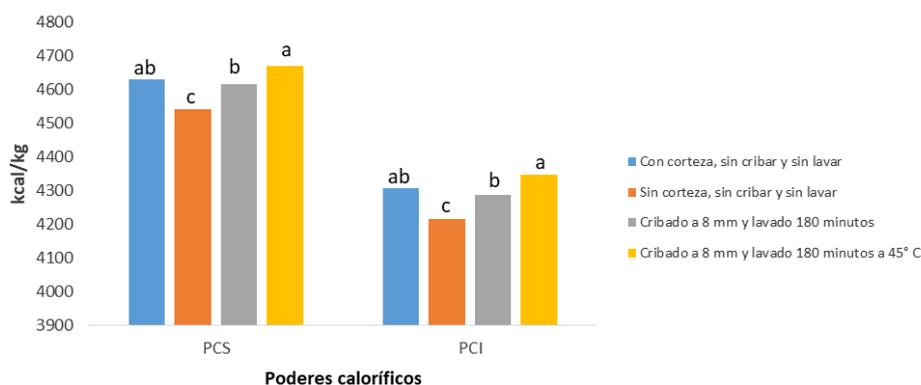


Figura 94. Poder calorífico en biomasa de olivo. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.3.7. Caracterización de los pélets de olivo.

En las tablas 122 y 123 se pueden ver los resultados de la caracterización de los pélets de biomasa de olivo con corteza y descortezado. El objetivo principal de la presente tesis es el poder conseguir pélets de máxima calidad a partir de los residuos de poda de olivo y otras biomásas. Para determinar si los pélets fabricados eran de máxima calidad se les realizó una comparación con los parámetros de calidad exigidos por la norma UNE-ISO

17225. A continuación se indican los valores exigidos por la norma en determinados parámetros.

Como se puede apreciar en la tabla 122, los pélets de poda de olivo cumplen con los requisitos establecidos en la norma a excepción del contenido en cenizas ($1,06 \geq 0,7 \%$). Los resultados obtenidos del contenido en cenizas son algo inferiores a los obtenidos por otros autores [142] que fueron de 1,5% para residuos de poda de olivo y bastante más bajo que el obtenido por *Fernández-Puratich et al.* (2012) que fue de 2,4% [140]. Esta variabilidad en el contenido en cenizas de la madera puede venir influenciada por factores como el clima, época del año, tipo de suelo, parte del árbol utilizada, y de la presencia de otros contaminantes como tierra y piedras [143].

Tabla 122. Caracterización de los pélets con corteza de olivo.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de olivo con corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	1,06	No
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.313	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,22	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,02	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	98,1	Si

Una vez analizados los pélets con corteza y tras el estudio realizado anteriormente con el descortezado de la biomasa de olivo que confirmaba el descenso en el contenido en cenizas, se ha optado por realizar un peletizado de la biomasa descortezada. Los resultados obtenidos (tabla 123) no han conseguido reducir lo suficiente el porcentaje de cenizas a lo exigido por la norma 17225 (0,7%). Además del contenido en cenizas se han reducido otros parámetros importantes de calidad como es el contenido en S, importantísimo para la reducción de emisiones de SO₂ en la combustión de los pélets. Por

otro lado, al eliminar la corteza de la biomasa de olivo se ha producido una reducción de la durabilidad de los pélets pasando de 98,1 a 97,8 %. Esta reducción también ocurrió en la biomasa de ciruelo pero para el olivo la durabilidad se mantiene por encima de lo exigido por la norma ($\geq 97,5$ %).

Tabla 123. Caracterización de los pélets de olivo sin corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de olivo sin corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	0,88	No
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.232	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,2	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,01	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	97,8	Si

5.4. Discusión de resultados 4: *Paulownia (Paulownia Tomentosa)*.

5.4.1. Resultados del cribado.

En la figura 95 se vuelve a mostrar claramente que el mayor % de cenizas se encuentra en la base de recogida del cribado de la biomasa. La biomasa recogida en la base o criba de menor tamaño tiene un contenido 5 veces superior de cenizas que todos los demás tamaños de partículas obtenidas. Esto puede ser atribuido a dos razones principales. Primera, los diferentes tejidos de las plantas tienen diferentes contenidos en cenizas. Segundo, la ceniza proveniente del exterior puede venir del suelo y la arena durante la operación de cosecha, manejo y almacén, y estas cenizas tienden a estar en la fracción fina cuando se muele la biomasa. Es muy importante resaltar que la biomasa de paulownia descortezada se ha comportado de la misma manera que el ciruelo y el olivo descortezados cómo se puede apreciar en las figuras 57 y 76.

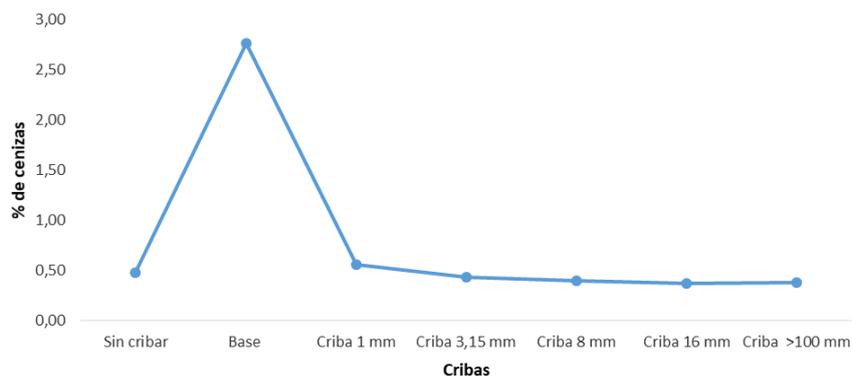


Figura 95. Resultados del % de cenizas en biomasa de paulownia cribada.

En la figura 96 se puede ver que algo más del 40% de la biomasa de paulownia cribada es recogida por el tamiz 3,15 mm seguido de la de 1 mm con un 28 % aproximadamente y con porcentajes menores del peso total las demás cribas. La curva que sigue la evolución de los porcentajes de biomasa cribada es prácticamente igual a las demás biomazas estudiadas, siendo la criba de 3,15 mm la que recoge el mayor porcentaje de biomasa. De todas las especies estudiadas, el olivo es el que mayor % de biomasa recoge en la criba 3,15 mm con un poco más del 50%.

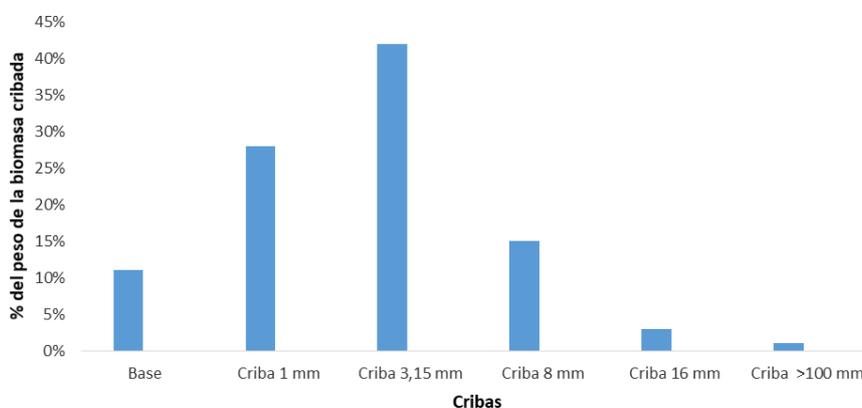


Figura 96. Resultado en % en peso de la biomasa cribada por criba respecto al total (100%).

5.4.2. Resultados del tratamiento de lavado a distintos tiempos.

En la tabla 124 se pueden ver los valores medios en cuanto al contenido en cenizas de la biomasa de paulownia tras los tratamientos de lavado, descortezado y cribado. Es muy importante resaltar que con los distintos tratamientos realizados a la biomasa se ha conseguido reducir el % de cenizas por debajo del exigido por la norma 17225 ($\leq 0,7\%$)

para pélets de máxima calidad (A1). De todos los tratamientos realizados el más eficiente sin lugar a dudas es el descortezado de la biomasa, con el que se consigue reducir el % de cenizas en un 60 % aproximadamente. Esto confirma los resultados obtenidos por otros autores como Filbakk *et al* (2011) [44] que encontraron un contenido de cenizas cinco veces superior en la corteza que en la madera descortezada.

El % de cenizas obtenido para la biomasa de paulownia con corteza y cribada (1,35 %) está dentro de los valores obtenidos por otros autores. Así pues Kasamaki (2007) [94] obtuvo valores que oscilaron entre 1,1 % y 1,5 %, para Latorre y Ruano (2009) [95] estuvieron entorno al 2 %, Muñoz (2007) [144] obtuvo un porcentaje de cenizas de 1,7 % y Fenández-Puratich *et al.* (2014) [140] un 1,2 %.

Tabla 124. Resultado del % en peso de ceniza en los distintos tiempos de lavado en la biomasa de paulownia.

Criba	Sin lavar	Lavado 5 minutos	Lavado 30 minutos	Lavado 60 minutos	Lavado 180 minutos
Con corteza y sin cribar	1,35±0,04	0,61±0,05	0,82±0,03	0,86±0,05	0,69±0,05
Sin corteza y sin cribar	0,48±0,07	0,43±0,02	0,39±0,01	0,39±0,02	0,36±0,04
3,15 mm	0,43±0,03	0,43±0,02	0,41±0,02	0,42±0,01	0,42±0,01
8 mm	0,40±0,01	0,38±0,01	0,37±0,01	0,40±0,01	0,37±0,03
8 mm y lavado a 45°C	0,40±0,01	0,33±0,01	0,32±0,05	0,29±0,01	0,25±0,01

La figura 97 muestra la evolución del contenido en cenizas de la biomasa de paulownia con los tiempos de lavado, en ella es importante observar que el material con corteza reduce el contenido en cenizas en los primeros 5 minutos de lavado para posteriormente comenzar a incrementar ligeramente hasta los 60 minutos y volver a reducir a los 180 minutos. Este incremento en el % de cenizas con el aumento del tiempo de lavado es comparable a lo sucedido con la biomasa de ciruelo y olivo, los cuales también tuvieron fases de incremento del contenido en cenizas. Por otro lado, el contenido en cenizas en el material descortezado y cribado se comporta con la misma estabilidad que en ciruelo y olivo, lo que corrobora lo indicado en esos apartados. Es muy importante indicar que todo

el material descortezado está muy por debajo del límite exigido por la norma y que con un lavado de solo 5 minutos conseguimos bajar de ese límite en el material con corteza.

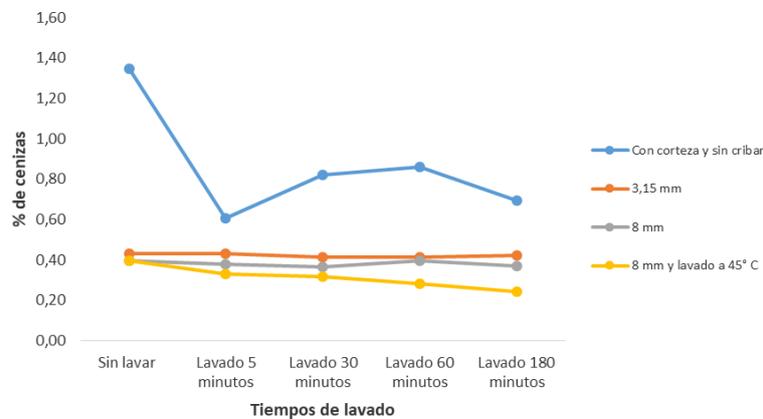


Figura 97. Evolución del contenido en cenizas con los distintos lavados.

Analizando la figura 98 se puede obtener la información necesaria para saber en función del tipo de lavado que se le aplique a la biomasa de paulownia, cual es la mejor forma de transformarla para reducir al máximo el % de cenizas. Es importante resaltar que independientemente de que haya diferencias significativas o no entre los distintos tipos de biomasa a la hora de lavarla, siempre la paulownia descortezada va a cumplir con el % de cenizas exigido por la norma 17225 ($\leq 0,7\%$). Por otro lado y no menos importante que lo comentado anteriormente, es destacar que con el lavado de 5 y 180 minutos se consigue reducir el % de cenizas por debajo de 0,7% para la paulownia con corteza. Con el lavado de 180 minutos a 45°C para el material tamizado a 8 mm se consigue el % de cenizas más bajo de todos los tratamientos (0,25%).

