

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS BIOMÁSICOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y VALORIZACIÓN DE LAS CENIZAS GENERADAS DE DICHS PROCESOS

Gisela Pelozo^{1,2}, Cecilia Mazzola^{1,3}, Miguel Unsen¹, Laura Bárbaro^{1,2},
Nancy Quaranta^{1,3}

¹*Grupo de Estudios Ambientales, Universidad Tecnológica Nacional. Colón 332 (2900), San Nicolás, Argentina.*

²*Departamento Ingeniería Industrial, Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional. Colón 332 (2900), San Nicolás, Argentina.*

³*Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Calle 526 entre 10 y 11, La Plata, 1900, Buenos Aires, Argentina
{gpelozo, cmazzola, munsen, lbarbaro, nquaranta}@frsn.utm.edu.ar*

RESUMEN

En los últimos años se vienen adoptando estrategias para lograr un crecimiento económico más sostenible, basado en el enfoque de la economía circular. A raíz de este nuevo enfoque, se han intensificado los esfuerzos para buscar fuentes de energía renovables y proponer opciones eficientes de reutilización de cualquier flujo de residuos valioso originado por los ciclos de producción. La utilización de biomasas residuales ofrece perspectivas atractivas, siendo en general la más importante la descontaminación que se produce al eliminar estos residuos, y además la energía que se puede generar con su aprovechamiento. En Argentina, se han creado muchas empresas que producen energía a partir de combustibles derivados de sus residuos biomásicos. Cuando estos se queman para producir electricidad o calor, inevitablemente se producen cenizas y, en consecuencia, se requieren estrategias alternativas de reutilización. En este trabajo se presentan algunas de las principales generadoras de energía a partir de biomasa residual del país y se estudia la potencial aplicación de las cenizas generadas en una de ellas como agregado en matrices cerámicas, evaluando sus propiedades físico-mecánicas.

Palabras Claves: biomasa, cenizas biomásicas, valorización.

ABSTRACT

In recent years, strategies have been adopted to achieve more sustainable economic growth, based on the circular economy approach. As a result of this new approach, efforts have been intensified to find renewable energy sources and propose efficient options for reusing valuable waste stream originating from production cycles. The use of residual biomass offers attractive perspectives, the most important being generally the decontamination that occurs when eliminating this waste, and also the energy that can be generated with its use. In Argentina, many companies have been created to produce energy from fuels derived from their biomass waste. When these are burned to produce electricity or heat, ash will inevitably be produced and, consequently, alternative reuse strategies are required. In this work, some of the main energy generators from residual biomass in the country are presented and the potential application of the ashes generated in one of them as aggregate in ceramic matrices is studied, evaluating their physico-mechanical properties.

Keywords: biomass, biomass ashes, valorization

1. INTRODUCCIÓN

La combustión de recursos energéticos fósiles ha sido el método convencional de producción de energía durante muchos años; sin embargo, durante las últimas décadas, la escasez de combustibles fósiles, el impacto ambiental negativo derivado de su uso y su variabilidad de precios han alentado a los gobiernos a buscar fuentes alternativas de energía que diversifiquen su producción mejorando la eficiencia de su gestión, independencia política, crecimiento económico y protección del medio ambiente. Para garantizar un suministro de energía seguro, se están desarrollando nuevos modelos energéticos de acuerdo con sistemas renovables, sostenibles, eficientes y rentables.

Entre los recursos renovables, la biomasa se define como la materia orgánica de diferentes plantas, residuos agrícolas, industriales y urbanos, que se caracteriza por su gran potencial energético, que puede utilizarse para producir energía térmica y eléctrica, y biocarburantes. Esta fuente de energía presenta importantes ventajas, incluyendo la contribución al desarrollo económico y social de los países y regiones en las que se encuentra, así como la reducción de residuos y de emisiones de CO₂, entre otras.

