

EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LA BIOMASA RESIDUAL DE PODA URBANA: CASO DEL MUNICIPIO DE AVELLANEDA

Sergio Cataldo¹, M. Eyraz¹, Melisa A. Silvestrini¹, Jazmín C. Stivanello¹, Vanina L. Marino¹, Melisa D. Müller¹, Vanina B. Forlini¹, Melany G. Finn¹, Nicole O'Keeffe¹, Mayra Plaul^{1,2*}, Florencia E.

¹ Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER), Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de Avellaneda

² Laboratorio de Ambiente, Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de Avellaneda *e-mail: fplaul@undav.edu.ar

RESUMEN: El abastecimiento energético enfrenta un desafío constante debido al agotamiento de recursos fósiles y sus efectos ambientales nocivos. Este trabajo evalúa las características físicas y químicas de residuos de poda de la Ciudad de Avellaneda (Buenos Aires) para determinar su potencial de conversión en biocombustibles. Se realizaron muestreos entre mayo y agosto del 2019, bajo condiciones habituales de poda y chipeado. Los análisis de humedad muestran valores típicos de este tipo de residuo, aunque se observa una fracción adicional asociada a precipitaciones abundantes y a la exposición ambiental durante el almacenamiento del chip. El análisis inmediato indica que la composición de compuestos volátiles y carbono fijo es elevada, lo que resulta en valores aceptables de poder calorífico comparados con datos de biomasa residual reportados en la literatura. Sin embargo, el alto contenido de cenizas evidencia un exceso de corteza, reflejo de la ausencia de un proceso selectivo en la poda. Se estima que una selección más rigurosa en cuanto al diámetro y especie, podría mejorar las propiedades térmicas del material. Estos resultados aportan información relevante para el aprovechamiento energético de residuos de poda urbanos, favoreciendo la generación de biocombustibles y la reducción de impactos ambientales asociados a su disposición.

Palabras clave: Biomasa lignocelulósica, residuos de poda urbana, caracterización fisicoquímica, biocombustibles, energías renovables.

INTRODUCCIÓN

Existe un importante desafío en lo relativo al abastecimiento de las necesidades energéticas de la sociedad moderna, ya que depende principalmente por combustibles fósiles, principalmente petróleo, carbón y gas natural (Demirbas, 2005). El consumo de combustibles no renovables, conlleva dos problemáticas principales: (i) su agotamiento, al tratarse de un recurso escaso y finito, y (ii) su significativo impacto ambiental derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero (Sardón et al., 2003). Una alternativa es el uso de energías renovables, especialmente la biomasa (Canalis et al., 1998), cuyo aprovechamiento requiere cuantificar y caracterizar su disponibilidad a escala local, ya que ya identificación precisa potencial biomásico constituye el primer paso para evaluar la viabilidad técnica y económica de la generación de energía a partir de este recurso (Manrique et al., 2008).

El arbolado urbano cumple funciones ecológicas, estéticas y escénicas que mejoran la calidad ambiental y el bienestar poblacional. Aunque tradicionalmente se ha usado con fines ornamentales, actualmente también contribuye a la mitigación de la contaminación y la regulación microclimática. En este contexto, el árbol, según Jacinto (2001), es parte de un ecosistema forestal urbano.

El mantenimiento rutinario y los cambios en áreas verdes urbanas generan anualmente crecientes cantidades de residuos de poda, compuestos por biomasa lignocelulósica. Pocos estudios han evaluado



su potencial energético, aunque podrían contribuir a la diversificación hacia fuentes de energía renovable (García et al., 2014a, 2014b). Estos constituyen una fuente abundante pero subutilizada de biomasa, con potencial para fortalecer las bioeconomías regionales y nacionales (McKeever et al., 2003). El aprovechamiento eficiente de estos residuos podría generar combustibles biológicos para energía térmica o eléctrica (Quirno, 2003), ofreciendo beneficios como valorización de recursos locales, diversificación energética, sustitución parcial de combustibles fósiles y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. También favorecería la creación de empleo, disminuiría los residuos enviados a rellenos sanitarios y reduciría los costos de disposición final (MacFarlane, 2009).

El volumen y las características de los residuos lignocelulósicos dependen de la especie, tipo y frecuencia de poda, entre otros factores (Saiz de Omeñaca et al., 2004). Solo un porcentaje reducido se recupera, mientras que la mayoría termina en rellenos sanitarios; el resto se destina a compostaje, reciclaje u otros usos (McKeever et al., 2003).

Los estudios existentes se centran principalmente en el aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. La falta de información sobre sus propiedades físico-químicas limita la evaluación de su potencial energético y los beneficios sociales derivados, por ello una caracterización completa es clave para determinar la viabilidad del uso de estos residuos en procesos de termoconversión (González-Barragán et al., 2007). Las tecnologías de termoconversión dependen de las características y calidad de la biomasa; a menor homogeneidad y calidad del combustible, mayor complejidad requiere el sistema de conversión (Basu, 2018). Por ello, el primer paso en la evaluación de un combustible sólido es su caracterización detallada, para determinar sus propiedades, aplicaciones potenciales y posibles impactos ambientales (Saidur et al., 2011).

En el Partido de Avellaneda, los residuos de poda urbana se destinan casi en su totalidad a disposición final, empleándose sólo una pequeña fracción en compostaje para el vivero municipal. Estudiar sus características y posibilidades de aprovechamiento mediante métodos de transformación podría reducir el impacto ambiental y favorecer la diversificación energética con beneficios sociales locales. Sin embargo, persisten interrogantes sobre la disponibilidad de residuos de poda urbana y su aprovechamiento energético, especialmente a escala local, donde el potencial de la biomasa lignocelulósica puede evaluarse de manera más práctica.