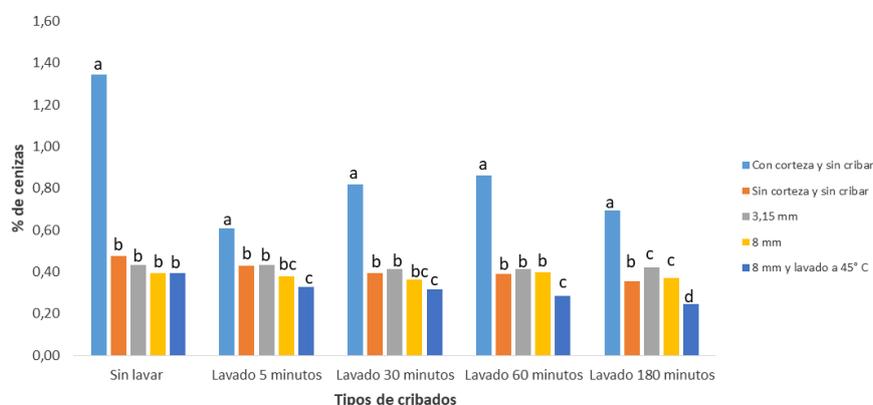


Figura 98. Contenido en cenizas de la biomasa de paulownia con distintos lavados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 99 se muestra claramente como para la biomasa cribada a 3,15 y 8 mm los tratamientos de lavado no presentan diferencias significativas entre ellos para reducir el % de cenizas. En el caso de la paulownia con corteza, el material sin lavar es el único diferente significativamente a los demás, puesto que los de 5 y 180 minutos por un lado y de 30 y 60 por otro no presentan diferencias significativas entre ellos pero si con los demás lavados.

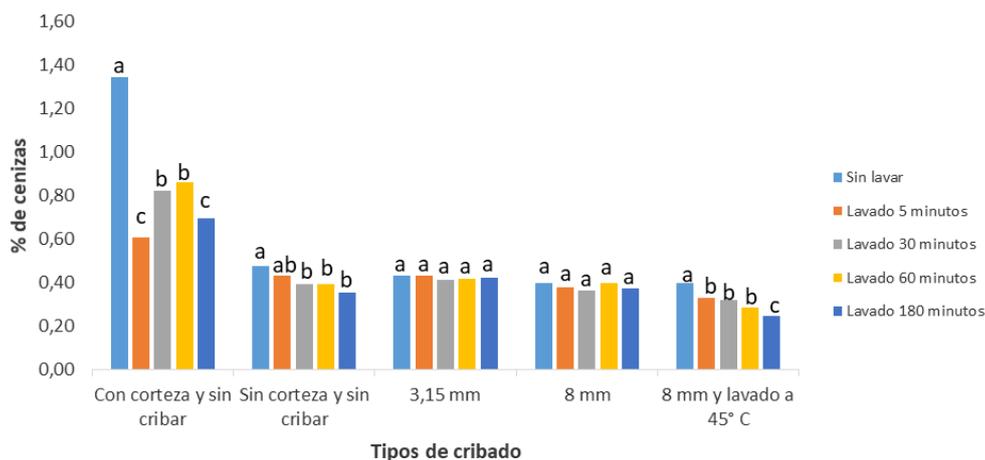


Figura 99. Contenido en cenizas de la biomasa de paulownia con distintos cribados. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.3. Resultados del análisis elemental (N, C, H y S) y contenido en Cl.

A continuación en este apartado se analizarán los resultados obtenidos del análisis elemental realizado a la biomasa de paulownia en sus distintos formatos y tiempos de lavado.

En las tablas 125, 126, 127 y 128 se muestran los resultados medios del análisis elemental realizado a la biomasa de paulownia, los cuales se irán analizando por separado en los siguientes subapartados.

Tabla 125. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia con corteza y sin cribar.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,26	49,0	6,27	0,03	0,0001
Lavado de 5 min	0,22	49,0	6,23	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,21	49,0	6,22	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,21	49,0	6,25	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,23	49,6	6,31	0,01	0,0001

Tabla 126. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza y sin cribar.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,08	49,1	6,25	0,01	0,0001
Lavado de 5 min	0,11	48,5	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,11	48,2	6,13	0,01	0,0002
Lavado de 60 min	0,10	48,2	6,05	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,11	48,4	6,15	0,01	0,0002

Tabla 127. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,06	47,9	6,18	0,01	0,0001
Lavado de 5 min	0,06	48,0	6,15	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,06	47,7	6,19	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,07	47,3	6,26	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,06	47,0	6,30	0,01	0,0001

Tabla 128. Análisis elemental y contenido en cloro en biomasa de paulownia sin corteza, cribada a 8 mm y lavada a 45° C.

Tratamiento	N %	C %	H %	S %	Cl %
Sin lavar	0,06	48,0	6,18	0,01	0,0001
Lavado de 5 min	0,11	47,6	6,11	0,01	0,0001
Lavado de 30 min	0,10	48,1	6,13	0,01	0,0001
Lavado de 60 min	0,14	48,7	6,31	0,01	0,0001
Lavado de 180 min	0,11	48,5	6,21	0,01	0,0001

5.4.3.1. Contenido en nitrógeno.

En la tabla 129 se muestra el resultado de la ANOVA y se puede observar que la reducción del contenido en nitrógeno de la biomasa de paulownia se produce principalmente por la eliminación de la corteza. Posteriormente los descensos en el % de N pueden ser debidos más al cribado que al lavado de la misma. Es importante señalar que una vez descortezada la biomasa el contenido de nitrógeno queda tan reducido que las variaciones producidas son insignificantes.

El contenido en nitrógeno en la paulownia no es un problema, debido a que el resultado de mayor concentración obtenido (0,26%) se encuentra dentro de los límites exigidos por la norma (0,3%). En caso de tener una muestra de biomasa de paulownia que supere el límite exigido por la norma, se puede afirmar a partir de los datos obtenidos que con el descortezado de la misma se reduciría ese % por debajo del 0,3 % exigido. Independientemente del tiempo de lavado que le demos a la paulownia, el material con corteza presenta diferencias significativas a todos los demás.

Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 129 para la paulownia con corteza son similares a los obtenidos por autores como Kasamaki (2007) [94] que obtuvo un 0,24% y por el IER [96] con un resultado del 0,26%.

Tabla 129. Contenido en nitrógeno en biomasa de paulownia

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,26 a	0,22 a	0,21 a	0,21 a	0,23 a
Sin cribar sin corteza	0,08 b	0,11 b	0,11 b	0,10 c	0,11 b
T8	0,06 c	0,06 c	0,06 c	0,07 d	0,06 c
T8 a 45°C	0,06 c	0,11 b	0,10 b	0,14 b	0,11 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 100 se advierte claramente que el efecto de los lavados en la disminución del contenido en N es mínimo, ya que se están consiguiendo variaciones en el mayor de los casos de un 0,04%. En cambio se observa de forma evidente lo comentado anteriormente

respecto a que la biomasa de paulownia tiene la mayor concentración de nitrógeno en la corteza.

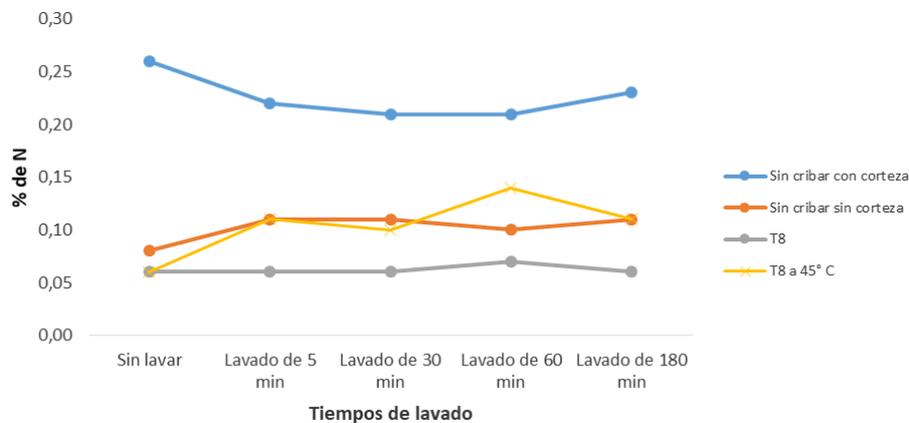


Figura 100. Evolución del contenido en nitrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada.

La figura 101 permite ver de forma clara las diferencias significativas que hay en el contenido en nitrógeno para los distintos tiempos de lavados realizados a la biomasa de paulownia. Es importante señalar que estas diferencias para la biomasa descortezada están basadas en % de nitrógeno muy bajos. Para el caso del material con corteza, los lavados de 5, 30 y 60 minutos consiguen el menor % de nitrógeno sin diferencias significativas entre ellos. Si la paulownia esta descortezada y sin cribar los lavados de 5, 30 y 180 minutos no presentan diferencias significativas entre ellos, mientras que el material sin lavar y el lavado de 180 minutos son diferentes significativamente a todos.

Por otro lado, el contenido en nitrógeno en la paulownia tamizada a 8 mm no presenta diferencias significativas para cada tiempo de lavado y en el caso del tamizado a 8 mm y lavado con agua a 45°C, el % de nitrógeno es diferente significativamente a todos para el material sin lavar y lavado a 60 minutos y significativamente iguales para los lavados de 5, 30 y 180 minutos.

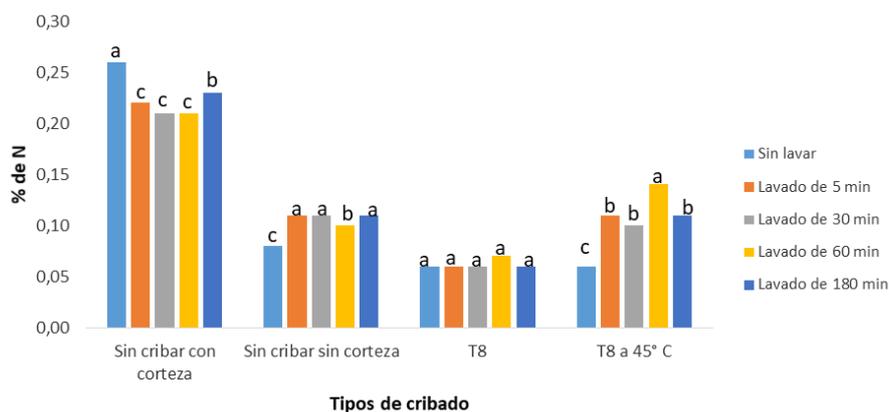


Figura 101. Contenido en nitrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.3.2. Contenido en carbono.

En la tabla 130 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizados al contenido de C en la biomasa de paulownia, en ellos se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de muestras utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 1%). El rango de valores de C obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 47,0 y el 49,6 %, estos valores en su mayoría son inferiores a los obtenidos por otros autores [94,96] que indicaban valores para la paulownia de 49,5 % y 50,8 % respectivamente.

Tabla 130. Contenido en carbono en biomásas de paulownia

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	49,0 a	49,0 a	49,0 a	49,0 a	49,6 a
Sin cribar sin corteza	49,1 b	48,5 b	48,2 b	48,2 c	48,4 b
T8	47,9 c	48,0 c	47,7 d	47,3 d	47,0 c
T8 a 45°C	48,0 c	47,6 d	48,1 c	48,7 b	48,5 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

Al observar la figura 102 se puede ver como la evolución del contenido en carbono con los distintos tiempos de lavado se mantiene más o menos constante a pesar de sufrir pequeñas subidas y bajadas durante el proceso. Para el material descortezado y el tamizado a 8 mm la evolución general es de forma decreciente, mientras que en los otros dos casos el contenido en carbono aumenta.

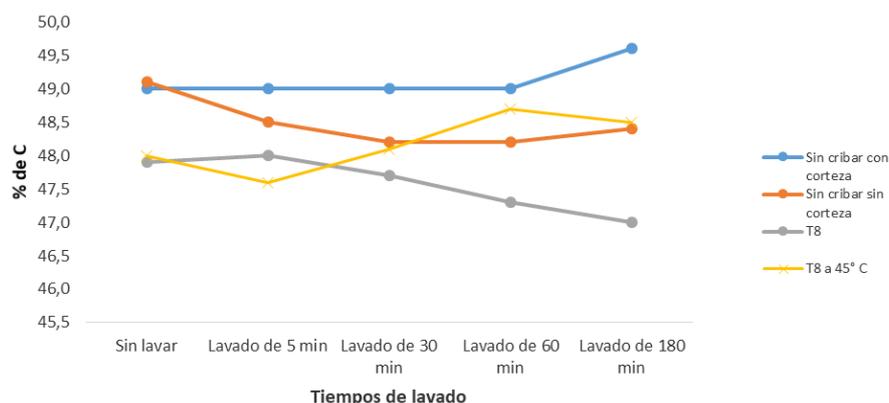


Figura 102. Evolución del contenido en carbono de la biomasa de paulownia lavada y cribada.

En la figura 103 se muestran las diferencias significativas que hay en el contenido en carbono entre los distintos lavados para cada tipo de biomasa de paulownia que se ha analizado. Cuando se realizara solamente el astillado de la biomasa, el contenido en carbono no presenta diferencias significativas salvo para el lavado de 180 minutos, en el cual se produce un ligero aumento de concentración.