La biomasa para energía se puede clasificar en: biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos. El uso de fuentes de energía distintas a las habituales implica necesariamente la resolución de los problemas que se plantean como pueden ser la disponibilidad y la rentabilidad. Una forma de energía no va a desplazar a otra si no es, al menos, igualmente accesible, gestionable y económica a un precio asequible. La biomasa como fuente de energía satisface todos estos requisitos, además de tener algunas ventajas: es fuente de energía renovable y económica, mejora la gestión de los residuos, puede ser utilizada en diversas aplicaciones (transporte, calefacción, producción de electricidad) y es de producción local además de ser una energía limpia (reduce las emisiones de CO, HC, NO) (Agrela et al., 2019).

A pesar de las importantes ventajas que ofrece la biomasa, también cuenta con algunas de las siguientes desventajas: requiere un gran espacio para ser producida y almacenada antes de ser convertida en energía, presenta altos costos de producción, especialmente debido a los altos costos de transporte, procesos de pretratamiento, redes y canales de distribución no tan desarrollados como en el caso de los combustibles líquidos y/o sólidos, entre otras.

En la actualidad, los tipos de biomasa utilizados para la generación de calor o electricidad provienen comúnmente de residuos agrícolas o forestales, cultivos energéticos específicos, combustible de madera/carbón/astillas/pellets, residuos sólidos urbanos, lodos de depuradora y lodos de papel. El poder calorífico de la biomasa seca varía según la materia prima. Por ejemplo, su valor está entre 8 y 19 MJ/kg para la madera y residuos agrícolas como de colza, de girasol, de arroz y de caña de azúcar. El poder calorífico de los residuos sólidos urbanos (RSU) varía entre 4 y 17 MJ/kg dependiendo de la composición de los residuos y para los lodos de papel secos es de 6 MJ/kg. Se prevé que la bioenergía procedente de una variedad de combustibles alternativos diferentes hará una contribución importante para satisfacer las demandas energéticas futuras (Zhai et al., 2021).

Cuando los combustibles derivados de estos recursos renovables o materiales de desecho se queman para producir electricidad o calor, inevitablemente se producirá ceniza, y esa ceniza diferirá en sus propiedades físicas y químicas de la ceniza producida por combustibles más tradicionales como el carbón. Por lo tanto, se requieren estrategias alternativas de reutilización o, si es necesario, de eliminación. Además, aunque el volumen de la ceniza producida será una fracción del de la materia prima (1,5 al 2 %), la cantidad total de ceniza producida a nivel mundial sigue siendo considerable y es probable que aumente a medida que se incremente la utilización de bioenergía. Se necesita una mejor comprensión de la ceniza producida a partir de estos combustibles alternativos si esa ceniza se va a utilizar de forma productiva (para generar una economía de energía circular o promover una economía de materiales circular), o eliminar de manera segura con la inversión mínima de energía adicional (Zhai et al., 2021).

Cuando se quema una materia prima de combustible renovable para generar electricidad/calor, hay muchos factores que pueden determinar las propiedades de las cenizas resultantes y, por lo tanto, las medidas apropiadas a dictar para el manejo posterior de las cenizas. El factor principal que determina la composición química de la ceniza es la composición de la materia prima, pero factores como la naturaleza física de la materia prima y el tipo, tamaño y estado operativo del incinerador, pueden determinar la eficiencia de combustión y la partición de elementos volátiles. Las cenizas de biomasa suelen ser ricas en elementos como Si, K, Ca, P, Mg, etc., por lo que es posible recuperar nutrientes esenciales para las plantas como el potasio y el fósforo o aplicar las cenizas directamente a la agricultura o la silvicultura (Zhai et al., 2021).

El alto potencial energético, sumado al elevado volumen de material disponible, ha propiciado un rápido crecimiento de las centrales térmicas basadas en biomasa. Sin embargo, este aumento ha llamado la atención sobre el volumen de cenizas generadas, requiriendo el uso de alternativas ambientalmente apropiadas para utilizar estos subproductos, minimizando los impactos ambientales y económicos asociados con su eliminación. En general, las cenizas generadas por los procesos de combustión de biomasa se envían a vertederos o se eliminan en bosques abiertos o campos agrícolas, en su mayoría sin ningún control. Sin embargo, dichos procesos de manejo deben evaluarse cuidadosamente ya que estos materiales pueden contaminar fácilmente los recursos hídricos subterráneos debido a la lixiviación de metales pesados, causando infertilidad del suelo, o incluso suspensión debido a la acción del viento, lo que puede causar enfermedades respiratorias y problemas de salud a los residentes que viven cerca del sitio de disposición (Batista Bonfim & Martins de Paula, 2021).