OBJETIVOS

Objetivo General

El objetivo principal de esta investigación es evaluar las características físico-químicas de la biomasa lignocelulosa derivada de los residuos de la poda urbana de la Ciudad de Avellaneda, Provincia de Buenos Aires, con el fin de evaluar el potencial energético para su conversión en biocombustibles.

Objetivos Específicos

- a.** Determinar las propiedades físicas de la biomasa proveniente de la poda arbórea, en particular, el contenido de humedad.
- b.** Determinar las propiedades químicas de la biomasa proveniente de la poda arbórea a partir de su análisis inmediato.
- c.** Determinar las propiedades energéticas de la biomasa.

METODOLOGÍA

El Partido de Avellaneda, situado en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), presenta una amplia cobertura arbórea y una notable diversidad de especies. Según el censo de 2012, las quince especies predominantes, principalmente Fresno (*Fraxinus* spp.), Plátano (*Platanus* spp.), Ligustro (*Ligustrum* spp.) y Ficus (*Ficus* spp.), constituyen aproximadamente el 60% del total. La poda de los árboles urbanos dentro del Municipio se realiza durante los meses de mayo y agosto, y esta operación se lleva a cabo sin criterios de selección de especies ni planificación previa establecida. Los residuos de poda generados se recolectan y se envían a un punto de acopio, donde son aislados, obteniéndose partículas de distintos tamaños y mezclas. Ya que no hay un programa selectivo de poda y que la

información sobre rutas de corte se determina el mismo día, se optó por realizar el muestreo tomando el material en las condiciones de acopio, una vez astillado, preservando sus características originales sin ningún tipo de modificación adicional.

La metodología de muestreo siguió la Norma ASTM 5231-92 (2016) para residuos urbanos, con el fin de obtener muestras representativas de las especies del censo de arbolado urbano de 2012. El muestreo se realizó quincenalmente entre mayo y agosto de 2019, recolectando 18 muestras ($n = 18$), de las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

Contenido de humedad

El contenido de humedad es un parámetro de especial relevancia en cualquier proceso de aprovechamiento energético, ya que su presencia disminuye el poder calorífico de la biomasa, afectando el rendimiento óptimo del proceso. Por ejemplo, en la combustión, un contenido de humedad mayor al 50% afectaría el encendido de la biomasa (Mulky y Niemeyer, 2019). Por ello, resulta imprescindible una caracterización adecuada, considerando diversos factores, como la humedad intrínseca, que es propia de la biomasa y la extrínseca que dependen de las condiciones climáticas, de cosecha y transporte del material. ya que un alto contenido de agua favorece la respiración microbiana, lo cual podría alterar la calidad química y física del combustible.

Según la especificación técnica UNE-CEN/TS 14774-3 (2010) las muestras se secaron en estufa a 105 ± 2 °C durante 24 h hasta alcanzar masa constante, pesándose antes y después del secado.

Determinación del contenido de materia volátil

La materia volátil corresponde a los compuestos liberados durante la descomposición termoquímica de la biomasa, incluyendo gases combustibles (CO , H_2 , C_xH_y) e inertes (CO_2 , NO_x , SO_x). Constituye la fracción más representativa de la biomasa (75–90%), facilitando su encendido a temperaturas relativamente bajas (~ 350 °C) en comparación con el carbón (Grotkjær et al., 2003).

El contenido de materia volátil se determinó siguiendo el método descrito en la norma UNE-CEN/TS 15148 (2010). Una porción de la muestra se calentó en ausencia de aire a 900 ± 10 °C durante 7 minutos. El porcentaje de materia volátil se calculó a partir de la pérdida de masa de la muestra, descontando previamente la pérdida atribuible a la humedad.

Determinación del contenido de ceniza

El contenido de ceniza representa la fracción inorgánica del combustible tras la combustión completa y es fundamental para cuantificar residuos y evaluar la eficiencia térmica, ya que absorbe energía durante la combustión (Saidur et al., 2011). Además, su análisis permite estudiar posibles efectos corrosivos y formación de escoria en equipos a altas temperaturas (Núñez et al., 2016). El contenido de ceniza varía según especie, tejido y condiciones de crecimiento, afectando el potencial energético y la generación de residuos (Puri et al., 2024). En especies leñosas como álamo y sauce, oscila entre 0,9–4,7 % y 1,5–4,3 % respectivamente (Kutsokon et al., 2022), mientras que residuos agrícolas lignocelulósicos, como la cáscara de arroz, pueden alcanzar hasta 20 % (Maj et al., 2025).

La determinación se realizó incinerando la muestra seca a 550 °C durante 3 a 4 h, seguido de enfriamiento en desecador y pesaje a temperatura ambiente según UNE-CEN/TS 14475 (2010).

Determinación del carbono fijo

El carbono sólido (carbono fijo) es el que permanece tras la liberación de los componentes volátiles durante la combustión (Seijas et al., 2014) y constituye la principal fuente de generación de calor, contribuyendo significativamente al poder calorífico del biocombustible sólido (Onochie et al., 2017). Se determina de manera indirecta como (Ec.1):

$$\%C_{fijo} = 100 - (\%Cenizas + \%Materia\ volátil) \quad (1)$$

donde $\%C_{fijo}$ corresponde al contenido total de carbono fijo de la muestra, $\%Ceniza$ indica el porcentaje de cenizas calculado para dicha muestra y $\%Materia\ volátil$ representa el contenido de materia volátil.

Determinación del poder calorífico

El poder calorífico representa la energía liberada por la combustión completa de una unidad de masa o volumen del combustible (Quirino, 2005), expresándose en MJ/kg para sólidos, MJ/L para líquidos y MJ/Nm³ para gases, y depende de la composición química y del contenido de humedad de la biomasa (Noqueira, 2007; Vieira, 2012). El poder calorífico superior (PCS) corresponde a la combustión a volumen constante, con condensación del agua formada, mientras que el poder calorífico inferior (PCI) se determina a presión constante, sin condensación, siendo menor que el PCS (Santos, 2012). Ambos son propiedades clave para seleccionar procesos termoquímicos (Vieira, 2012).