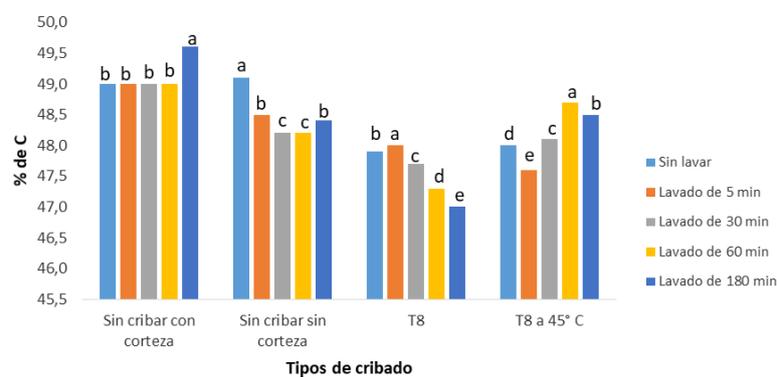


Figura 103. Contenido en carbono de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En el caso de la biomasa descortezada, el contenido en carbono cuando no se realiza el lavado es diferente significativamente a todos los demás, mientras que para los lavados de 5 y 180 no presentan diferencias significativas entre ellos pero si con los demás. Lo mismo ocurre con los lavados de 30 y 60 minutos no presentando diferencias significativas entre ellos pero si con los demás. Por último, para la paulownia descortezada y tamizada a 8 mm con lavado a ambas temperaturas, el contenido en C presenta diferencias significativas en todos los procesos de lavado.

5.4.3.3. Contenido en hidrógeno.

En la tabla 131 se pueden ver los resultados del análisis estadístico (ANOVA) realizados al contenido de H en la biomasa de paulownia, en ellos se aprecian diferencias significativas entre los distintos tipos de materias primas utilizadas. A pesar de presentar estas diferencias se puede afirmar que son en márgenes muy pequeños (alrededor del 0,25 %). El rango de valores de H obtenidos en el proceso de lavado ha sido entre el 6,30 y 6,05 %, estos valores son algo inferiores a los obtenidos por otros autores en paulownia (6,4%) [94] y superiores al obtenido por el IER (2012) [96].

El contenido en H no es un parámetro limitante para la obtención de un biocombustible de máxima calidad. Los resultados obtenidos nos dan información para saber cómo se comporta el contenido del mismo en función de los tratamientos que le demos a la paulownia tanto a nivel de formato como de lavado.

Tabla 131. Contenido en hidrógeno en biomasa de paulownia

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	6,27 a	6,23 a	6,22 a	6,25 b	6,31a
Sin cribar sin corteza	6,25 b	6,11 c	6,13 c	6,05 c	6,15 c
T8	6,18 c	6,15 b	6,19 b	6,26 b	6,30 a
T8 a 45°C	6,18 c	6,11 c	6,13 c	6,31 a	6,21 b

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

En la figura 104 se muestra como el contenido en hidrógeno para la paulownia cribada sufre variaciones de subidas y bajadas en función del tiempo de lavado aplicado.

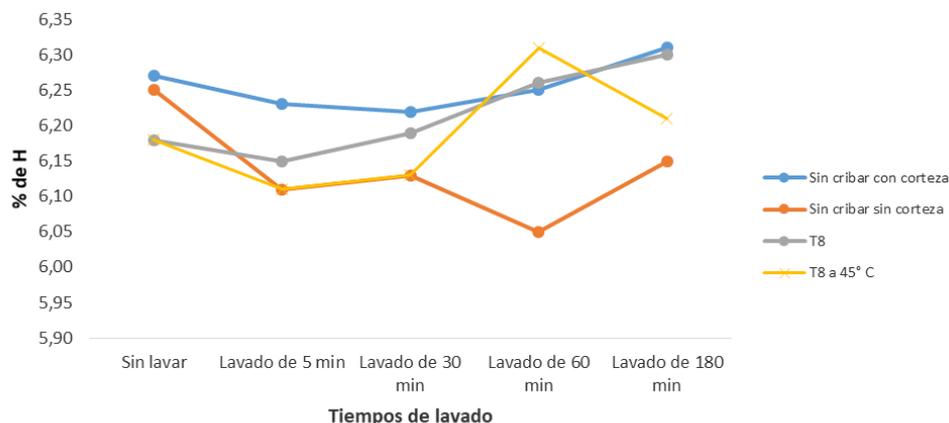


Figura 104. Evolución del contenido en hidrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada.

En la figura 105 se muestran las diferencias significativas que presenta el contenido de H en los distintos tiempos de lavado para cada tipo de biomasa de paulownia. Se puede observar como existen diferencias significativas en el contenido en hidrógeno para todos los tiempos de lavado y tipo de biomasa a excepción de la cribada a 8 mm. En este último caso, el % de hidrógeno no presenta diferencias significativas entre la biomasa sin lavar y la lavada durante 30 minutos.

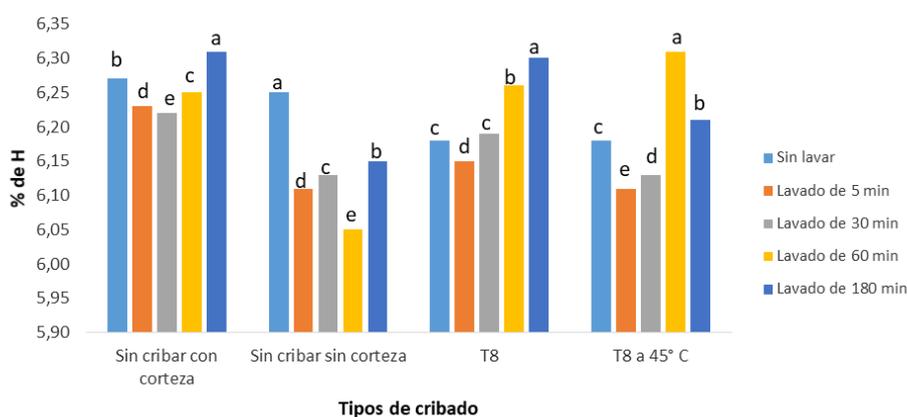


Figura 105. Contenido en hidrógeno de la biomasa de paulownia lavada y cribada. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.3.4. Contenido en azufre.

En la tabla 132 se muestran los valores del contenido en azufre en la biomasa de paulownia para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar la cantidad de S que presenta la paulownia es baja. No hay diferencias significativas en cada uno de los tratamientos, solamente el material con corteza sin lavar presenta una cantidad superior significativamente a todos los demás.

Los niveles de azufre obtenidos en este estudio están próximos a los obtenidos por Kasamaki (2007) [94] que obtuvo un valor de 0,02% y por debajo del obtenido por el IER (2012) [96]. La diferencia de contenido en S con otros autores puede ser debido a la variación del contenido de minerales de la biomasa e incluso a la influencia en el abonado del cultivo. En todo caso, los contenidos de S están por debajo del 0,04 % exigido por la norma de clasificación de biocombustibles de calidad, por la tanto las emisiones de SO₂ que puedan generar la combustión de la biomasa de paulownia va a ser mínima o nula.

Tabla 132. Contenido en azufre en biomasa de paulownia

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,03 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
Sin cribar sin corteza	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
T8	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a
T8 a 45°C	0,01 b	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.3.5. Contenido en cloro.

En la tabla 133 se observan los valores del contenido en cloro en la biomasa de paulownia para cada uno de los tratamientos realizados. Como se puede observar la cantidad de Cl que presenta la paulownia al igual que el ciruelo y el olivo es mínima y no hay diferencias significativas.

El contenido en cloro en la biomasa de paulownia es prácticamente nula y está muy por debajo de lo exigido en la norma que debe ser inferior al 0,02%. Algunos estudios realizados por Proinmadera (2016) [145] obtuvieron resultados de contenido en cloro de

0,015%. La variación en el contenido en cloro puede venir influenciada por el estado fenológico de la planta, el abonado e incluso el contenido en cloro del agua de riego.

Tabla 133. Contenido en cloro en biomasa de paulownia

Tratamiento	Sin lavar	Lavado de 5 min	Lavado de 30 min	Lavado de 60 min	Lavado de 180 min
Sin cribar con corteza	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a
Sin cribar sin corteza	0,0001 a	0,0001 a	0,0002 a	0,0001 a	0,0002 a
T8	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a
T8 a 45°C	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a	0,0001 a

Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.4. Resultados del análisis de los elementos mayoritarios en ICP.

En las figuras 106, 107, 108, 109, 110, 111 y 112 podemos observar los resultados del análisis de los elementos mayoritarios Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al con ICP realizado a la biomasa de paulownia con corteza y descortezado sin tamizar, tamizada a 8 mm y tamizada a 8 mm y lavada con agua a 45° C.

En la figura 106 se aprecia que con el descortezado y el tamizado de la biomasa se consigue reducir el contenido de Ca en cuatro veces su contenido inicial. En el caso de los tratamientos de lavado, éstos son efectivos para el material con corteza y el descortezado sin cribar pero sólo si se realiza el lavado de 5 minutos, ya que con los demás tiempos de lavado lo único que se consigue es aumentar de nuevo la concentración de Ca.

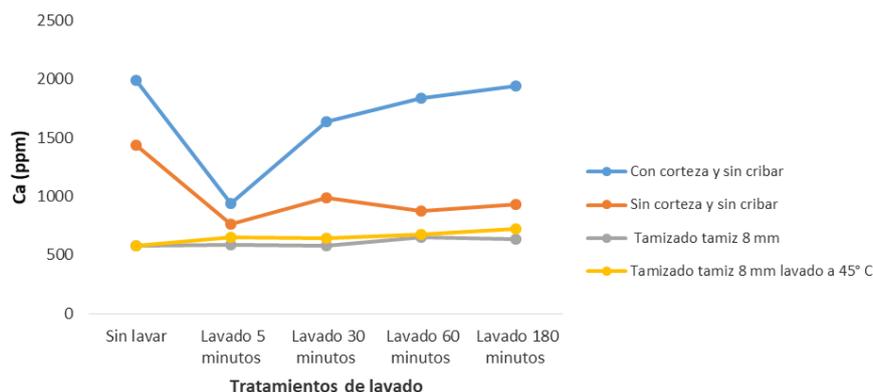


Figura 106. Contenido en Ca (ppm) de la biomasa de paulownia.

En la figura 107 se muestra que el tamizado de la biomasa de paulownia tiene un efecto claro en la reducción del contenido en Fe, mientras que al contrario que en la mayoría de los demás casos con el descortezado no se consigue reducir su contenido. Al igual que en el caso del Ca, los lavados de 5 minutos son los que consiguen bajar la concentración del mismo para el material con corteza y el descortezado sin cribar.

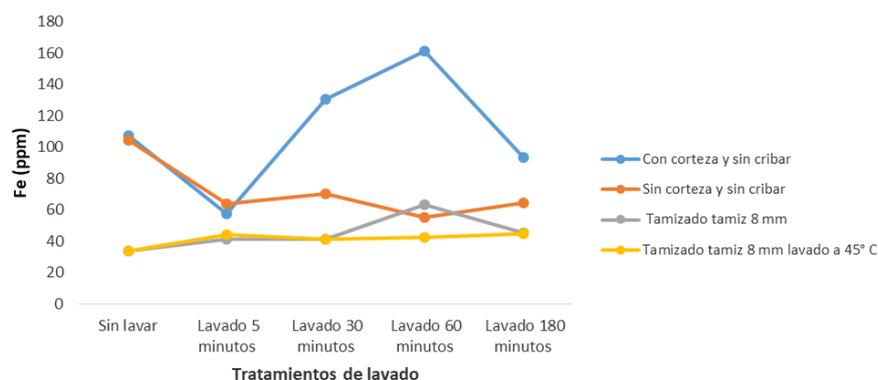


Figura 107. Contenido en Fe (ppm) de la biomasa de paulownia.

Al igual que en los demás cultivos leñosos estudiados en esta tesis, con los distintos tiempos de lavado de la biomasa en la mayoría de los casos se consigue la disminución de la concentración de K (figura 108). En el material con corteza bastaría sólo con hacer un lavado de 5 minutos para conseguir el menor contenido de K.