En particular, la combustión es la tecnología más común para la generación de calor y energía a partir de biomasa residual, y sus residuos consisten en escorias y cenizas, cuya producción está destinada a crecer drásticamente (Asquer et al., 2017). Es por esto que ya se han comenzado a estudiar alternativas para la reutilización de este tipo de residuo compuesto por cenizas biomásicas.

Dependiendo de sus características se han encontrado trabajos donde se han reutilizado estas cenizas de la combustión de diversas biomásas en diferentes aplicaciones como pueden ser: en suelos (Silva et al., 2019; Tosti et al., 2019; Pacheco da Costa et al., 2020), en cemento (Memon & Khan, 2018; Carevic et al., 2020; Tosti et al., 2020; Fort et al., 2021; Qi et al., 2022), en materiales cerámicos (Pérez Villarejo et al., 2012; Kisinievic & Kisinievic, 2016; Eliche Quesada et al., 2017; Bonet Martínez et al., 2018; Conte et al., 2022), en hormigón (Miller et al., 2019; Velay Lizancos et al., 2017), como adsorbente (Liao et al., 2011; Wu et al., 2011; Abraham et al., 2013; Bisson et al., 2013; Ruiz et al., 2017), entre otras.

Por lo expuesto, en el presente trabajo se mencionarán las principales centrales térmicas que aprovechan los residuos biomásicos generados en diversas agroindustrias para la producción de electricidad en Argentina, con la consecuente generación de cenizas, y se estudiará el caso particular de las cenizas generadas por una de ellas, caracterizándolas y evaluando su incorporación en matrices cerámicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de información sobre las principales centrales térmicas a biomasa residual en Argentina se consultaron diversas fuentes, principalmente tomando datos de la Secretaría de Energía dependiente del Ministerio de Economía, donde se encuentran los programas con los proyectos adjudicados de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. También se tuvieron en cuenta notas periodísticas para confirmar el estado de dichos proyectos, ya que algunos aún no se encuentran en operación en la actualidad.

Las cenizas utilizadas en este estudio provienen de una central térmica de generación de energía eléctrica que utiliza cáscaras de maní como combustible, valorizando esta biomasa que constituye un residuo para una empresa manisera de la provincia de Córdoba. Para la caracterización de las cenizas se utilizaron diversas técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis dispersivo de energía de rayos X (EDS), análisis térmico diferencial y termogravimétrico (DTA-TGA), distribución granulométrica, ecotoxicidad según adaptación de la norma IRAM 29114, entre otras.

Los análisis por SEM y EDS se realizaron con un equipo FEI Inspect S50, con un detector de rayos X marca EDAX Phoenix. Los ensayos de comportamiento térmico de las biomásas (DTA-TGA) fueron llevados a cabo con un equipo Shimadzu DTA-50 TGA-50 con analizador TA-50 WSI, con velocidades de calentamiento de 1°C/min, en atmósfera de aire, en el rango de temperaturas ambiente-1000°C.

Para evaluar su incorporación en matrices arcillosas se prepararon mezclas cenizas-arcilla a las que se le adicionó un 8% en peso de agua con el fin de obtener adecuada plasticidad y luego se moldearon bajo presión uniaxial de 25 MPa. El contenido de ceniza en las mezclas arcillosas fue de 10, 15 y 20% en peso. Se realizó una muestra de referencia sin cenizas, identificada como C0. Las muestras fueron designadas como CF para las que contenían cenizas finas y CG para aquellas con cenizas gruesas, seguidas por el porcentaje de residuo adicionado de cada ceniza. Se obtuvieron ladrillos compactos de 70 x 40 x 15 mm, aproximadamente. Las muestras conformadas en verde fueron secadas al ambiente y en estufa a 100°C; luego de esta etapa de secado fueron tratadas térmicamente a 1000°C, siguiendo curvas de cocción similares a las utilizadas por la industria cerámica de este tipo de materiales. Los productos cerámicos obtenidos se caracterizaron con técnicas tales como: porosidad, absorción de

agua, variación volumétrica permanente (VVP), pérdida de peso por calcinación (PPC) y resistencia a la compresión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Centrales térmicas a biomasa residual en Argentina