El PCS se determinó indirectamente mediante correlación a partir de cenizas, volátiles, carbono fijo y humedad (Parikha, 2005; Nhuchhen, 2012) (Ec.2):

$$PCS = 0,3536 FC + 0,1559 VM - 0,0078 Ash (MJ/kg) \quad (2)$$

donde FC es carbono fijo, VM materia volátil y Ash cenizas, todos en base seca. Los valores experimentales de estas fracciones se emplearon para estimar el PCS, con un error absoluto medio de 3,74 % y sesgo de 0,12 % (Parikha, 2005).

RESULTADOS

Debido a la ausencia de un proceso de poda selectivo y de una planificación previa, se considera que los análisis efectuados son representativos únicamente de las especies arbóreas predominantes en el municipio, y no reflejan la totalidad del arbolado urbano.

Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los análisis realizados.

Muestra	Fecha del Muestreo	Porcentaje de Humedad (%)	Porcentaje de Cenizas (%)	Porcentaje de Volátiles (%)	Carbono Fijo (%)	Poder calorífico (Kcal/kg)
M1	15/6/2019	43,87	4,90	69,13	25,97	4758,31
M2	15/6/2019	42,70	4,90	70,15	24,95	4710,00
M3	15/6/2019	41,22	5,83	73,00	21,17	4495,38
M4	29/6/2019	45,96	13,38	72,15	14,48	3884,34
M5	29/6/2019	45,26	12,74	71,28	15,98	3979,99
M6	29/6/2019	47,88	13,14	70,22	16,64	3995,30
M7	6/7/2019	27,73	15,08	74,91	10,01	3607,06
M8	6/7/2019	26,65	15,79	76,12	8,09	3488,34
M9	6/7/2019	29,30	14,08	76,38	9,54	3623,65
M10	13/7/2019	29,41	12,01	74,92	13,07	3871,52
M11	13/7/2019	36,63	12,98	75,41	11,61	3764,67
M12	13/7/2019	38,12	16,43	72,99	10,58	3581,03
M13	3/8/2019	29,35	5,84	77,78	16,39	4269,14
M14	3/8/2019	25,77	7,87	77,14	14,98	4123,24
M15	3/8/2019	25,87	6,64	77,56	15,80	4210,17
M16	13/8/2019	30,58	8,67	77,39	13,94	4043,11
M17	13/8/2019	26,27	11,80	77,55	10,66	3765,59
M18	13/8/2019	25,78	11,61	77,56	10,83	3781,36

En este contexto, se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada uno de los análisis realizados (Tabla 1).

Determinación del contenido de humedad

De acuerdo con lo expuesto por Lehtikangas (2017) un elevado contenido de humedad influye directamente con el poder calorífico de la biomasa y por consiguiente en la eficiencia del proceso de combustión y la temperatura que se pueda alcanzar. Por el contrario, niveles reducidos de humedad permiten aumentar la eficiencia y el rendimiento de la combustión (Seijas et al., 2014).

En el análisis del contenido de humedad expuesto en la Figura 1 se observan variaciones significativas, con valores promedio de 34,35%, por encima de lo esperado para este tipo de residuo, cuyos valores medios oscilaron entre 11,8-12,3% antes del proceso de compactación (Smith et al., 2019) o incluso 7,1% para ramas de árboles, tales como roble, álamo y eucalipto (García et al., 2012). Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas los residuos de poda, donde parte de esta humedad debe considerarse extrínseca (García et al., 2012), así como a la ausencia de un proceso de poda selectiva, encontrándose una mezcla de ramas pequeñas y hojas que aumenta el contenido de humedad.

