







Miscelánea



Las potencialidades bioenergéticas del *Arundo donax L.* en Argentina

Study of the Bioenergetic Potentials of the Giant Reed in Argentina

-  Ada Graciela Nogar, Centro de Estudios Sociales de América Latina (CESAL), Facultad de Ciencias Humanas, UNCPBA, Argentina, nogargraciela02@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9213-6615
-  Luis Damián Rodríguez, Núcleo de Estudios en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático (NAACCE), Facultad de Agronomía, UNCPBA, Argentina, luisdamian1994@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9639-0642
-  Carlos-Vicente Bongiorno, Centro de Investigaciones Integradas sobre Sistemas Agronómicos Sustentables (CIISAS), Facultad de Agronomía UNCPBA, carlosdeazul@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1815-4660.
-  Estela-Mercedes Santalla, Centro de Tecnologías Ambientales y Energía (CTAE, INTELYMEC), Facultad de Ingeniería, UNCPBA, esantall@fio.unicen.edu.ar, orcid.org/0000-0001-6631-2267

Recibido: 24 de enero de 2021
 Aceptado: 3 de junio de 2021
 Publicado: 30 de septiembre de 2021

Resumen

Las iniciativas que estimulan el aprovechamiento de recursos renovables para sustituir fuentes fósiles en pos de la transición energética ganan visibilidad en un contexto de calentamiento global, principal desafío ambiental planetario. El objetivo de este artículo es analizar las barreras y las oportunidades de generar bioenergía térmica a partir de la caña de Castilla (*Arundo donax L.*) como recurso para diversificar la matriz. Se aplicó un enfoque integral técnico para evaluar las potencialidades energéticas del *Arundo donax L.*, planta herbácea de origen asiático, considerada una especie de buen rendimiento de biomasa por hectárea. Aplicando diseños en bloques al azar y técnicas estandarizadas, se realizaron ensayos agronómicos en el SE de la provincia de Buenos Aires. Se obtuvieron rendimientos entre 5 y 11 t/ha, superiores a mayor densidad de plantación. Las características tecnológicas de la biomasa mostraron un contenido promedio de celulosa de 53 % y un poder calorífico superior entre 4000 y 4500 kcal/kg, lo que confirma su potencial como cultivo energético. Los resultados sobre la producción y el uso de la biomasa demostraron que se dispone de las capacidades tecnológicas para su explotación, sin impactar en los suelos y aprovechando su potencialidad como recurso energético renovable. Se reflexiona acerca de la cadena de valorización de la especie que permita promover procesos de localización de proyectos que activen complementariedades entre territorios singulares.

Palabras clave: *Arundo donax L.*; bioenergía; biomasa; cambio climático; exclusión energética

Abstract

Initiatives that stimulate the use of renewable resources to replace fossil sources in pursuit of the energy transition gain visibility in the context of global warming, the main planetary environmental challenge. In the study, a comprehensive technical approach was applied to evaluate the energy potential of Giant reed (*Arundo donax L.*), a herbaceous plant of Asian origin, considered a species of good biomass yield per hectare. From randomized block designs and standardized techniques, agronomic trials were carried out in the SE of the Province of Buenos Aires, obtaining yields between 5 and 11 t/ha, higher at higher planting density. The technological characteristics of the biomass showed an average cellulose content of 53 % and a higher calorific value between 4000 and 4500 kcal/kg, confirming its potential as an energy crop. The results on the production and use of the biomass demonstrated the availability of technological capacities for its exploitation without impacting soils and taking advantage of its potential as a renewable energy resource. Thus, we reflect on the value chain of the species that allows promoting localization processes of projects that activate complementarities between singular territories.

Key words: bioenergy; biomass; climate change; energy exclusion; Giant reed



Introducción y estado de la cuestión

En un contexto en el cual el calentamiento global es un desafío a escala planetaria, las fuentes de energía (fósiles y descarbonizadas) estructuran los ejes de la discusión. El manejo de los recursos, los problemas ambientales y las formas de transporte y acceso a la energía condicionan el sistema energético actual. Las consecuencias de la combustión mayoritariamente fósil, adscripta a un orden geopolítico cambiante, se expresan en los gases de efecto invernadero (GEI) (Lasheras Merino 2021), entre otras consecuencias. En este “orden”, más de 2700 000 000 de personas (el 38 % de la población mundial) dependen de la biomasa para cocción y calefacción, lo cual tiene impactos en la salud y en el ambiente. El 17 % de la población (1300 000 000 de personas) carece de electricidad y unos 3000 000 000 emplean la madera, el carbón o los desechos de origen animal para cocinar (IEA 2019).