En Argentina, con el objeto de llevar el país hacia una matriz energética fuerte en energías renovables, se han implementado en los últimos años una serie de medidas destinadas a crear un marco legal apropiado para impulsar la adopción generalizada de generación renovable. La Ley 27191/2015 sobre Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica, establece como objetivo lograr una contribución de las energías renovables hasta alcanzar el 20% del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025. Esta ley ajusta la Ley 26190/2006 del mismo nombre. Para alcanzar dicho objetivo, se fomenta el desarrollo de emprendimientos para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía, convocando públicamente la contratación de este tipo de energía mediante programas como el GenRen en una primera instancia y el RenovAr luego. Éstos, a partir de las diferentes convocatorias, han adjudicado varios proyectos de energías renovables, siendo mayoría los correspondientes a energía solar y eólica, seguido de biomasa, además de biogás y pequeñas hidroeléctricas (Ministerio de Economía, 2023).

Con respecto a energía a partir de biomasa se encuentran en funcionamiento varias centrales térmicas que utilizan diferentes tipos de residuos biomásicos. En la Tabla 1 se presentan aquellas que se encuentran en operación en la actualidad y que han sido, en su mayoría, proyectos presentados en algunas de las convocatorias citadas anteriormente (Ministerio de Economía, 2023). Las centrales ubicadas en la región noreste del país utilizan residuos generados en los aserraderos de la zona como pueden ser chips, aserrín, ramas, cortezas, residuos de poda, entre otros. Las centrales de la provincia de Córdoba utilizan cáscaras de maní como combustible y las ubicadas en la región noroeste utilizan principalmente bagazo de caña de azúcar o residuos de la industria azucarera. La central ubicada en la provincia de Buenos Aires utiliza cáscaras de girasol y de soja. Además de las presentadas en la Tabla 1, se encuentran en construcción otras plantas, o ampliación de las que han sido adjudicadas en las convocatorias de RenovAr, que también utilizarán biomasa residual para su funcionamiento.

Tabla 1. Centrales Térmicas a biomasa residual

Central Térmica	Potencia Instalada (MW)	Provincia	Región
Generación Santa Rosa	15,0	Corrientes	NEA
Pindó Eco-Energía	3,2	Misiones	NEA
Biomasa Unitan	6,7	Chaco	NEA
La Escondida	10,0	Chaco	NEA
Garruchos	36,0	Corrientes	NEA
MM Bioenergía	3,0	Misiones	NEA
Puerto Piray	38,0	Misiones	NEA
Prodeman Bioenergía	10,0	Córdoba	CENTRO
Ticino Biomasa	4,0	Córdoba	CENTRO
Generación Las Junturas	0,6	Córdoba	CENTRO
Tabacal	40,0	Salta	NOA
Ingenio Santa Bárbara	16,2	Tucumán	NOA
Cogeneración Ingenio Leales	2,0	Tucumán	NOA
Biomasa La Florida	19,0	Tucumán	NOA
La Providencia	11,1	Tucumán	NOA
Nidera	7,0	Buenos Aires	B. A.

La combustión es la tecnología más común para la generación de electricidad en estas centrales térmicas, a partir de estos tipos de biomasa residual, y sus residuos consisten principalmente en cenizas, cuya producción crecerá con el aumento de producción de energía a partir de la biomasa.

Por otro lado, muchas empresas agroindustriales, por ejemplo, las aceiteras, utilizan sus residuos biomásicos para el abastecimiento de energía a sus procesos, mediante combustión y gasificación, generando cenizas residuales. Estas cenizas, actualmente, son acopiadas por la empresa generadora o utilizadas como rellenos sin un análisis del daño que pueden crear en el medio ambiente.