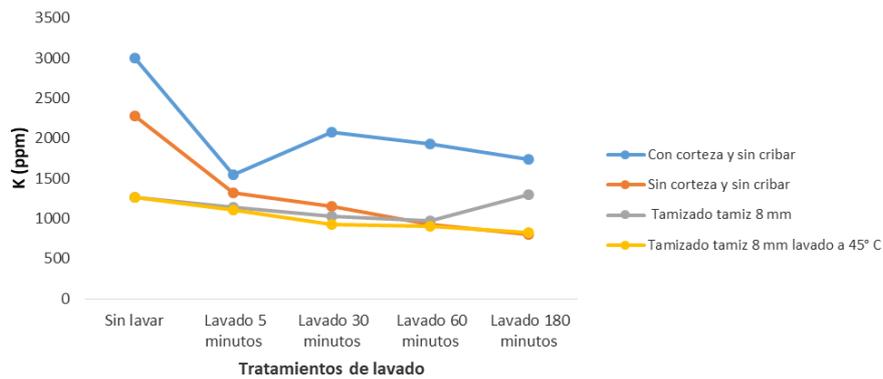


Figura 108. Contenido en K (ppm) de la biomasa de paulownia.

En la figura 109 se puede observar que el comportamiento del Mg con los tratamientos de lavado es muy similar al Ca (figura 106), por tanto lo comentado en el comportamiento del Ca es válido para el Mg.

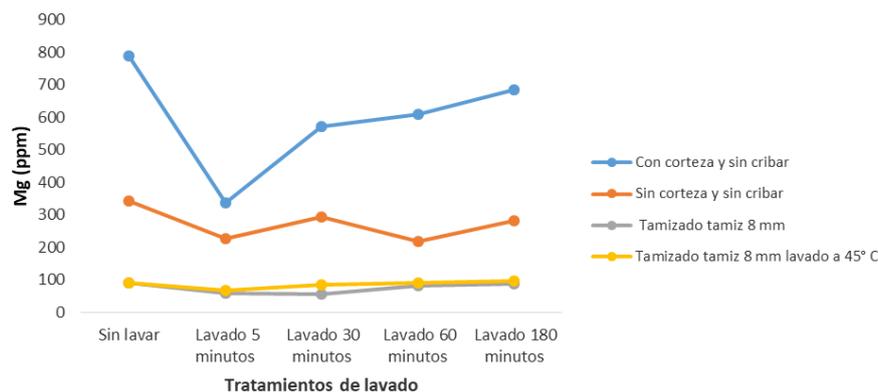


Figura 109. Contenido en Mg (ppm) de la biomasa de paulownia.

En la figura 110 se muestra que la concentración de Na se reduce principalmente con el descortezado y tamizado de la biomasa, esto nos viene a indicar que el sodio se concentra en la corteza y en las partes finas del tamizado de la biomasa. En cuanto a los tratamientos de lavado se puede ver que en el material con corteza a los 5 minutos es cuando se reduce al máximo la concentración de Na para posteriormente ir subiendo conforme aumenta el tiempo de lavado, por otro lado en el material descortezado se consigue la menor concentración de Na a los 60 minutos de lavado.

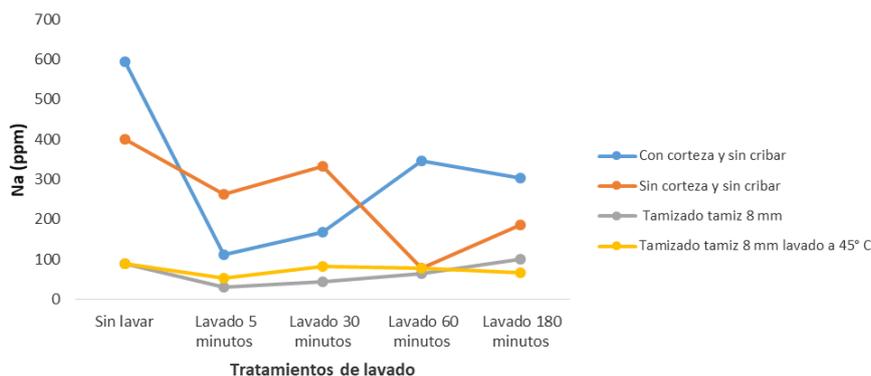


Figura 110. Contenido en Na (ppm) de la biomasa de paulownia.

A la hora de analizar la figura 111 para ver cómo se comporta el P en los distintos formatos y tiempos de lavado de la biomasa de paulownia, se debe resaltar de manera clara que prácticamente todo el fósforo se encuentra en la corteza de la biomasa. Se aprecia de forma extraordinaria que al realizar el descortezado de la biomasa prácticamente reducimos al mínimo el P que contiene la materia prima, de la misma manera que realizando un lavado de 5 minutos al material con corteza. En todos los demás casos (descortezado y tamizados), al eliminar la mayor concentración de fosforo con la retirada de la corteza, los lavados apenas tienen influencia.

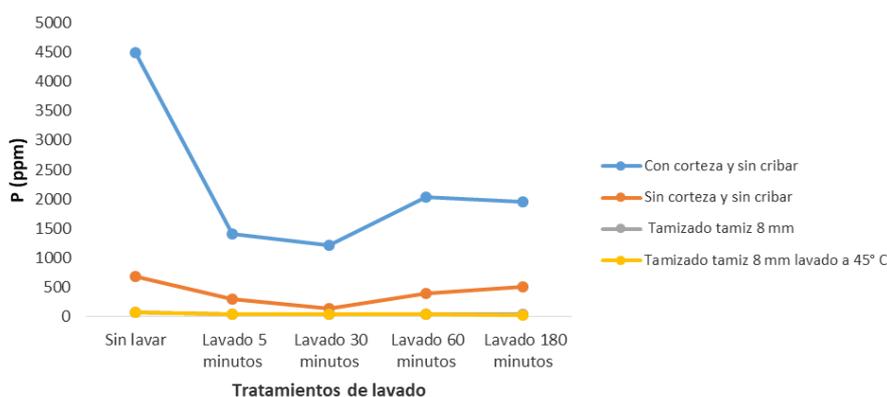


Figura 111. Contenido en P (ppm) de la biomasa de paulownia.

Observando la figura 112 se vuelve a confirmar que la corteza de la paulownia es la despensa de prácticamente todos los elementos mayoritarios que hay en la biomasa de esta especie, y el Al por lo tanto se encuentra en su mayor proporción en esta parte de la planta. Al realizar el tamizado de la misma se reduce de nuevo el contenido en Al por la

eliminación de finos que son en su mayoría restos de corteza. En el caso de la paulownia con corteza, los distintos tratamientos de lavado tienen su efecto en la reducción del contenido en Al, bajándolo en aproximadamente 20 ppm después de 180 minutos. En cambio para el material descortezado y tamizado al eliminar gran parte del Al con las técnicas comentadas anteriormente, únicamente el lavado de 5 minutos consigue reducir la concentración de aluminio.

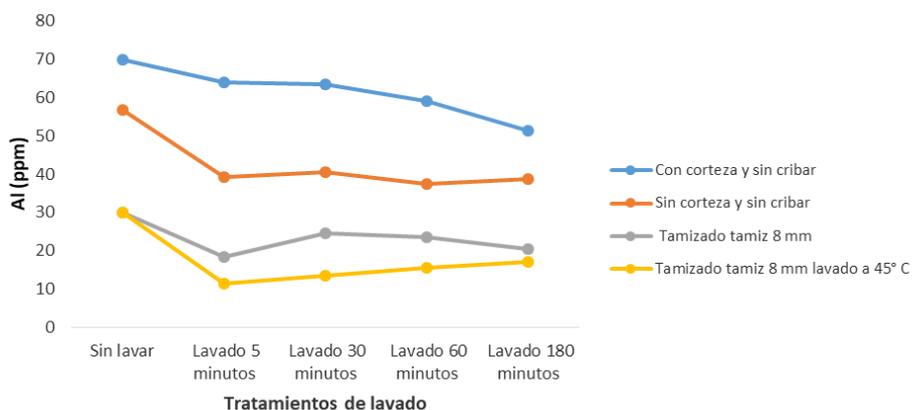


Figura 112. Contenido en Al (ppm) de la biomasa de paulownia.

5.4.5. Resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas.

A continuación se muestran los resultados del estudio para la determinación de la temperatura de fusión de las cenizas (°C) de biomasa de paulownia. Los análisis se han realizado a muestras de paulownia descortezada y tamizada a 8 mm con un lavado de 5 y 180 minutos en agua desionizada a una temperatura de aproximadamente 25°C.

Para la paulownia lavada durante 5 minutos:

- T de deformación inicial..... 1.189 °C
- T de reblandecimiento..... 1.229 °C
- T de hemisferio..... 1.269 °C
- T de fluidez..... 1.370 °C

Para la paulownia lavada durante 180 minutos:

- T de deformación inicial..... 1.245 °C

- T de reblandecimiento..... 1.450 °C
- T de hemisferio..... 1.477 °C
- T de fluidez..... 1.495 °C

Observando los resultados obtenidos con la biomasa de paulownia, se puede ver que con el aumento del tiempo de lavado se produce un incremento en todas las temperaturas obtenidas en el proceso de estudio para ver su temperatura de fusibilidad. Esto puede ser debido a que con los tratamientos de lavado se reduce el contenido de fundentes tales como Na y K. Los datos obtenidos en este estudio son superiores a los conseguidos por el Instituto de Investigación en Energías Renovables [96], los cuales obtuvieron los siguientes resultados:

- T de deformación inicial..... 920 °C
- T de reblandecimiento..... ---- °C
- T de hemisferio..... 1.120°C
- T de fluidez..... 1.130 °C

Las diferencias producidas entre unas analíticas y otras pueden ser debidas a la influencia del lavado de la biomasa y a que el material utilizado era descortezado. A raíz de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la biomasa de paulownia no presentaría problemas de fusibilidad ya que su temperatura de fluidez se encuentra por encima o muy próxima a los 1.400°C.

5.4.6. Resultados del poder calorífico.

En la figura 113 se puede ver que no existen diferencias significativas en los poderes caloríficos de cada uno de los formatos de la biomasa de paulownia.

Una vez analizados los resultados se puede apreciar que los valores de PCI en todos los casos están por encima del exigido por la norma de calidad 17225 (4.000 kcal/kg). Los valores obtenidos son similares a los presentados por Muñoz (2011) [144] que fueron de 4.300 kcal/kg y algo inferiores al obtenido por Lucas *et al.* (2010) [146]. Estas diferencias

en el poder calorífico pueden ser atribuibles a varias causas, como que las especies en forma individual presentan diferencias en la finalización de su actividad vegetativa y evolución según la fenología [147].

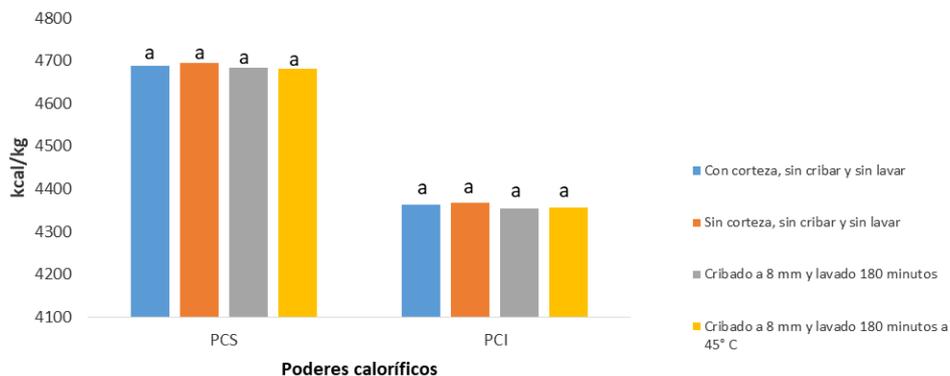


Figura 113. Poder calorífico en biomasa de paulownia. Letras diferentes en los resultados obtenidos indican diferencias significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%, con resultado de un análisis de varianzas de medias muestrales evaluando los ensayos. Las medias han sido separadas mediante el test de Student-Newman-Keuls (SNK).

5.4.7. Caracterización de los pélets de paulownia.

En las tablas 134 y 135 se pueden ver los resultados de la caracterización de los pélets de biomasa de paulownia con corteza y descortezada. Para determinar si los pélets fabricados eran de máxima calidad se les realizó una comparación con los parámetros de calidad exigidos por la norma UNE-ISO 177225. A continuación se indican los valores exigidos por la norma en determinados parámetros.

Como se puede apreciar en la tabla 134, los pélets de paulownia cumplen con los requisitos establecidos en la norma a excepción del contenido en cenizas ($1,01 \leq 0,7\%$). Los resultados obtenidos del contenido en cenizas son algo inferiores a los obtenidos por otros autores como Kasamaki (2007) [94], Latorre y Ruano (2009) [95], Muñoz (2007) [144] y Fenández-Puratich *et al.* (2014) [140]. Esta variabilidad en el contenido en cenizas de la madera puede venir influenciada por factores externos (clima, arena, piedras, etc) comentados en los casos anteriores.