Considerando que los sistemas energéticos atraviesan los discursos, las gestiones y las necesidades sociales (Clementi y Jacinto 2021), en este artículo se analizan las barreras y las oportunidades de generar bioenergía térmica a partir del *Arundo donax L.* (AD) para diversificar la matriz. El trabajo reúne avances de investigaciones individuales y colectivas¹ donde se identificaron actores, articulaciones, móviles y barreras asociadas a las experiencias y se enriquecieron los conocimientos acerca del AD como fuente de energía descarbonizada.

Crisis energética. Desafíos y oportunidades

El cambio climático y la crisis energética son problemas globales que han cobrado mayor atención en los últimos años, y no es casualidad que se encuentren vinculados. Fornillo (2017, 49) afirma que un desafío es “transformar el metabolismo energético para así también ampliar los márgenes de ahorro energético, aminorar drásticamente la emisión de CO₂ y, en consecuencia, paliar el impacto negativo del cambio global”. Sin embargo, el modelo energético actual no solo se caracteriza por el aumento en el consumo de energía, sino que, como expresa la Agencia Internacional de Energía (IEA 2019), la matriz energética primaria mundial depende en un 82 % de los combustibles fósiles, cuyas emisiones intensifican los procesos de calentamiento global. Este sector “es el responsable del 2/3 de las emisiones totales” (IRENA 2019), lo cual constituye una amenaza a la estabilidad climática del planeta. En los últimos 400 000 años, la concentración de CO₂ se mantuvo en el rango de las 280 partes por millón (ppm). China, Estados Unidos e India participan del 49 % de las emisiones.

1 Barrado et al. 2019, además de los proyectos PEIDYT 03-02E (2019), de la Secretaría de Ciencia, Arte y Técnica, dirigido por Estela Santalla, y PICT 2017-2960, de la Agencia Nacional de Promoción Científico y Tecnológica (ANPCyT), dirigido por Graciela Nogar.

De esta manera, se produce un desequilibrio energético atmosférico, ya que se retiene calor. Ello ocasiona acidificación de los océanos, reducción de las capas de hielo, cambios en los valores de precipitación y transformación de los procesos socio-productivos, entre otros. A los efectos de las emisiones se suma el control de los sistemas energéticos o mejor, el control de las redes que producen, transportan y distribuyen la energía, adscriptas a poderes públicos y privados. En sus inicios, la generación de energía se produjo de manera descentralizada. Más tarde, con los procesos de urbanización y expansión poblacional, fue necesario construir infraestructura para transportar la energía a grandes distancias, en aras de disminuir costos, centralizar el poder de la distribución y adscribirse a las economías de escala (Ghía 2012; Clementi 2017; Milia 2019). Es adecuado preguntarse, entonces, ¿qué hay detrás del escenario actual que impulsa la transición energética?

Existe consenso en que la transición implica un cambio estructural y gradual del sistema de provisión y utilización de la energía, con objetivos de largo plazo. No obstante, conviven diversas miradas sobre el proceso, en función de los diferentes intereses económicos, políticos e ideológicos de los actores que lo impulsan. Estos van desde grandes multinacionales de la industria hidrocarburífera hasta movimientos o instituciones ecologistas. Las posturas más críticas sostienen que el proceso no representaría un cambio de paradigma, sino una expresión del modo en que el modelo actual intenta capitalizar la crisis energética y climática para un nuevo ciclo de acumulación. Esa transición energética de tipo corporativo intercambia recursos fósiles por renovables y alta tecnología, sin modificar ni cuestionar la distribución y el acceso a la energía de las poblaciones o la participación ciudadana en los procesos de toma de decisión (Bertinat y Chemes 2018; Bertinat, Chemes y Forero 2020).