3.2. Caracterización de cenizas de biomasa

La composición química de las cenizas finas (CF) y gruesas (CG) de cáscara de maní, expresada como porcentaje en peso de sus elementos se muestra en la Tabla 2. Ambas cenizas presentan como elementos mayoritarios, además del oxígeno, silicio y calcio. Las CF presentan un contenido de carbono mayor que las CG, por lo que puede inferirse que no alcanzó a quemarse toda la materia orgánica en el proceso de combustión. Esto se comprueba con el análisis térmico diferencial y termogravimétrico que se muestra en la Figura 1.

Tabla 2. Análisis químico semicuantitativo de las cenizas por EDS

Muestra	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
CF	10,8	31,6	1,1	4,4	5,2	18,6	1,4	1,1	9,2	11,5	5,1
CG	3,9	32,6	2,6	10,5	2,5	13,5	2,7	0,5	4,9	16,4	9,9

El análisis térmico diferencial y termogravimétrico de ambas cenizas (Figura 1) presenta una reacción exotérmica alrededor de 200°C, debido a la evaporación del agua adsorbida por las muestras. Las CF, además, presentan un pico exotérmico a aproximadamente 400°C asociado a la combustión de la fracción no quemada durante el proceso. La muestra CG no presenta esta reacción, ya que el contenido de C es mucho menor (3,9%); estos resultados están en concordancia con los valores de pérdida de peso por calcinación, donde, para el caso de las CG fue de 0% y para las CF 8,5%.

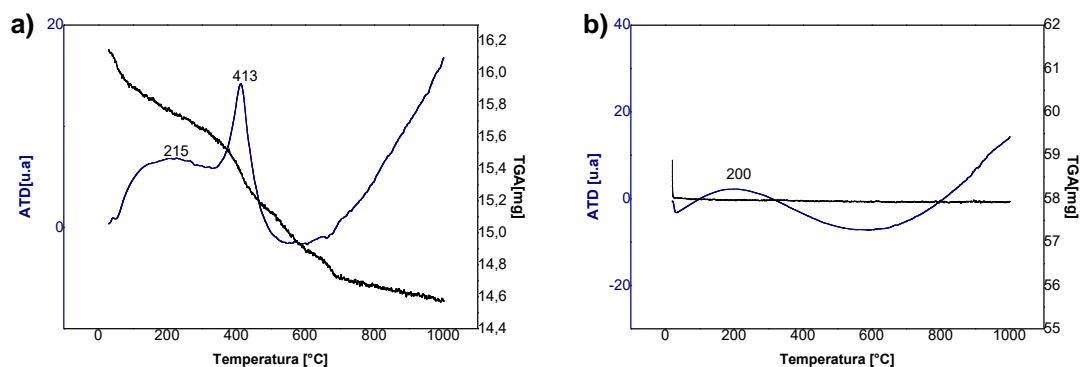


Figura 1. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico de a) cenizas finas y b) cenizas gruesas

La distribución granulométrica de las cenizas muestra que las cenizas finas poseen más de un 70% de partículas con tamaño inferior a los 75 μm mientras que las cenizas gruesas presentan el mayor porcentaje de partículas dentro del rango entre 250 μm y 75 μm .

En la Figura 2, se presentan imágenes de microscopía electrónica de barrido de ambas cenizas. Se observa que las CF están conformadas por partículas de forma esférica y acicular de tamaño homogéneo, mientras que las CG son un conglomerado de partículas más pequeñas.

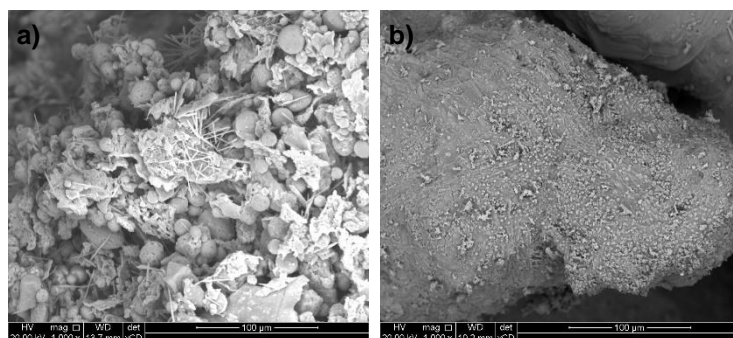


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de a) cenizas finas y b) cenizas gruesas