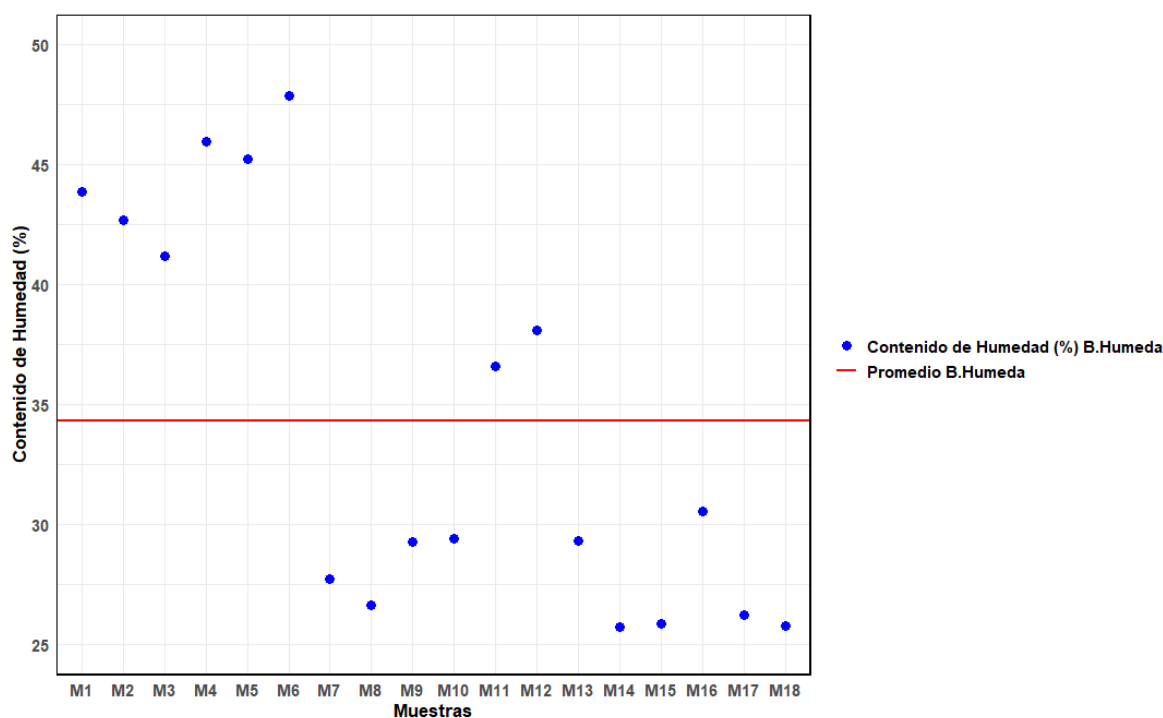


Figura 1: Contenido de humedad

Determinación del contenido de materia volátil

El contenido de materia volátil influye directamente en la velocidad de combustión, puesto a que un mayor contenido de material volátil en la biomasa, mayor es la inflamabilidad del biocombustible sólido (Lukmandaru et al., 2017). Los resultados obtenidos en el análisis presentado en la Figura 2 para el contenido de materia volátil se encuentran dentro del límite inferior del rango de valores presentados por Brito y Barrichelo (1978) para residuos de madera con potencial de densificación, que se encuentran entre 74,10% y 89,90%. Por otro lado, los valores promedio observados por Smith et al. (2019) al evaluar los residuos de poda urbana para la fabricación de briquetas (74,73%) coinciden con los obtenidos en este trabajo y presentan características similares. Algo similar reporta García et al. (2012) quien encuentra valores del 77,7% para residuos de poda de árboles.

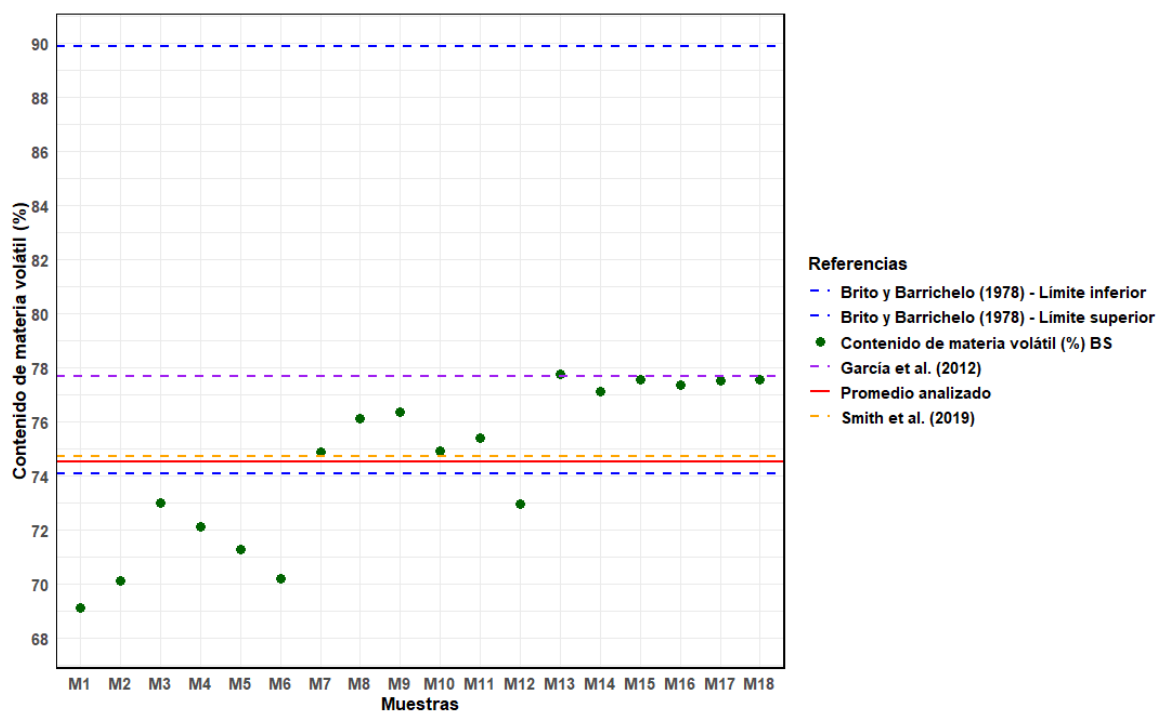


Figura 2: Contenido de materia volátil

En comparación con los datos mencionados, el valor reportado en este estudio indica un alto porcentaje de volatilidad (>70%), permitiendo que la biomasa arda con gran facilidad, consiguiendo temperaturas elevadas durante el proceso de combustión y finalmente generando una llama de mayor longitud.

Si consideramos que los materiales volátiles presentes en el combustible son responsables de gran parte del suministro de energía durante la combustión, su análisis también permite estimar las formas de energía que pueden liberarse a partir del material. Sin embargo, se debe considerar que estos compuestos promueven una combustión muy rápida del combustible, por ello se debe evaluar un proceso de densificación que reduzca la superficie expuesta, ralentizando la velocidad de las reacciones y optimizando el tiempo de aporte energético durante la combustión.

Determinación del contenido de cenizas

El material de poda urbana analizado presentó un alto valor de contenido de cenizas con un promedio de 10,76%, lo que puede explicarse por la presencia de contaminantes, tales como suciedad, polvo y arena, que probablemente se mezclan con el material durante la recolección. Según Fernández-Puratich (2014) el porcentaje de cenizas en la biomasa leñosa de fuste presenta porcentajes de cenizas de aproximadamente 1,8%, algo menor respecto al valor que presentan las ramas con hojas (3,2%). En el estudio de Smith et al. (2019) el valor de cenizas alcanza un promedio del 9,57%, mientras que García et al. (2012) reporta valores semejantes a los obtenidos en este análisis, con promedios de 12,1%.