Tabla 134. Caracterización de los pélets con corteza de paulownia.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de paulownia con corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	1,01	No
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.296	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,23	Si
Azúfre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,02	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	98	Si

Una vez analizados los pélets con corteza y tras el estudio realizado anteriormente con el descortezado de la biomasa de las otras especies que confirmaban el descenso en el contenido en cenizas, se ha optado por realizar un peletizado de la biomasa descortezada. Los resultados obtenidos (tabla 135) han conseguido reducir de forma notable (0,41%) el porcentaje de cenizas a lo exigido por la norma 17225 (0,7%). Además del contenido en cenizas se han reducido otros parámetros importantes de calidad como es el contenido en N y S, importante para la reducción de emisiones de NO_x y SO₂ en la combustión de los pélets. Por otro lado, al eliminar la corteza de la biomasa de paulownia se ha producido una reducción de la durabilidad de los pélets pasando de 98 a 90,7 %. Esta reducción también ocurrió en las biomásas de ciruelo y olivo, pero para el olivo la durabilidad se mantuvo por encima de lo exigido por la norma ($\geq 97,5$ %).

Analizando los resultados obtenidos en el peletizado de las biomásas de olivo, ciruelo y paulownia y observando los resultados del contenido en cenizas de todos los tipos de pelets fabricados, se decidió que a la vista del bajo porcentaje de cenizas que presentaban los pélets de paulownia descortezada sería una buena opción realizar una mezcla 50-50 con paulownia-ciruelo y paulownia-olivo. Esta mezcla tenía el objetivo claro de reducir

los porcentajes de cenizas de la biomasa descortezada de ciruelo (0,7 %) y de olivo (0,88%) a lo exigido por la norma. Es verdad que el ciruelo descortezado está dentro de la norma por presentar el valor límite exigido pero se decidió realizar la mezcla para conseguir un margen mayor con lo marcado en la norma.

Tabla 135. Caracterización de los pélets de paulownia sin corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de paulownia sin corteza	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	0,41	Si
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.357	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,07	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,01	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	90,7	No

En la tabla 136 se puede ver que con la mezcla de ciruelo y paulownia se consiguió reducir el porcentaje de cenizas hasta un 0,58 % y el porcentaje de nitrógeno hasta el 0,1 %, parámetros que para la calidad de un biocombustibles son fundamentales que estén los más bajo posibles. También es importante mencionar que con la mezcla de biomásas se consigue incrementar el poder calorífico respecto al obtenido con el ciruelo descortezado. Por otro lado, el porcentaje de durabilidad no se ha conseguido aumentar por encima del exigido por la norma.

En la tabla 137 se pueden ver que con la mezcla de olivo y paulownia se consiguió reducir el porcentaje de cenizas hasta un 0,70 %, límite exigido por la norma. También es importante mencionar que con la mezcla de biomásas se consigue incrementar el poder calorífico respecto al obtenido con el olivo descortezado. Por el contrario, la mezcla de olivo y paulownia ha sido muy negativa para la durabilidad de los pélets, provocando su

caída por debajo del 97,5 % exigido por la norma e impidiendo considerar el pélet como A1.

Tabla 136. Caracterización de los pélets de paulownia + ciruelo sin corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de paulownia + ciruelo	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	0,58	Si
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.354	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,1	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,01	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	96,2	No

Tabla 137. Caracterización de los pélets de paulownia + olivo sin corteza.

UNE-EN ISO 17225-2. "Especificaciones de pélets para uso no industrial"			Pélets de paulownia + olivo	Cumple la norma 17225-2 Si/No
Propiedades	Unidades	A1		
Cenizas	% en base seca	$\leq 0,7$	0,7	Si
PCI	kcal/kg	≥ 4000	4.277	Si
Nitrógeno	% en base seca	$\leq 0,3$	0,2	Si
Azufre	% en base seca	$\leq 0,04$	0,01	Si
Cloro	% en base seca	$\leq 0,02$	-	Si
Durabilidad	% según se recibe	$\geq 97,5$	97	No

5.5. Ensayos de combustión en calderas.

A continuación en las figuras 114, 115, 116 y 117 se pueden observar los distintos parámetros de combustión analizados para los pélets fabricados con las distintas biomásas estudiadas en esta tesis. La combustión de los distintos tipos de pélets ha sido analizada en las dos calderas descritas en el punto 3.5 de esta tesis con la finalidad de comparar el comportamiento de ambas.

Los pélets de ciruelo sin corteza sólo se han podido analizar en la caldera de condensación, debido a que no había suficiente cantidad para poder analizar la combustión en ambas calderas. La falta de pélets fue debida a que la peletización de los mismos fue muy difícil de conseguir y se desperdiciaba mucha biomasa en cada fase de limpieza de atascos en las matrices de peletizado. Por otro lado, una vez caracterizados los pélets de cynara y viendo el elevado % de cenizas que tenían, se decidió analizarlos sólo en la caldera convencional, ya que la caldera de condensación necesita pélets de máxima calidad y podría causar averías en la misma.

En la figura 114 se puede ver de forma muy clara la diferencia de las distintas temperaturas de humos entre una caldera y otra a la hora de realizar la combustión de los pélets estudiados en esta tesis. La diferencia en el rango de temperaturas que se mueven las dos calderas es muy elevado, siendo para la caldera convencional un rango entre 174,13 °C para la temperatura más alta y los 104,13°C para la más baja, valores similares a los obtenidos por Tucki *et al.* [148], estando los valores más alto de combustión entre 133 °C y 152 °C para calderas de bajas emisiones, y de 43,60 °C y 34,13°C para la caldera de condensación. Esta diferencia de pérdidas de calor por la chimenea quedan reflejadas perfectamente en el rendimiento de cada una de ellas. En cuanto a las temperaturas de humos alcanzadas al utilizar pélets de distintas biomásas, se puede observar que la mayor temperatura se ha alcanzado con los pélets comerciales A1, mientras que la más baja se ha obtenido con los pélets de cardo. La temperatura de humos más baja alcanzada con los pélets de cardo es normal por tratarse de una biomasa herbácea, tener un mayor porcentaje de cenizas y un PCI más bajo, factores ambos determinantes en la calidad de la combustión.

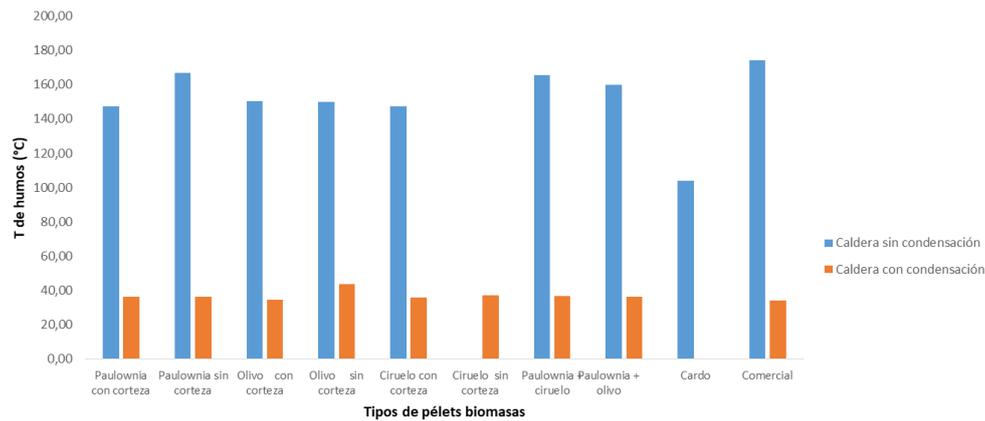


Figura 114. Temperatura de humos emitidos por la combustión de pélets de distintas biomásas.

En la figura 115 se muestran los resultados de las emisiones de CO mg/m^3 (mg/m^3) en las calderas de biomásas para los distintos pélets estudiados. En dicha figura se aprecia de forma clarísima que la diferencia en el nivel de emisiones entre una caldera y otra es muy alto, estas diferencias en las emisiones muestra que la evolución en la mejora de las calderas con tecnologías más avanzadas repercute directamente en la mejora de emisiones y de protección del medio ambiente.

A la hora de analizar las emisiones de CO en la caldera convencional, habría que diferenciar la combustión de los pélets de biomasa leñosa frente a los de biomasa herbácea. En la figura 115 se observa de forma clara que las emisiones generadas en la combustión con los pélets de cardo se elevan hasta los casi $3.262,53 \text{ mg/m}^3$, mientras que la biomasa leñosa con el nivel más alto de emisiones de CO se queda en $1.059,01 \text{ mg/m}^3$. Con lo que respecta a los pélets fabricados con biomásas leñosas se podrían separar en tres grupos; los pélets con las emisiones más bajas son los de paulownia sin corteza ($517,77 \text{ mg/m}^3$), pélets de paulownia + ciruelo ($522,92 \text{ mg/m}^3$) y los pélets A1 comerciales ($545,25 \text{ mg/m}^3$), otro grupo con unas emisiones medias como son los pélets de olivo con corteza ($801,99 \text{ mg/m}^3$), pélets de olivo sin corteza ($850,07 \text{ mg/m}^3$) y los pélets de ciruelo con corteza ($773,75 \text{ mg/m}^3$). Y por último el grupo con las emisiones más altas para los pélets de paulownia + olivo ($1.007,78 \text{ mg/m}^3$) y pélets de paulownia con corteza ($1.059,01 \text{ mg/m}^3$). Los valores son superiores a los referenciados (entre 83 y 255 mg/m^3) para calderas de bajas emisiones [148].

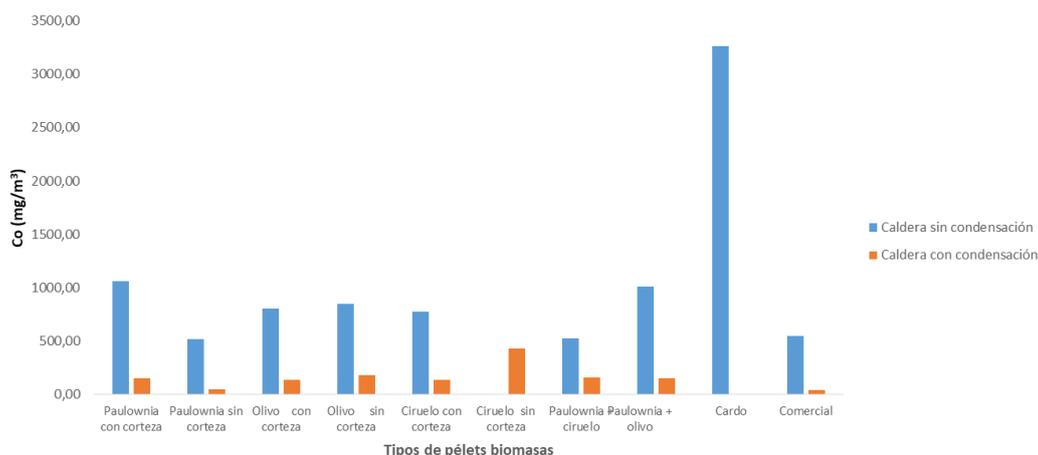


Figura 115. Emisiones de CO emitidas por la combustión de pélets de distintas biomásas.

En cuanto a las emisiones de CO para la caldera de condensación se puede destacar que los pélets comerciales A1 ($37,07 \text{ mg/m}^3$) y los pélets de paulownia sin corteza ($47,80 \text{ mg/m}^3$) han generado un nivel de emisiones muy bajo, similar al obtenido por Ngendakumana *et al.* (2017) [149] en caldera de condensación (20 mg/m^3). Por el contrario, los pélets de ciruelo sin corteza han destacado por encima de los demás con las emisiones más altas ($431,33 \text{ mg/m}^3$). Todos los demás pélets se encuentran en un nivel de emisiones muy similar que van desde los $131,95$ a las $177,14 \text{ mg/m}^3$.

Es muy importante resaltar que todos los pélets a excepción de los de cardo están por debajo del límite exigido por la norma UNE 303-5 para calderas menores de 50 kW cuyo límite lo fija en 3.000 mg/m^3 . Por otro lado, si las calderas fuesen de nueva fabricación se tendrían que regir por las condiciones de fabricación de los reglamentos 2015/1189 y 2015/1185 y sus condiciones de Ecodiseño. Si comparamos las emisiones de las calderas estudiadas en esta tesis con los límites exigidos en el reglamento de ecodiseño, se puede observar que para la caldera convencional no se cumplirían las emisiones de CO por estar todas por encima de los 500 mg/m^3 , mientras que la caldera de condensación cumpliría de forma holgada el límite más exigente de 300 mg/m^3 (límite exigido a partir del 1 enero de 2022) para calderas menores de 50 kW, excepto para el ciruelo sin corteza.

En la figura 116 se puede ver el nivel de emisiones NO en la combustión de los distintos pélets analizados. Al igual que pasaba con las emisiones de CO, las emisiones de NO en la caldera de condensación son inferiores a las emitidas por la caldera convencional.