En el ámbito europeo, los debates actuales giran sobre el concepto de transición ecológica, la cual se apoya en transformaciones tecnológicas en los sistemas de producción y consumo, así como también en las instituciones sociales y políticas y en las formas de vida de la población que permitan pasar de la situación actual (demasiado costosa para el ambiente) a una compatible con la capacidad del planeta para mantener las actividades humanas (Boissonade 2017; García 2018). En el contexto latinoamericano, algunos autores sostienen la necesidad de analizar este proceso como una transición socio-energética, considerando que las transformaciones no son solo técnicas o económicas, sino que también se deben dar en la gestión del sistema, apuntando a una mayor descentralización e inclusión, a través de mecanismos alternativos, para satisfacer las necesidades humanas, tales como priorizar el autoconsumo y la producción local comunitaria (Fornillo 2017; Egler 2020; Garrido 2020). Ese tránsito abre diversos retos, ya que se produce en el seno de un sistema de gran complejidad y dinamismo, condicionado e influenciado por el nivel de compromiso y los acuerdos políticos.

Si bien cada país enfrenta de manera diferente la descarbonización del sistema, algunos se han adherido al Acuerdo de París y a la Agenda 2030 para el Desarrollo

Sostenible. El primero prioriza las acciones y los recursos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y así mantener la temperatura global dentro de los límites establecidos. Por su parte, los mecanismos y los compromisos, no siempre concretos, se tornan insuficientes. El abandono de las metas obligatorias (Protocolo de Kyoto) en pos de objetivos voluntarios representa retrocesos en los acuerdos y las gestiones globales sobre el cambio climático. En ese desafío, construir un futuro bajo en carbono concede visibilidad y protagonismo a los territorios con presencia de recursos energéticos renovables (sol, viento, agua y biomasa), mediante proyectos situados.

Con base en lo expuesto (y sin considerar que sea un planteo abarcador), se vislumbra que la transición energética es necesaria para contribuir a la lucha contra el cambio climático y, además, favorecer la eficiencia energética, cambiar los hábitos de consumo e incrementar la igualdad en el acceso. Sin embargo, los obstáculos se multiplican en territorios marginales, por lo que la gradualidad de las acciones dependerá del contexto de cada país y/o región y las vinculaciones multiescales que impulsen los poderes (Fornillo 2021).

Existen distintas definiciones del modelo de generación distribuida (GD), las cuales contemplan la tecnología utilizada, la ubicación, los impactos asociados y el sistema de conexión de red. Una de ellas lo considera como un nuevo paradigma, un cambio desde las grandes centrales integradas de forma vertical a un modelo desagregado, con centros de generación de menor capacidad, que no operan de modo centralizado (González-Longatt 2004), localizados en cercanías al consumidor. Otros lo califican como el modelo para democratizar la generación de energía (Porcelli y Martínez 2018), además de inclusivo para poblaciones aisladas abastecidas por biomasa (leña y carbón) para cocción y calefacción. Entre las ventajas que presenta, se pueden mencionar el suministro de energía en los picos de consumo, la generación de energía para autoabastecimiento, la inyección de excedentes y como suministro auxiliar para la producción, entre otros. Generar energía sin aumentar los GEI promulga avanzar en la transición hacia un modelo descarbonizado y a pequeña escala, asociados a instrumentos técnicos, económicos y regulatorios que acompañen el proceso.

En ese escenario, Argentina amplía el abanico de experiencias enmarcadas en estímulos estatales a la producción de energía, buscando diversificar su matriz ante demandas crecientes y compromisos internacionales asumidos para un abastecimiento más sostenible. Desde finales del siglo XX y principios del XXI se fue conformando un denso marco normativo de promoción. Los primeros antecedentes se remontan: i) al Plan Alconafta (1980), que fomentó la producción de etanol de caña de azúcar como biocombustible; ii) al Programa de Uso Racional de la Energía, que creó centros de investigación y desarrollo de fuentes renovables (Decreto Nacional N° 2.247/1985) y iii) a la Ley 25.019/1998, Régimen Nacional de la Energía Eólica y Solar, que estableció incentivos para esos dos tipos de fuentes.