Con el fin de determinar el impacto que causa la deposición y/o el uso de este tipo de cenizas como relleno de suelos se realizó el ensayo de ecotoxicidad. En este ensayo, la evaluación del efecto en la elongación de la radícula de las plántulas, permite ponderar el efecto tóxico de compuestos solubles, presentes en niveles de concentración tan bajos que no son suficientes para inhibir la germinación, pero que sin embargo pueden retardar o inhibir completamente los procesos de elongación de la radícula. Los resultados de este ensayo, realizado utilizando la especie raygrass, se muestran en la Figura 3, donde puede apreciarse que las CG presentan muy poca influencia en el crecimiento de las radículas en todas las concentraciones estudiadas. En cambio, las CF muestran poca influencia a bajas concentraciones notándose un incremento marcado en las más elevadas.

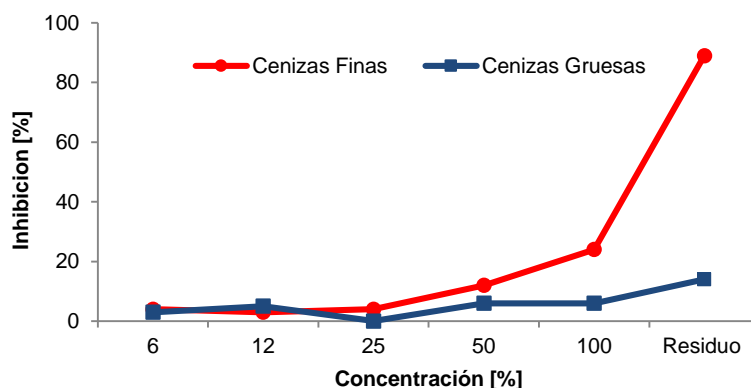


Figura 3. Ecotoxicidad de las cenizas de biomasa

3.3. Caracterización de los materiales cerámicos

Los ladrillos obtenidos con arcilla comercial con y sin ceniza adicionada presentaron estructuras bien definidas sin desgranamiento y coloración rojiza homogénea. La Tabla 3 muestra los valores de variación volumétrica permanente (VVP), pérdida de peso por calcinación (PPC), porosidad y absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados. Como puede observarse, en general, a medida que aumenta el porcentaje de ceniza agregado a la mezcla, aumenta la porosidad y absorción de agua, pero disminuye la variación volumétrica permanente.

Tabla 3. Propiedades de los materiales cerámicos

Muestra	PPC [%]	VVP [%]	Porosidad [%]	Absorción agua [%]
C0	5,4	-12,5	26,6	14,0
CF10	5,2	-11,8	33,1	18,8
CF15	5,4	-11,1	33,3	19,2
CF20	5,6	-11,1	34,2	19,7
CG10	4,6	-10,4	26,4	14,0
CG15	4,1	-9,5	26,0	13,6
CG20	4,2	-8,4	28,0	15,3

En la Figura 4 se muestran los resultados de resistencia a la compresión de los materiales cerámicos arcillosos obtenidos con agregado de cenizas de biomasa y sin ellas. Se observa una dependencia lineal entre la absorción de agua y la resistencia a la compresión de las piezas cerámicas, en función de la adición de cenizas. Esta tendencia muestra la fuerte influencia de la porosidad generada por la incorporación de cenizas en la resistencia mecánica de los materiales obtenidos. Esto también fue observado por otros autores (Pérez Villarejo et al., 2012; Bonet Martínez et al., 2018). Las muestras CG presentaron porosidad y propiedades similares a las obtenidas por la muestra de referencia (C0), mientras que las muestras CF presentaron mayores valores de absorción de agua y porosidad, pero menores valores de resistencia a la compresión. Esto podría analizarse teniendo en cuenta los contenidos de C de las cenizas, mostrados en la Tabla 2, y el análisis térmico diferencial y termogravimétrico, ya que al quemarse este carbono durante el proceso de cocción generaría mayor porosidad dentro del material cerámico, con la consecuente disminución de resistencia a la compresión. En general, los materiales obtenidos cumplen con los requerimientos de resistencia a la compresión establecidos por norma ASTM C62-04 para ladrillos de construcción hechos de arcilla (10,3 MPa).