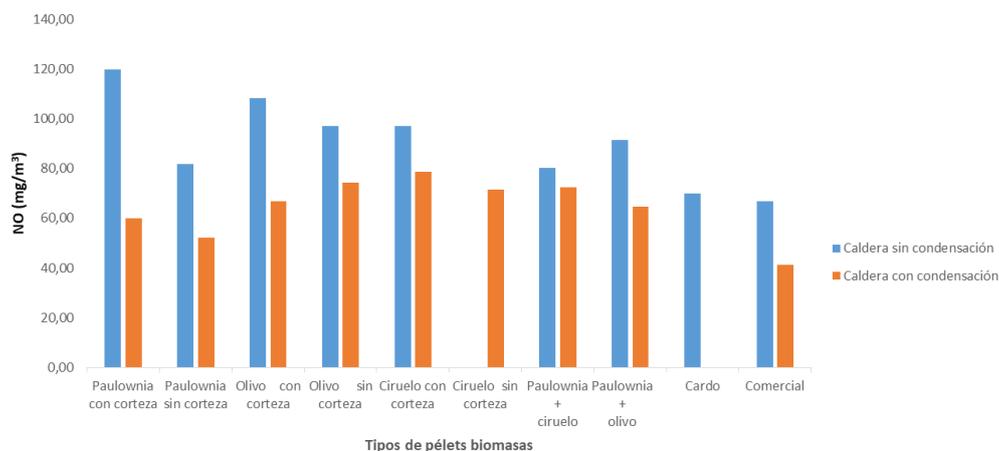


Figura 116. Emisiones de NO emitidas por la combustión de pélets de distintas biomosas.

Las emisiones de NO para la caldera sin condensación se mantienen entre los valores de 119,90 mg/m³ para el valor más alto obtenido con los pélets de paulownia con corteza y los 66,85 mg/m³ como valor más bajo conseguido con los pélets A1 comerciales. Por otro lado, para la caldera con condensación, los pélets con mejores resultados obtenidos han sido al igual que en la otra caldera los pélets comerciales (41,25 mg/m³), mientras que los niveles de emisiones más altos han sido alcanzados por los pélets de ciruelo con corteza (78,81 mg/m³). Los valores alcanzados para las dos calderas estudiadas son similares a los que obtuvieron para una caldera de condensación (122 mg/m³) [149] y a los de una caldera de bajas emisiones [148], entre 96 y 290 mg/m³.

Todos los valores de emisiones de NO para ambas calderas se encuentran dentro de los límites exigidos por la norma 303-5 (300 mg/m³) para calderas de menos de 50 kW. Además también cumplirían con el límite exigido por el reglamento de ecodiseño que establece el límite en 200 mg/m³.

En la figura 117 se observa que el rendimiento de la caldera de condensación es superior en todos los casos en comparación con la convencional. La caldera de condensación tiene unos rendimientos medio entorno al 99% e incluso superiores para los pélets comerciales llegando a ser del 100,1 %. Estos valores son del mismo orden que los obtenidos (99,4%) por otros autores [149]. En cambio los rendimientos medios de la caldera convencional

se mantienen entorno al 81% a excepción de los pélets de cardo que tienen el rendimiento más bajo (73,3%).

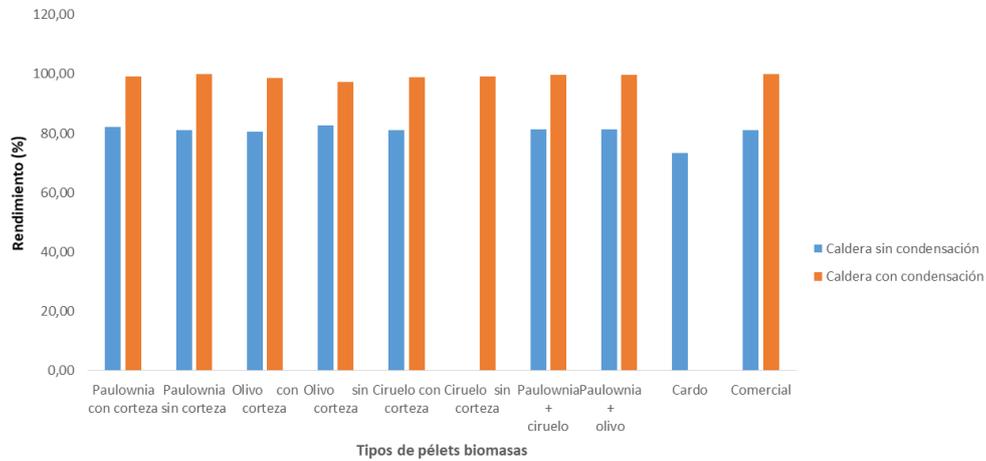


Figura 117. Rendimiento de las calderas con la combustión de pélets de distintas biomásas.

En la figura 118 se muestra una imagen del cuadro informativo y de control de la caldera de condensación, en ella se puede apreciar la temperatura de trabajo de la misma y la producción de electricidad que está teniendo en ese instante (718 W) a través de un motor Stirling.



Figura 118. Pantalla de información sobre la producción de electricidad generada en la caldera de condensación de los invernaderos de CICYTEX.

5.6. Viabilidad de la producción de los pélets obtenidos.

Para poder desarrollar la actividad de producción de los pélets de las biomásas residuales agrícolas (podas de olivo y ciruelo), y de cultivos energéticos (cynara y paulownias) es necesario analizar la viabilidad técnica, económica y social de su producción.

La viabilidad técnica de la producción de los pélets se ha estudiado en la tesis, desde el cultivo de cynara y paulownia, la recogida de la biomasa de los cultivos energéticos y de las podas, su preparación previa al peletizado, hasta su combustión en calderas.

La preparación de la biomasa o pretratamiento es fundamental para obtener un pélet de calidad. El descortezado permite reducir de forma importante el contenido en ceniza de la biomasa leñosa (parámetro fundamental de la calidad del pélet). En este trabajo se analizan en profundidad dos pretratamientos que pueden complementar el descortezado, como son la separación por tamaño de partícula de la biomasa molida y el lavado con agua. Con estos pretratamientos, se considera que se pueden obtener pélets de calidad para obtener calor y electricidad con calderas que existen actualmente en el mercado.

A raíz de los datos obtenidos en el apartado de resultados, se puede decir que la viabilidad de una planta de peletizado con una producción en torno a unas 8.000 toneladas al año con residuos de biomasa y cultivos energéticos puede ser positiva para zonas geográficas locales. El uso de biomásas locales en zonas rurales es uno de los principales objetivos de la economía circular, consiguiendo reducir la contaminación ambiental y aumentando la necesidad de mano de obra local para cubrir las necesidades laborales de las industrias locales.

Existen trabajos sobre el estudio de costes para la implantación de plantas de pélets con producciones de 10.000 toneladas/año que basándose en precios similares a los tomados en esta tesis para costes de materia primas y venta de pélets dando una amortización del proyecto en 5 años [150]. En este caso, habría que ajustar el tema del precio de venta de los pélets o aumentar la durabilidad exigidas para A1 para poder venderlos al precio estimado. Hay estudios que obtuvieron una mejora en la durabilidad de los pélets con un aporte de almidón como aglutinante [151], opción que podría resultar muy interesante en este estudio para aumentar la durabilidad de los pélets que estaban por debajo a lo exigido

por la norma 17225. Otra posibilidad es ajustar las proporciones de las biomásas en la mezcla para conseguir tener una durabilidad adecuada.

La viabilidad social de la producción de pélets a partir de las biomásas estudiadas en zonas rurales agrícolas es clara. Supone diversificar la actividad, al producir el agricultor alimentos, bioproductos y también energía renovable. Además, se aprovechan residuos que en ocasiones son generados en el campo. El aprovechamiento energético de la biomasa a nivel local con criterios de sostenibilidad, y economía verde y circular permite reducir el consumo de combustibles fósiles, y genera empleo y riqueza en las zonas rurales.

6. CONCLUSIONES.

1. El cribado de la biomasa de cynara, ciruelo, olivo y paulownia tiene un efecto directo en la reducción del porcentaje de cenizas. A mayor tamaño de partículas menor es el porcentaje de cenizas.
2. El descortezado de la biomasa leñosa de ciruelo, olivo y paulownia reduce el porcentaje de cenizas, por lo tanto la mayor concentración de cenizas en las biombras leñosas estudiadas se encuentra en la corteza.
3. El lavado de la biomasa permite reducir el porcentaje de cenizas en todas las biombras estudiadas y en el caso de las leñosas se consigue reducirlo por debajo del límite exigido para pélets A1 en la norma de calidad 17225. Este objetivo se consigue como mínimo en uno de los tratamientos realizados.
4. Los elementos S, Cl, K, Ca, Fe, Mg, Na, P y Al en la biomasa de cynara ven reducida su concentración con los distintos tiempos de lavado. El mayor descenso de los mismos se produce en los primeros 30 minutos.
5. La disminución de la concentración de los elementos Ca, Fe, K, Mg, Na, P y Al en las biombras leñosas se producen más por la eliminación de la corteza y el cribado de la biomasa que por los distintos tiempos de lavado. En el caso de la paulownia con corteza, el mayor descenso se produce en los primeros 5 minutos de lavado.
6. Los pélets de cynara no se podrían clasificar como de máxima calidad por no alcanzar los parámetros de calidad en % de cenizas, PCI y durabilidad.
7. Los pélets de ciruelo, olivo y paulownia con corteza cumplen los parámetros estudiados para pélets A1 a excepción del % de cenizas, mientras que si son fabricados con biomasa descortezadas cumplen todos a excepción de la durabilidad.

8. Se observa una tendencia en la reducción de la durabilidad de los pélets estudiados cuando se elimina la corteza. Este efecto está muy marcado en los pélets de paulownia.
9. La utilización de la biomasa de paulownia descortezada en la fabricación de pélets de mezcla con ciruelo y olivo descortezados, ayuda a la reducción del % de cenizas inicial de dichas biomásas pero provoca una reducción de la durabilidad respecto a los pélets sin mezcla de ciruelo y olivo descortezado.
10. Con el lavado de la biomasa de olivo descortezada y cribada a 3,15 y 8 mm durante 60 y 180 minutos se consigue disponer de materia prima con un % de cenizas por debajo del límite exigido para la fabricación de pélets A1.
11. La biomasa de paulownia con corteza lavada durante 5 minutos podría permitir la fabricación de pélets A1, siempre y cuando se mantuviese el % de durabilidad de la paulownia con corteza sin lavar.
12. La combustión de los pélets de biomasa herbácea de cynara tienen un rendimiento más bajo y un nivel de emisiones más alto que los pélets de biomásas leñosas en las calderas analizadas (caldera convencional de combustión y caldera de condensación con motor Stirling).
13. Los pélets de paulownia sin corteza son los que tienen un comportamiento más parecido a los pélets comerciales A1 en ambas calderas.
14. La utilización de calderas de última generación con la tecnología más avanzada del mercado va a permitir reducir el nivel de contaminación con los gases de combustión y obtener rendimientos energéticos por encima del 100%.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2015). Cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático.
- [2] IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2013). Cambio climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsabilidades políticas.
- [3] Cambio Climático: Informe de síntesis. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-sintesis-resumida_tcm30-376937.pdf . Accedido 6 noviembre de 2017.
- [4] Coronavirus y cambio climático: por qué la pandemia no es realmente tan buena para el medio ambiente. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52596472>. Accedido 12 junio de 2020.
- [5] IRENA (International Renewable Energy Agency). (2017). Renewable Energy Benefits Leveraging Local Capacity For Onshore Wind.
- [6] APEGR- Agencia Provincial de la Energía de Granada. *El sistema energético actual*. <http://www.apegr.org/index.php/es/sistema-energetico>. Accedido 21 marzo de 2018.
- [7] Domínguez J. (2002). Los Sistemas de Información Geográfica en la Planificación e Integración de Energías Renovables» [Libro]. - Madrid: CIEMAT. - Vol. I.
- [8] Renovables en el mundo y en Europa. <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/>. Accedido el 15 febrero de 2019.
- [9] <http://web.unep.org/es/rolac/econom%C3%ADa-verde>. Accedido el 14 de junio 2018.
- [10] Red Europea de Desarrollo Rural, (2017). Economía verde oportunidades para la Europa rural. *Revista rural de la UE*.
- [11] www.extremadura2030.com, Accedido el día 17 de Junio del 2018.
- [12] Anonymous, Area under Apple, Pear, Peach, Apricot, Orange, Lemon and Small Citrus Fruit trees. (2018). http://ec.europa.eu/eurostat/statistics_explained/index.php/File:Area_under_apple_pear_peach_apricot_orange_lemon_and_small_citrus_fruit_trees_2012.png. Accedido 26 de junio 2019.