Es importante considerar el contenido de cenizas en los residuos de poda urbana como un parámetro relevante. Zajac et al. (2018), al analizar las cortezas, observan que el contenido de cenizas aumenta significativamente, lo que sugiere que dicho incremento podría estar asociado al mayor contenido de corteza en el árbol. Según esto se puede inferir que los valores analizados tan elevados corresponden a una falta de selectividad en el proceso de poda, que probablemente incluye una elevada proporción de hojas y ramas pequeñas, donde la corteza predomina. Además, la mezcla con otros inorgánicos en su traslado y las condiciones de estacionamiento, los niveles de contaminación del suelo, la forma de recolección y el transporte de las ramas constituyen una serie de factores determinantes en el incremento del contenido de cenizas (Cerdeira, 2015).

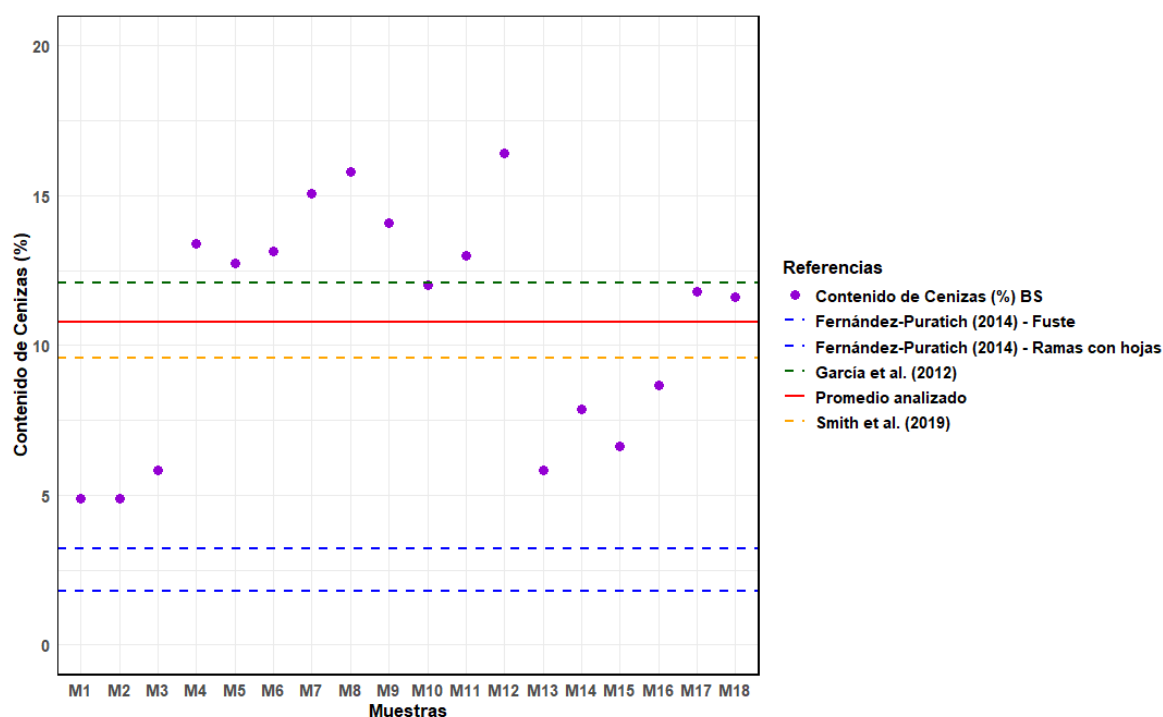


Figura 3: Contenido de cenizas

Carbono Fijo

Los combustibles con mayores niveles de carbono fijo son deseables debido a las características de las reacciones que ocurren bajo su influencia, tales como una mayor liberación de energía durante la combustión y, en general, una mayor resistencia térmica de los combustibles, lo que favorece una combustión más lenta.

Tabla 1: Valores de Carbono fijo (%) reportados por la bibliografía

Tipo de biomasa	Valores reportado (%)	Referencia
Residuos lignocelulósicos	15-25	García et al. (2012)
Aulaga (<i>Genista scorpius</i>)	55	García et al. (2012)
Carbón vegetal	70	García et al. (2012)
Residuo de poda	16,69	Smith et al. (2019)
Ramas	8,4	Tauro et al. (2022)
Ramas con hojas	12,4	Tauro et al. (2022)

En este estudio, los valores obtenidos, presentados en la Figura 4, varían entre 8,09% y 25,97% dependiendo de la variabilidad del contenido de cenizas y materia volátil. De acuerdo con el estudio de Smith et al. (2019), el valor de carbono fijo para poda urbana alcanza un promedio del 16,69%. En contraste, García et al. (2012) reportan valores para distintos residuos lignocelulósicos que en su mayoría se sitúan entre 15-25%, con casos excepcionales de hasta 55% en aulaga y 70% en carbón vegetal. De forma complementaria, Tauro et al. (2022) informaron valores de carbono fijo del 8,4% en ramas y del 12,4% en ramas con hojas de aguacate, lo que evidencia la variabilidad de este parámetro según la fracción de biomasa analizada. En conjunto, estos resultados (Tabla 1) muestran que los valores obtenidos en el presente análisis se encuentran dentro del rango esperado para este tipo de biomosas.