En la década de 2000, los incentivos fiscales y la obligatoriedad de mezclar nafta y *gasoil* con bioetanol y biodiesel en un 5 % dieron un nuevo impulso a los biocombustibles, con la sanción de los regímenes de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles (Ley 26.093/2006) y de Promoción de la Producción de Bioetanol (Ley 26.334/2007). En paralelo, un conjunto de disposiciones fue aprobado para estimular la producción de energía eléctrica: i) la Ley 26.190/2006 estableció como meta alcanzar el 8 % de participación de las energías renovables en la matriz eléctrica en 2017, ii) el Programa Generación de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables (2009) impulsó la primera licitación de compra de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, y iii) la Resolución N°108 (2011) autorizó contratos de abastecimiento entre el Mercado Eléctrico Mayorista y las ofertas de agentes generadores, cogeneradores o autogeneradores de energía renovable.

Desde mediados de la década de 2010, en un escenario energético centralizado y fósil-dependiente, el Estado nacional continúa apostando a la producción de hidrocarburos (convencionales y no convencionales), a la vez que intensifica la promoción de energías renovables. Sucesivas medidas propiciaron la multiplicación de proyectos. El Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la producción de Energía Eléctrica (Ley 27.191/2015) recuperó la meta del 8 % de la matriz nacional de energía eléctrica por fuentes renovables para 2018 y proyecta alcanzar un 20 % para 2025. Se le suman la licitación RenovAR (Rondas 1, 1.5 y 2), la renegociación de antiguas iniciativas paralizadas (Resolución N°202/2016) y la habilitación del Mercado a Término de Energías Renovables (Resolución N°281/2017). El Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la red eléctrica pública (Ley 27.424/2017) es el hito nacional que no solo abre la posibilidad de pensar en un nuevo modelo de producción y gestión de la energía, sino que reconoce y otorga legalidad a prácticas ya presentes en algunas provincias precursoras como Santa Fe.

Dentro de los agrocombustibles, los biocombustibles como el biodiesel (a partir de aceite de soja) y el bioetanol (a partir de caña de azúcar) y los silajes (de soja, maíz y sorgo) se utilizan para mejorar la productividad de biogás en proyectos energéticos. Son estos los que han alcanzado mayor penetración en el mercado, ya sea para sustituir fósiles para el transporte o para la producción de electricidad. Respecto a las biomásas sólidas, un estudio desarrollado en 2009, a través del mapeo de oferta y demanda de dendrocombustibles, mostró que Argentina cuenta con abundantes cantidades de biomasa aptas y potencialmente disponibles para uso energético (FAO 2009). La alta dispersión geográfica y su baja densidad, sumadas al elevado contenido de humedad al momento de cosecharlas, son desventajas aún no resueltas al evaluar la factibilidad técnico-económica de su explotación como recurso energético. A pesar de esas aparentes desventajas, el alto rendimiento de materia seca de las

biomasas lignocelulósicas y su amplio rango de condiciones de cultivo son factores que muestran una interesante oportunidad para evaluar su explotación como un nuevo vector energético que contribuya a diversificar las fuentes primarias de energía sostenible.

Por otro lado, la disponibilidad de tierras no utilizadas para la producción de *commodities* a lo largo del territorio podrían favorecer la implantación de cultivos energéticos de baja demanda de recursos (naturales y tecnológicos). Ello permitiría ofrecer, en una primera etapa, biomasa con fines energéticos para las poblaciones dispersas y pequeños emprendimientos y, a futuro, disponer del *know how* para avanzar hacia la explotación de fuentes de biomasa para el desarrollo de nuevos nichos que requieren mayor grado de conocimiento de las tecnologías, como puede ser la producción de combustibles de segunda y tercera generación. De todas maneras, hay actores que cuestionan la producción de energía a partir de biomasa: “Los discursos del sector de la bioenergía y su contextualización nos permitió advertir los alcances de los nuevos mecanismos de acumulación que se implementan con argumentos que suenan muy ‘verdes’” (Toledo López y Tittor 2019, 105). Pese a ello, este estudio presenta un escenario diferente, donde no hay competencia por suelos productivos y el cultivo es plurianual, lo cual disminuye las labranzas.

Antecedentes sobre el *Arundo donax* L. con fines energéticos (en el mundo y en Argentina)

Numerosa literatura científica ha generado información sobre diferentes usos potenciales del AD. Los primeros trabajos reportan su uso para la fabricación de instrumentos musicales (Perdue 1958) y luego como potencialmente apto para la producción de pulpa (FAO 1955; Shatalov y Pereira 2006) y como adsorbente con propiedades de fitoremediación de suelos contaminados (Vernersson et al. 2002; Üner y Bayrac 2018; Pan et al. 2016).