- [13] <http://www.mapama.gob.es/gl/estadistica/temas/estadisticasagrarias/ espana 2017 web tcm37-435931.pdf>. Accedido el 21 de mayo de 2020.
- [14] <https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/eia/archivos/ iag/2016/2016-17-anexo-3.pdf>. Accedido el 25 mayo 2018.
- [15] Renewables 2020. Analysis and forecast to 2025. International Energy Agency. IAE Publications. International Energy Agency. France. November 2020. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>. Accedido 15 enero de 2021.
- [16] International Energy Agency. IEA Bioenergy Technology. Collaboration Programme Animal Report 2020. Abril 2021. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/04/IEAB-Annual-Report-2020.pdf>. Accedido 15 enero de 2021
- [17] IEA Bioenergy FAQs-TasK42. What do you exactty mean by biorefining? [online]. [https://task42.ieabioenergy.com/about/faqs/. \[zugriffam15January2021](https://task42.ieabioenergy.com/about/faqs/. [zugriffam15January2021).
- [18] Panoutsou C., Singh A. (2020). A value chain approach to improve biomass policy formation. *GCB Bioenergy*. **12 (7)**, 464-475. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12685>.
- [19] Freindt P., Proestou M., Daedlow K. (2020). Resilience and policy design in the emerging bioeconomy-the RDP framework and the changing role of energy crop systems in Germany. <https://doi.org/10.1080/1523908x.2020.1814130>.
- [20] Lehtveer M., Fridahl, M. (2020). Managing variable renewables with biomass in the European electricity system: Emission targets and investment preferences. *Energy* 213:118786. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2020.118786>.
- [21] Bacovsky D. (2020). The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport-summary Report. IEA Technology Collaboartion Programmes Advanced Motor Fuels Annex 58 and IEA Bioenergy Task 41 Project 10. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads72020/11/Summary-report.pdf>. Accedido 28 enero de 2021
- [22] Fritsche U., Brumori G., Chiaramonti D., Galanakis C.M., Matthews R. y Panoutson C. (2021). Future transitions for the Bioeconomy Opportunities for a green recovery and enhanced system resilience. Publications office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-28415-4. Doi: 10.2760/831176, JRC 123534.
- [23] Camia A., Giuntoli J., Jonsson K., Robert N., Cazzaniga N., Jasinevičius G., Avitabile V., Grassi G., Barredo Cano J.I. and Mubareka S. (2020). The use of woody biomass for energy production in the EU, EUR 30548 EN, Publications Office of the

- European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-27866-5, doi:10.2760/428400, JRC122719.
- [24] How the Bioeconomy contributes to the European Green Deal. (2020). European Commission Publications Office of the European Union. <https://www.knowledge4policy.ec.europa.eu/publication>. Accedido 1 de febrero de 2021
- [25] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. 2030 Climate and Energy Frameworks. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>.
- [26] Bioeconomy opportunities for a green recovery and enhanced system resilience. Knowledge Synthesis and Foresight work Package 1-Network of Experts. (2021). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [27] Fritsche U., Brunori G., Chiaramonti D., Galanakis C.M., Hellweg S., Matthews R., and Panoutsou C. (2020). Future transitions for the Bioeconomy towards Sustainable Development and a Climate-Neutral Economy Knowledge Synthesis Final Report. ISBN 978-92-76-21518-9, doi: 10.2760/667966.
- [28] Funcia I. and Gil J. (2020). Desarrollo de nuevos biocombustibles sólidos a partir de biomasa residual. *Biomasa news*. **2**, 32-33.
- [29] Agenex (Agencia Extremeña de la energía), (2013). Los residuos agrícolas de poda.
- [30] IDAE 2007. «Energía de la biomasa». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Editorial IDAE Madrid.
- [31] García S. (2012). Centrales termoeléctricas de biomasa.
- [32] Segador C. and Encinas D. (2016). Demanda de biomasa en Extremadura. Universidad de Extremadura.
- [33] Antón M. L., Aranda E., Bartolomé T., Campillo C., Casquete R., Cepeda N., Coletto J., Corchuelo B. and Delgado J. (2017). La agricultura y la ganadería extremeña 2016. Badajoz.
- [34] Winzer F., Kraska T., Elsenberger C., Kötter T. and Pude R. (2017). Biomass from fruit trees for combined energy and food production. *Biomass and Bioenergy*. **107**, 279-286.

- [35] Grella M., Manzone M., Gioelli F. and Balsari, P. (2013). Harvesting of southern Piedmont's orchards pruning residues: evaluation of biomass production and harvesting losses. *J. Agric. Eng.* **44**, 546-549.
- [36] Gonzalez J., Matias J. and Royano L. (2012). Obtención de energía a partir de residuos agrícolas (olivar y viñedo). XXXIV Jornadas de Viticultura y Enología Tierra de Barros. 15-22.
- [37] Manzone M., Gioelli F. and Balsari P. (2017). Kiwi clear-cut: First evaluation of recovered biomass for energy production. *Energies*. **10**, 1837; doi:103390/en10111837.
- [38] Munir S., Daood S.S., Nimmo W., Cunliffe A.M. and Bibbs, B.M. (2009). Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology* **100**, 14313–14318.
- [39] Gil M.V., Oulego P., Casal M.D., Pevida C., Pis J.J. and Rubiera F. (2010a). Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*. **101**, 8859–8867.
- [40] Li Z., Zhao W., Li R., Wang Z., Li Y. and Zhao G. (2009). Combustion characteristics and NO formation for biomass blends in a 35-ton-per-hour travelling grate utility boiler. *Bioresource Technology*. **100**, 2278–2283.
- [41] Qian F.P., Chyang C.S., Huang K.S. and Tso J. (2011). Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor. *Bioresource Technology*. **102**, 1892–1898.
- [42] Demirbas A. (2008). Importance of biomass energy sources for turkey. *Energy Policy*. **36**, 834–842.
- [43] Lehtikangas P. (2011). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*. **20**, 351-360.
- [44] Filbakk T., Raida J., Nurmi J. and Hoibo O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*. **35**, 3342-3349.
- [45] Lerma-Arce V., Oliver-Villanueva J.V. and Segura- Orenge G. (2017). Influence of raw material composition of Mediterranean pinewood on pellet quality. *Biomass and Bioenergy*. **99**, 90-96.

- [46] Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J. and Høibø O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*. **35**, 3342-3349.
- [47] Obernberger I. and Thek G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and bioenergy*. **27 (6)**, 653-669.
- [48] Kamperidou V., Lykidis C. and Barmpoutis P. (2018). Utilization of wood and bark of fast-growing hardwood species in energy production. *Journal of forest Science*. **64**, 164-170. <https://doi.org/10.17221/141/2017-JFS>.
- [49] Yang H., Yan R., Chen H., Zheng c., Lee D. H., and Liang D. T. (2006). In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose and Lignin. *Energy & Fuels*. **20 (1)**, 388-393.
- [50] Stelte W., Clemons C., Holm J.K. and Ahrenfeldt J. (2012). Fuel pellets from wheat straw: The effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. *BioEnergy Research*. **5**, 450–458.
- [51] Lehmann B., Schröder H.W. and Wollenberg R. (2012). Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*. **44**, 150-159.
- [52] Boerjan W., Ralph J. and Baucher M. (2003). Lignin biosynthesis. *Annual review of plant biology*. **54 (1)**, 519-546.
- [53] Pérez J., Muñoz-Dorado J., De la Rubia T. and Martínez J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology*. **5 (2)**, 53–63.
- [54] Pradhan U. (2015). Physical treatments for reducing biomass ash and effect of ash content on pyrolysis products. Master's Thesis. Alabama (USA).
- [55] Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassilev C. G. and Morgana J. T. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. **94**, 1-33.
- [56] Kyungjun Lee K., Roy S., Cakmak E., Lacey J. A., Watkins T. R., Meyer H. M., Thompson V. S., James R. Keiser J. R. and Jun Qu J. (2020). Composition-Preserving Extraction and Characterization of Biomass Extrinsic and Intrinsic Inorganic Compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Enginneering*. **8**, 1599–1610.

- [57] Khan A.A., De Jong W., Jansens P.J. and Spliethoff H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*. **90**, 21-50.
- [58] Vassilev S.V., Baxter D. and Vassileva C.G. (2013). An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *Fuel*. **112**, 391-449.
- [59] Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K. and Vassileva C.G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*. **105**, 40-76.
- [60] Liu X. and Bi X.T. (2011). Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass. *Fuel Processing Technology*. **92**, 1273-1279.
- [61] Werkelin J., Skrifvars B.J., Hupa M. (2005). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. *Biomass and Bioenergy*. **29(6)**, 451-466.
- [62] Encinar J. M., Beltrán F. J., Bernalte A., Ramiro A., and González, J. F. (1995). Combustion kinetics of agricultural wastes. *J. Chem. Technology Biotechnology*. **64**, 181-187.
- [63] González J. F., González-García C.M., Ramiro A., González J., Sabio E., Gañán J. and Rodríguez, M. A. (2004). Combustion optimization of biomass residues pellets for domestic heating with a mural boiler. *Biomass and Bioenergy*. **27**, 145-154.
- [64] González J. F., González-García C. M., Ramiro A., Gañán J., Ayuso A. and Turégano J. (2006). Use of energy crops for domestic heating in a mural boiler. *Fuel Processing Technology*. **87**, 717-726.
- [65] González J. F., Ledesma B., Alkassir A. and González J. (2011). Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process. *Biomass and Bioenergy*. **35 (10)**, 4399-4406.
- [66] Miranda T., Román S., Montero I., Nogales-Delgado S., Arranz J. I., Rojas C. V. and González J. F. (2012). Study of the emissions and kinetic parameters during combustion of grape pomace: Dilution as an effective way to reduce pollution. *Fuel Processing Technology*. **103**, 160-165.
- [67] Camps M. and Marcos F. (2002). *Los biocombustibles*. Madrid: Mundi-Prensa
- [68] Marcos F. (1994). *Pelets y briquetas*. Rev. AITIM. 171:54-62. Madrid.

- [69] Marcos F., Izquierdo I. and García F. (2001b). Ordenación de talleres de chopo I-214 a turnos muy cortos con fines energéticos. I Congreso Nacional de Agroingeniería. Valencia.
- [70] Whittaker C. and Shield I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **71**, 1-11.
- [71] Yao B.Y., Changkook R., Adela K., Yates N.E., Sharifi V.N. and Swithenbank J. (2005). Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach identification of the controlling factors. *Fuel*. **84 (16)**, 2116–2130.
- [72] Permchart W. and Kouprianov V.I. (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*. **92**, 83–91.
- [73] Telmo C., Lousada J. and Moreira N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology*. **101**, 3808–3815.
- [74] Whittaker C and Shield I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability –a review, *Renew. Sust. Energ. Rev.* **71**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rserv.2016.12.119>.
- [75] Schmidt G., Trouvé G., Leyssens G., Schönnenbeck C., Genevray P., Cazier F., Dewaele D., Vandenbilcke C., Faivre E., Denance Y. and Dreff-lorimier C. (2018). Wood washing: Influence on gaseous and particulate emissions during wood combustion in a domestic pellet stove. *Fuel Processing Technology*. **174**, 104-117.
- [76] Boman, C., Petterson, E. C., Westerholm, R., Boström, D. and Nordin, A. (2011). Stove performance and emission characteristics in residential wood log and pellet combustion, part 1: pellet stoves. *Energy Fuel* **25**, 307-314, <https://doi.org/10.1021/ef100774x>.
- [77] Schmidl C., Luisser M., Padouvas E., Lasselsberger L., Rzaca M., Ramírez-Santa Cruz C., Handler M., Peng G., Bauer H. and Puxbaum H. (2011). Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. *Atmospheric Environment*. **45**, 7443-7454. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.006>.
- [78] Thrän D., Peetz D. and Schaunbach K. (2017). Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017. *IEA Bioenergy Task 40*.