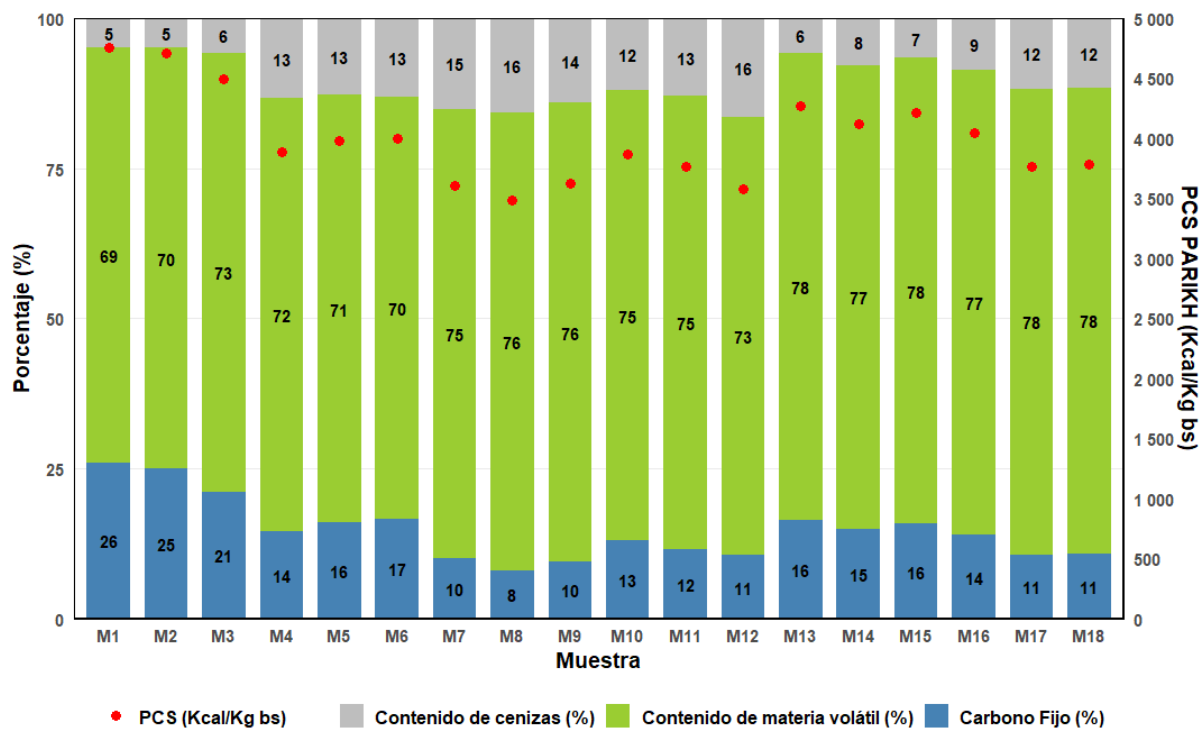


Figura 4: Variación del poder calorífico con contenido de cenizas y carbono fijo

Determinación del Poder calorífico

El poder calorífico contenido en los biocombustibles, como se observa en la Figura 4, está condicionado principalmente por parámetros como el contenido de ceniza, la humedad y el carbono fijo. En general, a mayor generación de cenizas, menor es la capacidad energética alcanzada. Esto se evidencia en la muestra M8, que, con un valor de 3488,34 Kcal/kg, presenta una elevada proporción de cenizas que limita su rendimiento energético. Por el contrario, un poder calorífico mayor (M1: 4758,31 Kcal/kg) se relaciona con la generación mínima de ceniza (Seijas S, y otros, 2014). De manera similar, la capacidad energética se ve influenciada por el contenido de carbono fijo, reflejándose en el mayor valor para la muestra M1, que presenta el máximo contenido de carbono fijo (25,97%), mientras que la muestra M8, con el contenido más bajo de carbono fijo (8,09%), exhibe una capacidad energética significativamente inferior.

En la Figura 5 se observa la variación del poder calorífico superior (PCS), calculado a partir de los resultados obtenidos en este trabajo mediante la correlación propuesta por Parikh (2005). Se han alcanzado valores promedio de 3997,34 Kcal/kg, que superan a los reportados por Ibarra et al. (2017) para el mismo residuo, donde alcanzan valores de 3771,38 Kcal/kg. El estudio de Smith et al. (2019) que evaluó el PCS de residuos de poda, registró valores de 4.702,63 Kcal/kg, los cuales son superiores a los reportados por García et al. (2012), con un promedio de 4.100,98 Kcal/kg.