La disminución de las reservas de combustibles fósiles y el impacto de estos sobre la generación de GEI han intensificado el estudio de nuevas fuentes de energía renovable, entre ellas, los cultivos energéticos. La rápida velocidad de producción de biomasa del AD lo ubica como candidato para el desarrollo de biocombustibles en Norteamérica (Barney y Di Tomaso 2008; Mack 2008) y en el sur europeo (Nassi et al. 2011). Mantineo et al. (2009) revelaron que la energía neta que provee AD resultó baja o negativa en el año de implantación, pero aumentó de manera considerable a partir del segundo año: valores entre 487 y 611 J/ha, con destacada influencia del riego y la fertilización nitrogenada. Jambor y Torok (2019), basándose en 68 trabajos relevantes enfocados en Italia y en la región mediterránea europea, destacaron que AD presenta un balance energético relativamente alto, con elevada inversión, bajos

costos de mantenimiento y alto potencial económico para la producción de biomasa en tierras marginales o poco atractivas.

Por su parte, Abreu et al. (2020) observan que la especie tiene un potencial para convertirse en referente en el mundo de los biocombustibles debido a sus características ecológicas. Cosentino et. al (2016) señalan que el rendimiento de biomasa logrado en Italia fue de 20-27 t/ha para el primer año de cultivo y de 35-42 t/ha desde el segundo año en adelante.

En Argentina, se reportan estudios de AD como material para la producción de carbones activados (Vernersson et al. 2002; Basso et al. 2005) y también para su conversión como combustible sólido, vía pirólisis (Basso et al. 2005), con resultados a escala de laboratorio. Falasca, Flores y Galvani (2011) delimitaron las áreas aptas para el cultivo de AD en Argentina y concluyeron que la especie es indiferente a la naturaleza del suelo tolerando desde arcillosos pesados hasta arenas sueltas y progresa con regímenes pluviométricos anuales inferiores a 550 mm, por lo que la subregión sudeste de la provincia de Buenos Aires es un área apta para su cultivo.

En la literatura científica, no se han encontrado resultados sobre el uso de AD como sustituto parcial de combustibles en Argentina, ni tampoco referencias sobre prácticas de manejo con fines energéticos.

Características agronómicas del *Arundo donax* L.

La caña de Castilla (*Arundo donax* L.) es una planta herbácea de origen asiático perteneciente a la familia Poaceae, de hoja más o menos coriácea o membranosa, de 30-70 cm de largo y 5-8 cm de ancho (Curt Fernández de la Mora, Sanz Gallego y Fernández González 2012). Sus hojas envuelven el tallo y alcanza entre 3 y 10 metros de altura. Es la especie de mayor producción de biomasa por hectárea, solo superada por el bambú. Si bien puede cultivarse en una amplia variedad de tipos de suelos, son más adecuados los suelos profundos con pH de 5,0 a 8,7, con elevada humedad, pero sin encharcamiento superficial durante la etapa juvenil. Alcanza la madurez (5-8 metros) en alrededor de un año y puede ser cosechada, en dependencia de las condiciones meteorológicas, de una a tres veces al año.

Una vez implantado, el cultivo puede dar producciones durante más de 15 años, ya que posee una elevada capacidad de reproducción vegetativa. El crecimiento es óptimo en climas templados (es una especie C₃) con un requerimiento hídrico superior a los 550 mm anuales. Tolerancia temperaturas entre 5 y 35 °C, sin embargo, a partir de las 4 hojas puede tolerar hasta -3,8. Para obtener buenas cosechas, las temperaturas medias deben situarse entre los 7 y los 29 °C durante el período de crecimiento. Los rizomas brotan con facilidad con temperaturas del aire de 13 a 15 °C hasta 25 °C.