- [79] Ozil, F., Tschamber, V., Haas, F. and Tronvé, G. (2011). The “Zero-CO” domestic fireplace: a catalytic solution to reduce pollutants, *Manag. Environ. Qual.* **22**, 429-439.
- [80] Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Bi, X. and Melin, S. (2011). Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* **15**, 3019-3028.
- [81] Khalsa J. H. A., Döhling F., and Berger F. (2016). Foliage and grass as fuel pellets. Small scale combustion of washed and mechanically leached biomass. *Energies* 2016, 9, 361; doi:10.3390/en9050361.
- [82] Hensgen, F. and Wachendorf, M. (2018). Aqueous leaching prior to dewatering improves the quality of solid fuels from grasslands. *Energies* 2018. 11, 846; <https://doi.org/doi:10.3390/en11040846>.
- [83] Nakashimaa G.T., Martinsa P.M., Hansteda A.L.S., Yamamotob H. and Yamajia F.M. (2017). Sugarcane trash for energy purposes: Storage time and particle size can improve the quality of biomass for fuel?. *Industrial Crops & Products.* **108**, 641-648.
- [84] Hu H., Westover T.L., Cherry R., Aston J.E., Lacey J.A. and Thompson D.N. (2017). Process simulation and cost analysis for removing inorganics from wood chips using combined mechanical and chemical preprocessing. *Bioenergy Research.* **10**, 237-247.
- [85] Williams C.L., Emerson R.M., Hernandez S., Klinger L.K., Fillerup E.P. and Thomas B.J. (2018). Preprocessing and Hybrid Biochemical/Thermochemical Conversion of Short Rotation Woody Coppice for Biofuels. *Frontiers in Energy Research.* <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00074>.
- [86] Gudka B., Jones J.M., Lea-Langton A.R., Williams A. and Saddawi A. (2016). A review of the mitigation of deposition and emission problems during biomass combustion through washing pre-treatment. *Journal of the Energy Institute.* **89** (2), 159-171.
- [87] Deng L., Jin X., Long J. and Che D. (2019). Ash deposition behaviors during combustion of raw and water washed biomass fuels. *Journal of the Energy Institute.* **92**, 959-970.
- [88] Lacey J.A., Emerson R.M., Thompson D.N. and Westover T.L. (2016). Ash reduction strategies in corn stover facilitated by anatomical and size fractionation. *Biomass and Bioenergy.* **90**, 173-180.
- [89] Raccuia S.A. and Melilli M.G. (2004). *Cynara cardunculus* L., a potential source of inulin in the Mediterranean environment: screening of genetic variability. *Australian Journal of Agricultural Research.* **55** (6), 693-698.

- [90] Gatto A., De Paola D., Bagnoli F., Vendramin G.G. and Sonante, G. (2013). Population structure of *Cynara Cardunculus* complex and the origin of the conspecific crops artichoke and cardoon. *Annals of Botany*. **112**, 855-865.
- [91] Fernández J. (2005). El cultivo del cardo (*Cynara cardunculus*L.) para la producción de biomasa. Hojas divulgadoras 2130HD. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- [92] Martin E. (2002). Alternativas a cultivos tradicionales (II): Cardo (*Cynara cardunculus* L.). *Vida Rural*. 24-26. ISSN: 1133-8938.
- [93] Zhao-Hua, Z., X. Yao Guo & L. Xin-Yu (1986). Paulownia in China: cultivation and utilization. *The Chinese Academy of Forestry*. Beijing. China.
- [94] Kasamaki P. (2007). La Paulownia sp. como base de los cultivos energéticos. URL: <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>. Accedido 15 enero de 2019.
- [95] Latorre Monteagudo B. and Ruano Martínez J. R. (2009). Caracterización energética de la biomasa de Paulownia sp. procedente de plántulas cultivadas de una savia. <http://www.revistamontes.net/descargalibre.aspx?id=13460>.
- [96] “IER” (Instituto de Investigación en Energías Renovables) (2012). <http://paulownia112.com/wp-content/uploads/2012/12/INFORME-DE-RESULTADOS-MS344-ANALISIS-BIOMASA-CLON-IN-VITRO-112r.pdf>. Accedido 15 enero de 2019.
- [97] Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación. Frutales de hueso: Análisis de la realidad productiva 2020. https://www.mapa.gob.es/es/prensa/analisisdelarealidadproductiva/frutalesdehueso2020_tcm30-561583.pdf. Accedido 15 de diciembre de 2021.
- [98] Bilandzija N., Voca N., Kricka T., Matin A. and Jurisic V. (2012) Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia. *Spanish Journal of Agricultural Research*. **10** (2), 292-298.
- [99] Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación. Anuario de Estadística 2020 https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2020Avance/TABLAS%20PDF/CAPITULO07/pdfc07_7.12.1.2.pdf. Accedido 11 de mayo de 2021.
- [100] FAO. (2016). Anuario estadístico de la FAO 2016. (<http://www.fao.org/3/a-i3592s.pdf>). Accedido 12 de agosto 2020.

- [101] ESYRCE, MAGRAMA (2014) Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Resultados nacionales y autonómicos.
- [102] ESYRCE, MAGRAMA (2020) Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Resultados nacionales y autonómicos.
- [103] Gómez M., Delgado F. and Parra M. (2012). Identificación de variedades de olivo cultivada en Extremadura mediante marcadores morfológicos y moleculares.
- [104] Lumbreras O. (2009). La experiencia de Acciona en biomasa. Seminario Montes y crisis energética: biomasa forestal. San Sebastián, del 2 al 5 de diciembre 2009. <http://www.forestales.net/archivos/jornadas/La%20Experiencia%20de%20Acciona%20en%20Biomasa.pdf>. Accedido 18 agosto de 2020.
- [105] UNE-EN ISO 18125. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.
- [106] UNE-EN 17831-1. Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets.
- [107] ASTM D 1857 “Standard Test Method for fusibility of Coal and Coke Ash”.
- [108] Nogales S. (2015). Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirolisis de biomasa mediante diversos métodos. Universidad de Extremadura.
- [109] UNE-EN ISO 18122. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza, 2015.
- [110] UNE-EN ISO 18134-3. Biocombustibles sólidos - Determinación del contenido de humedad - Método de secado en horno - Parte 1: Humedad total, 2015.
- [111] UNE-EN ISO 16948. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [112] UNE-EN ISO 16994, Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro, 2015.
- [113] UNE-EN ISO 16967. Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios, 2015.
- [114] UNE-EN ISO 17225. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustible. Biocombustible sólido. Especificaciones y clases de combustible. Parte 4. Astillas de madera clasificadas (ISO 17225-4: 2014).

- [115] https://www.oekofen.com/es-es/pellematic-condens_e/. Accedido 18 de Noviembre 2021.
- [116] UNE-EN ISO 303-5. Calderas de calefacción. Parte 5: Calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW. Terminología, requisitos, ensayos y marcado.
- [117] Qiulin Ma, Lujia Han and Guangqun Huang. (2017). Evaluation of different water-washing treatments effects on wheat straw combustion properties. *Bioresource Technology*. **245**, 1075-1083.
- [118] Yuan J H., Xu R K. and Zhang H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*. **102 (3)**, 3488-3497.
- [119] Peng Y. (2018). Improving the quality of crop residues by the reduction of ash content and inorganic constituents. Doctoral Thesis. The University of British Columbia (Vancouver).
- [120] Yu C., Thy P., Wang L., Anderson S. N., VanderFheynst J. S., Upadyaya S. K. and Jenkins B. M. (2014). Influence of leaching pretreatment on fuel properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. **128**, 43-53.
- [121] García, R., Pizarro C., Lavín A., Bueno J. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*. **103**, 249–258.
- [122] Suárez M. and Folgueras M. B. (2015). Comportamiento del S, Cl, Na y K durante la combustión de la biomasa. Trabajo fin de master. Universidad de Oviedo.
- [123] Solano M. L., Manzanedo E., Concheso R., Curt M. D., Sanz M. and Fernández J. (2010). Potassium fertilisation and the thermal behaviour of *Cynara cardunculus* L. *Biomass and Bioenergy*. **34 (10)**, 1487-1494.
- [124] Coulson M., Dahl J., Gansekoele E., Bridgwater A. V., Obernberger I. and Van de Beld L. (2004). Ash characteristics of perennial energy crops and their influence on thermal processing. Proceedings of the 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. 359-362.
- [125] Nurmi J. and Lehtimäki J. (2011). Debarking and drying of downy birch (*Betula pubescens*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) fuelwood in conjunction with multi-tree harvesting. *Biomass and Bioenergy*. **35 (8)**, 3376-338.

- [126] Martínez, R., Pedraza, F. E., Apolinar, J., Rutiaga, J.G., (2012). Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. *Chapingo sseria ciencias forestales y del ambiente*, 18: 3.
- [127] Kenney W.A., Sennerby-Forsse L., and Layton P. (1990). A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass and Bioenergy*. **21**, 163-188.
- [128] Nosek R., Holubcik M. and Jandacka J. (2016). The Impact of Bark Content of Wood Biomass on Biofuel Properties. *BioResources*. **11 (1)**, 44-53.
- [129] Chahal A. and Ciolkosz D. (2019). A review of wood-bark adhesion: Methods and mechanics of debarking for woody biomass. *Wood and Fiber Science*. **51 (3)**, 1-12.
- [130] Jacob S., Da Silva Perez D., Dupont C., Commandré J.-M., Broust F., Carriau A. and Sacco D. (2013). Short rotation forestry feedstock: Influence of particle size segregation on biomass properties. *Fuel*. **111**, 820-828.
- [131] Azcón, J., Talón, M., (2008). Fundamentos de la fisiología vegetal. Ed. McGrawHill. Madrid. ISBN: 9788448151683.
- [132] Bueno, J.G., Lavín, A.G., Pizarro, C., García, R., (2012). Biomasa. Caracterización de un recurso energético. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo; N° 1 edición. ISBN-10: 848317930X, ISBN-13: 978-8483179307.
- [133] Vassilev S., Baxter D., Andersen L. K. and Vassileva C. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. **89**. 913-933.
- [134] Johansen J., Jakobsen J., Frandsen F. and Glarborg P. (2011). Release of K, Cl and S during Pyrolysis and Combustión of High-Chlorine. *Biomass Energy Fuels*. **25 (11)** 4961–4971.
- [135] Deng I., Zhang T. and Che D. (2013). Effect of water washing on fuel properti-es, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass. *Fuel Process Technology*. **106**, 712-720.
- [136] Eom I. Y., Kim K. H., Kim J. Y., Lee S. M., Yeo H. M., Choi I. G. and Choi, J. W. (2011). Characterization of primary thermal degradation features of lignocellulosic biomass after removal of inorganic metals by diverse solvents. *Bioresource Technology*. **102**, 3437-3444.
- [137] Tharakan P.J., VolkL T.A., Abrahamson L.P. and White E.H. (2003). Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy*. **25 (6)**, 571-580.

- [138] Lima L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de maderas y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [139] Shara M. and Stohs S.J. (2015). Efficacy and Safety of White Willow Bark (*Salix alba*) Extracts. *Phytotherapy Research*. **29**, 112-116.
- [140] Fernández-Puratich H., Oliver-Villanueva J. V., Valiente M., Verdú S. and Albert N. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*. **20 (3)**, 97-117.
- [141] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). (2009). Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 76 pp.
- [142] Sánchez S., Moya A.J., Moya M., Romero I., Torrero R. y Bravo V. (2002). Aprovechamiento del residuo de poda del olivar. *Ingeniería Química* **34 (391)**, 194-202.
- [143] Bárcenas-Pazos G.M., Ríos-Villa R., Aguirre-Rivera J.R., Juárez-Flores B.I. y Honorato J. A. (2008). Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco en la Sierra de Álvarez, México. *Madera y Bosques* **14 (3)**, 81-94.
- [144] Muñoz F. (2011). Experiencias en plantaciones dendroenergéticas. Seminario: la energía del futuro viene de bosques. Colegio de Ing. Forestales. Talca, Chile. 40 p.
- [145] PROINNOMADERA. Productos innovadores procedentes de plantaciones de madera y orientados a mejorar la competitividad del sector valenciano de la madera y la biomasa (2016). http://intranet.aidimme.es/acceso_externo/difusion_proyectos/adjuntos_resultados/E12_PROINNOMADERA_IMAMCC_2016_1_AIDIMME_2016.pdf. Accedido 4 de diciembre de 2021.
- [146] Lucas M., Martínez E., F. García F. A., López F., Andrés M., Candel D. y Del Cerro A. (2010). El cultivo de *Paulonia* para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha: Primeros resultados. *Foresta*. **47/48**, 103-110.
- [147] Rodríguez-Rivas A. (2009). Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Santiago de Compostela: Universidad Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico. 128 p.

- [148] Tucki K., Orynycz O., Wasiak A., Swic A., Mieszkalski L. and Wichlacz J. (2020). Low Emissions Resulting from Combustion of Forest Biomass in a Small Scale Heating Device. *Energies*. **13**, 5495.
- [149] Ngendakumana P., Gabriele F., Restivo Y. and Sartor K. (2017). Energetic and Environmental Performances of a Domestic Hot Water Condensing Boiler Fired by Wood Pellets. *Energy Procedia*. **120**, 270-277.
- [150] Sánchez M. (2017). Planta de producción de pélets. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. http://www.cres.gr/bioenergy_chains/files/pdf/Articles/9-Rome%20V1A_71.pdf. Accedido 10 de diciembre 2021.
- [151] Tumuluru J., Conner C and Hoover A. (2016). Método para producir pélets duraderos con un menor consumo de energía utilizando rastrojo de maíz con alto contenido de humedad y un aglutinante de almidón de maíz en una fábrica de pélets de matriz plana. *Jove Journal*. doi: 10.3791/54092.