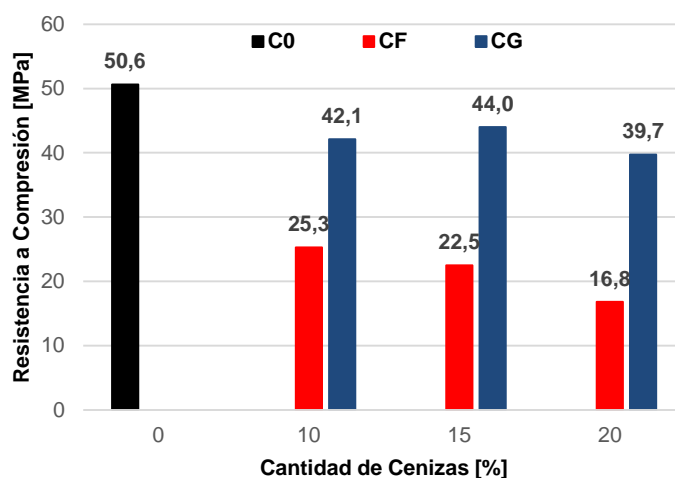


Figura 4. Resistencia a la compresión de los materiales cerámicos

4. CONCLUSIONES

En los últimos años en Argentina se ha fomentado la generación de energía a partir de fuentes renovables a través de diferentes convocatorias de proyectos. Una de estas fuentes de energía renovable corresponde a la generación de energía a partir de biomasa residual. Se han mencionado en este trabajo varias centrales térmicas con procesos biomasa-energía.

Si bien la utilización de biomasa residual ofrece perspectivas atractivas, siendo en general la más importante la descontaminación que se produce al eliminar estos residuos, además de la energía que se puede generar con su aprovechamiento, también genera residuos, como lo son las cenizas, que deben evaluarse y tratarse.

Por ello en este trabajo se estudiaron cenizas finas y gruesas generadas en una central térmica a biomasa residual (cáscaras de maní) y se evaluó su incorporación a matrices cerámicas arcillosas. Se ha determinado a través del análisis de ecotoxicidad de las cenizas, que las CF a elevadas concentraciones, afectarían la capacidad de establecimiento y desarrollo de las plantas, mientras que las CG prácticamente no influirían en dicho desarrollo, en el caso que las cenizas sean utilizadas como relleno de suelos o depositadas en vertederos.

Con respecto a la incorporación de las cenizas en matrices arcillosas se observó que a medida que aumenta el porcentaje de ceniza agregado a la mezcla, aumenta la porosidad y absorción de agua, pero disminuye la resistencia a la compresión. De todas formas, los materiales obtenidos cumplen con los requerimientos de resistencia a la compresión establecidos por norma ASTM C62-04 para ladrillos de construcción compactos hechos de arcilla y por lo tanto sería una alternativa de reutilización de las cenizas de biomasa generadas.