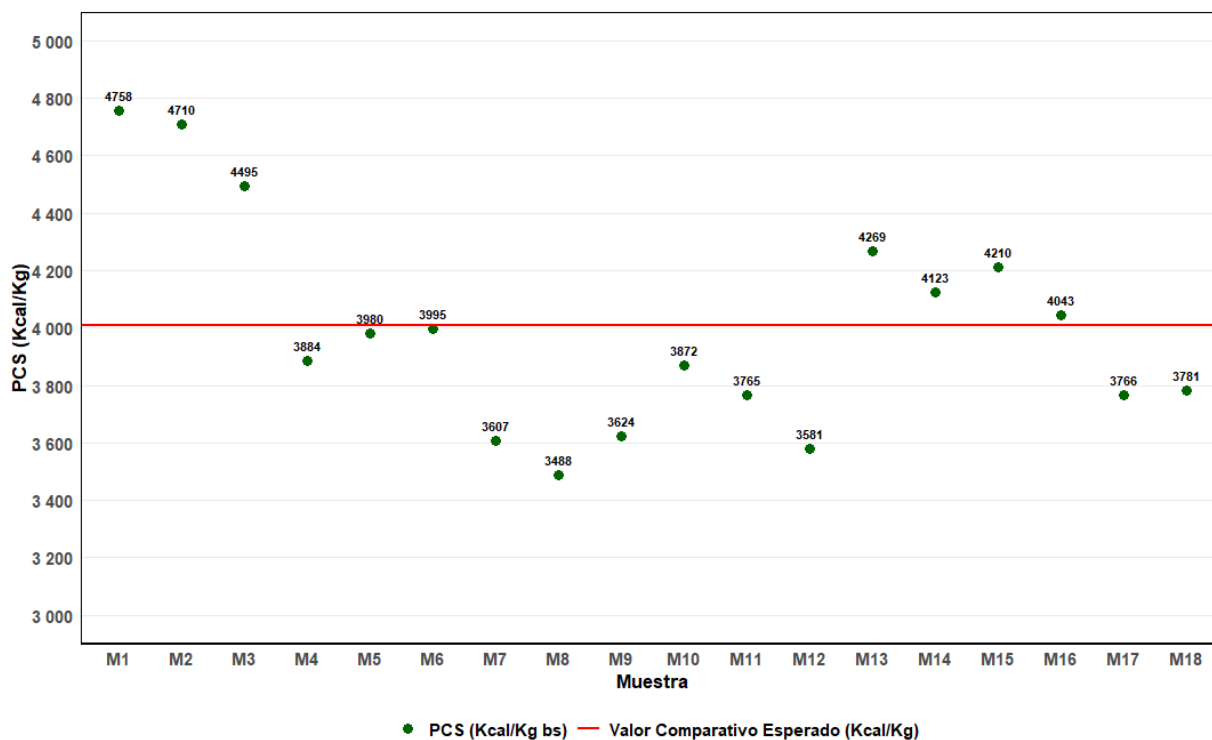


Figura 5: Determinación del poder calorífico superior

En este sentido, los resultados de esta investigación muestran un grado de eficiencia aceptable y se alinean con lo señalado por Rodríguez-Rivas (2009), quien indica que el poder calorífico de la biomasa depende de su composición, tanto anatómica como química. Así, las fracciones más leñosas tienden a presentar un mayor poder calorífico debido a su mayor contenido de lignina y una mayor densidad. Mientras que las hojas, aunque en algunos casos muestran valores elevados por la presencia de aceites esenciales y compuestos volátiles como taninos y terpenos, suelen contribuir a una disminución del poder calorífico global cuando se incorporan en proporción significativa a la biomasa combustible (Rodríguez-Rivas, 2009), lo que explica la tendencia a la disminución del PC cuando se incorporaron muestras con este tipo de residuos.

CONCLUSIONES

Los residuos de poda urbana analizados presentan valores elevados de contenido de cenizas y humedad, lo cual limita su aptitud para la producción directa de astillas o pellets con calidad óptima. Por ello, sería conveniente implementar una gestión de la poda que contemple no solo la selectividad de especies sino también una mejora del proceso de recolección. En este sentido, resulta necesario discriminar el material según el tamaño de las ramas, eliminar las hojas y asegurar un manejo cuidadoso durante el traslado y almacenamiento. Además, se debe evitar la incorporación de materiales inertes y garantizarse un adecuado proceso de secado natural, con el fin de minimizar la humedad extrínseca. Respecto a los valores del poder calorífico obtenidos, se podría considerar que el margen en el que se encuentran es aceptable en comparación con datos reportados en la literatura para biomasa residual. Sin embargo, estos valores lograrían verse mejorados si se tiene en cuenta las condiciones anteriormente planteadas.

Finalmente, consideramos imprescindible realizar otros estudios experimentales que permitan determinar con mayor precisión el poder calorífico de la biomasa bajo condiciones óptimas, considerando solamente las especies predominantes de la zona, tomando muestras de ramas sin hojas y aquellas en cuyo diámetro predomine el material leñoso sobre la corteza. Esto aportará un panorama más claro para la toma de decisiones respecto al proceso de termoconversión y de gestión de la poda urbana, contribuyendo a una valorización energética más eficiente y sostenible.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El proyecto se desarrolló dentro del Programa de Reconocimiento y Estímulo Institucional de Investigaciones Científicas y Artísticas (PRIICA) que corresponden a proyectos sin financiamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos se destinan a las autoridades del Departamento de Ambiente y Turismo quienes facilitaron los equipos y material del laboratorio para realizar los ensayos correspondientes.

REFERENCIAS

- Adegoke O. A., Fuwape J. A., Fabiyi J. S., Combustion Properties of Some Tropical Wood Species and Their Pyrolytic Products Characterization, *Energy and Power*, Vol. 4 No. 3, 2014, pp. 54-57. doi: 10.5923/j.ep.20140403.02.
- ASTM International. (2016). Standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste (ASTM D5231-92). <https://doi.org/10.1520/D5231-92R16>
- Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press.
- Brite, J. O., & Barrichello, L. E. G. (1978). Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. *IPEF*, 16, 63-70.
- Canalis, P., Royo, J., & Tapia, R. (1998). La combustión: Una alternativa para la utilización de la biomasa residual. Fundación Circe, Universidad de Zaragoza, 1-8.
- Carmona Cerda, R. J. (2015). Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources: Biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.02.002>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. *Fuel*, 117, 1130-1138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.048>
- González-Barragán, I., López Torres, D., Alonso, M. A., & Arias, M. (2007). Aprovechamiento energético de sarmientos en calderas de biomasa mediante pelletizado. *Agricultura*, 7, 806-811.
- Grotkjær, T., Dam-Johansen, K., Jensen, A. D., & Glarborg, P. (2003). An experimental study of biomass ignition. *Fuel*, 82(7), 825-833. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00369-1)
- Fernández-Puratich, Harald, Oliver-Villanueva, José Vicente, Valiente, Mireya, Verdú, Salvador, & Albert, Nuria. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111.
- Ibarra, J., & Rueda Ordoñez, Y. J. (2017). Biomass densification: A review of the current state-of-the-art of the pellet market and analysis of new research trends. *TECCIENCIA*, 12(23), 81-92. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.10>
- Jacinto, J. M. M. (2001). Análise silvicultural urbana de seis espécies florestais utilizadas na arborização de Brasília. (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília, Brasília.
- Khan, A., De Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21-50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Kutsokon, N., Rakhmetov, D., Rakhmetova, S., Khudolieieva, L., & Rashydov, N. (2022). Nursery screening of poplar and willow clones for biofuel application in Ukraine. *iForest*, 15, 401-410. <https://doi.org/10.3832/ifor3732-015>
- Lukmandaru, G., & Hidayah, R. N. (2017). Studi mutu kayu jati di hutan rakyat Gunungkidul VI: Kadar zat anorganik dan keasaman. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 11(1), 63-75. <http://dx.doi.org/10.22146/jik.24901>

- MacFarlane, D. W. (2009). Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration, and sustainable forest management in the U.S.A. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 628–634. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.004>
- Maj, I., Niesporek, K., Płaza, P., Maier, J., & Łój, P. (2025). Biomass ash: A review of chemical compositions and management trends. *Sustainability*, 17(11), 4925. <https://doi.org/10.3390/su17114925>
- Manrique, S., Franco, J., Núñez, V., & Seghezzo, L. (2008). Potencial energético de biomasa residual de tabaco y ají en el municipio de Coronel Moldes (Salta, Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12. Salta, Argentina.
- McKeever, D. B., & Skog, K. E. (2003). Urban tree and wood yard residues: Another wood resource. Research Note FPL-RN-0290. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-RN-290>
- Mulky, T. C., & Niemeyer, K. E. (2019). Computational study of the effects of density, fuel content, and moisture content on smoldering propagation of cellulose and hemicellulose mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 4091–4098. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.164>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053>
- Nhuchhen, D. R., & Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Energy*, 47(1), 520–528. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Nogueira, M. F. M. (2007). Biomassa energética: Caracterização da biomassa. Palestra proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC.
- Onochie, U. P., Obanor, A. I., Aliu, S. A., & Ighodaro, O. O. (2017). Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 36(3), 987–990. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v36i3.44>
- Paula, L. E. R., Trugilho, P. F., Renzende, R. N., Assis, C. O., & Baliza, A. E. R. (2010). Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 103–110.
- Parikh, J., Channiwalla, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, 2, 1378361. <http://dx.doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
- Quirino, W. F. (2003). Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA.
- 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: Universidade. Servizo de Publicacions e Intercambio Científico.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Saiz de Omeñaca, J. A., & Prieto Rodríguez, A. (2004). *Arboricultura urbana*. Madrid: CEDEX, D.L.
- Santos, J. R. S. (2012). Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos [Tesis de maestría, USP]. Piracicaba.
- Sardón, J., García, F., & Fernández, J. (2003). Energías renovables para el desarrollo. *Cooperación Internacional*. Editorial Thomson y Paraninfo, 186–260.
- Seijas, S., Seijas, P., Seijas, N., Chávez, A., Salgado, L., & Alva, M. (2014). Optimización del proceso de densificación de desechos lignocelulósicos para la conformación de pellets energéticos. *Ciencia para el desarrollo*, 17(1), 73–80.
- Smith, A. K. de G., Alesi, L. S., Varanda, L. D., Silva, D. A. da, & Santos, L. R. O. (2019). Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(2), 138–143. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>
- Tauro, R., Velázquez-Martí, B., Manrique, S., Ricker, M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Masera, O., Soria-González, J. A., & Armendáriz-Arnez, C. (2022). Potential use

- of pruning residues from avocado trees as energy input in rural communities. *Energies*, 15(5), 1715. <https://doi.org/10.3390/en15051715>
- UNE-CEN/TS 14774-3. (2010). Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad.
- UNE-CEN/TS 14475. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas.
- UNE-CEN/TS 15148. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materias volátiles.
- Vale, A. T., Mendes, R. M., Amorim, M. R. S., & Dantas, V. F. S. (2011). Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). *Cerne*, 17(2), 267–273.
- Vieira, C. A. (2012). Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. UNIOESTE - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Paraná.
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołbiowski, W., & Szczepanik, M. (2018). Chemical characteristics of biomass ashes.

PHYSICOCHEMICAL AND ENERGY CHARACTERIZATION OF RESIDUAL BIOMASS FROM URBAN TREE PRUNING: A CASE STUDY IN THE MUNICIPALITY OF AVELLANEDA

ABSTRACT: The global energy sector faces persistent challenges stemming from the depletion of fossil fuel reserves and the adverse environmental impacts associated with their exploitation. This study characterizes the physicochemical properties of lignocellulosic pruning residues generated in the City of Avellaneda (Buenos Aires, Argentina) to assess their suitability for conversion into biofuels. Sampling was conducted between May and August 2019 under standard pruning and chipping practices. Moisture content exhibited values consistent with those typically reported for this type of biomass; however, an additional fraction was attributed to high precipitation levels and prolonged environmental exposure during storage. Proximate analysis revealed elevated levels of volatile matter and fixed carbon, resulting in calorific values comparable to those documented for other residual biomass sources. Conversely, the ash content was markedly high, indicative of an excessive bark fraction, likely due to the absence of selective pruning criteria in terms of branch diameter and species. Implementing such selection measures could enhance the thermal performance of the feedstock. Overall, the results underscore the potential of urban pruning residues as a viable feedstock for bioenergy production, while highlighting operational adjustments that could optimize their energy yield and mitigate environmental impacts associated with waste management.

Keywords: Lignocellulosic biomass, urban pruning residues, physicochemical characterization, biofuels, renewable energy.