5. REFERENCIAS.

- Abraham R., George J., Thomas J., Yusuff K.K.M. Physicochemical characterization and possible applications of the waste biomass ash from oleoresin industries of India. *Fuel* 109 (2013) 366-372.
- Agrela F., Cabrera M., Morales M. M., Zamorano M., Alshaaer M. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (2019) 23-58.
- Asquer C., Cappai G., De Gioannis G., Muntoni A., Piredda M., Spiga D. Biomass ash reutilisation as an additive in the composting process of organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management* 69 (2017) 127-135.
- Batista Bonfim W., Martins de Paula H. Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. *Journal of Cleaner Production* 291 (2021) 125869.
- Bisson T.M., Xu Z., Gupta R., Mahama Y., Liu Y., Yang H., Clark I., Patel M. Chemical and mechanical bromination of biomass ash for mercury removal from flue gases. *Fuel* 108 (2013) 54-59.
- Bonet-Martínez E., Pérez-Villarejo L., Eliche-Quesada D., Sánchez-Soto P.J., Carrasco-Hurtado B., Castro-Galiano E. Manufacture of sustainable clay ceramic composite with composition $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-K}_2\text{O}$ materials valuing biomass ash from olive pomace. *Materials Letters* 229 (2018) 21-25.
- Carevic I., Baricevic A., Stirmer N., Santek Bajto J. Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances. *Construction and Building Materials* 256 (2020) 119450.
- Conte S., Buonamico D., Magni T., Arletti R., Dondi M., Guarini G., Zanelli C. Recycling of bottom ash from biomass combustion in porcelain stoneware tiles: Effects on technological properties, phase evolution and microstructure. *Journal of the European Ceramic Society* 42 (2022) 5153-5163.
- Eliche-Quesada D., Felipe-Sesé M.A., Moreno-Molina A.J., Franco F., Infantes-Molina A. Investigation of using bottom or fly pine-olive pruning ash to produce environmental friendly ceramic materials. *Applied Clay Science* 135 (2017) 333-346.
- Fort J., Sál J., Sevcik R., Dolezelová M., Keppert M., Jerman M., Záleská M., Stehel V., Cerny R. Biomass fly ash as an alternative to coal fly ash in blended cements: Functional aspects. *Construction and Building Materials* 271 (2021) 121544.
- Kizinievic O., Kizinievic V. Utilisation of wood ash from biomass for the production of ceramic products. *Construction and Building Materials* 127 (2016) 264-273.
- Liao S-W, Lin C-I, Wang L-H. Kinetic study on lead (II) ion removal by adsorption onto peanut hull ash. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42 (2011) 166-172.
- Memon S.A., Khan M.K. Ash blended cement composites: Eco-friendly and sustainable option for utilization of corncob ash, *Journal of Cleaner Production* 175 (2018) 442-455.
- Miller S.A., Cunningham P.R., Harvey J.T. Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation & Recycling* 146 (2019) 416-430.
- Ministerio de Economía (2023) <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/plantas-de-energia-renovable-en-operacion-comercial>.
- Pacheco da Costa T., Quinteiro P., Tarelho L.A.C., Arroja L., Dias A.C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste Management* 101 (2020) 126-140.
- Pérez-Villarejo L, Eliche-Quesada D., Iglesias-Godino F.J., Martínez-García C., Corpas-Iglesias F.A. Recycling of ash from biomass incinerator in clay matrix to produce ceramic bricks. *Journal of Environmental Management* 95 (2012) S349- S354.
- Qi T., Gao X., Feng G., Bai J., Wang Z., Chen Q., Wang H., Du X. Effect of biomass power plant ash on fresh properties of cemented coal gangue backfill. *Construction and Building Materials* 340 (2022) 127853.
- Ruiz B., Girón R.P., Suárez-Ruiz I., Fuente E. From fly ash of forest biomass combustion (FBC) to micro-mesoporous silica adsorbent materials. *Process Safety and Environmental Protection* 105 (2017) 164-174.

Silva F.C., Cruz N. C., Tarelho L.A.C., Rodrigues S.M. Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: Critical review of the existing regulatory framework. *Journal of Cleaner Production* 214 (2019) 112-124.

Tosti L., Van Zomeren A., Pels J.R., Dijkstra J.J., Comans R.N.J. Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars, *Chemosphere* 223 (2019) 425-437.

Tosti L., Van Zomeren A., Pels J.R., Damgaard A., Comans R.N.J. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. *Journal of Cleaner Production* 245 (2020) 118937.

Velay-Lizancos M., Azenha M., Martínez-Lage I., Vázquez-Burgo P. Addition of biomass ash in concrete: Effects on EModulus, electrical conductivity at early ages and their correlation *Construction and Building Materials* 157 (2017) 1126-1132.

Wu H-R, Lin C-I, Wang L-H. Effect of peanut hull ash dosage on the degree influence of operation variables on the adsorption of nickel ion from aqueous solution using peanut hull ash. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42 (2011) 658-661.

Zhai J., Burke I.T., D.I.Stewart. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021) 111555.