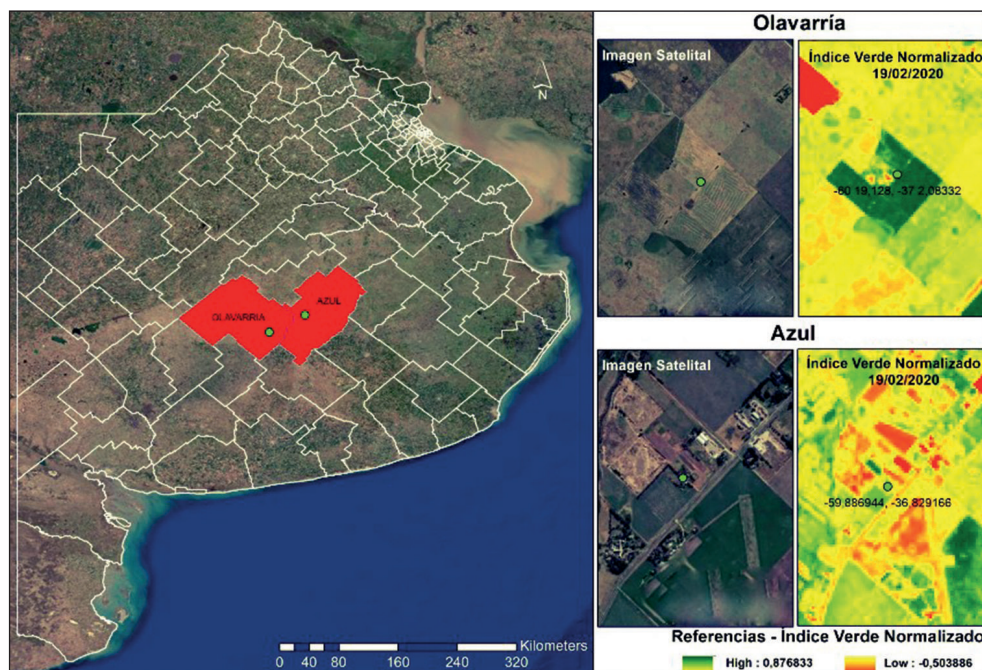
Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en diferentes etapas, que incluyeron el diseño agronómico para la explotación del AD en campos experimentales de los partidos de Azul y Olavarría, en la provincia de Buenos Aires, con la finalidad de generar conocimiento sobre las prácticas de manejo y cosecha de un cultivo sobre el cual no hay antecedentes en la región. Después se procedió a evaluar las características tecnológicas del producto cosechado, con la finalidad de determinar su potencial energético y analizar diferentes opciones de procesamiento para su posterior uso. Por último, se analizaron las capacidades y los desafíos para desarrollar la cadena de valor de este cultivo energético.

Ensayos agronómicos

Se desarrollaron ensayos a campo en Azul (36°49' 47,5" S, 59° 53' 13,9" W) y en Olavarría (37° 02' 05,47" S, 60° 19' 08,58" W) durante el período 2018-2020 (mapa 1).

Mapa 1. Localización de los ensayos del *Arundo donax L.* en los partidos de Azul y Olavarría



Fuente: elaboración propia.

Se evaluó la incidencia del ambiente y del manejo del cultivo sobre la propagación, el crecimiento y la productividad de AD, partiendo de rizomas obtenidos de cañaverales naturalizados de la misma zona de estudio y de plantines bajo invernadero (fotografías 1 y 2).

Fotografía 1. Extracción de rizomas de *Arundo donax* L.



Fotografía 2. Plantines de *Arundo donax* L.



Fuente: Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA).

La plantación de rizomas se realizó en diciembre de 2018, sobre un suelo Natracualf petrocálcico que posee limitaciones para uso agrícola (fecha tardía según Villanueva 2016), por lo que se aplicó riego por goteo sin el uso de fertilizantes. También se llevó a cabo otro ensayo en la primavera de 2019 (fecha óptima de plantación) en un suelo Argiudol típico que posee menores limitaciones, en condiciones de crecimiento con riego y fertilización (potencial) y en condiciones reales. En ambos, los rizomas se plantaron a dos densidades (1 y 2 rizomas/m²) con separación entre hileras de un metro, en un experimento al azar. Se realizaron mediciones periódicas no destructivas de altura de plantas, índice de área foliar (IAF) e intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA). Para el IAF se utilizó un analizador de canopeo (LAI 2000, LI-COR, inc.). La proporción de RFA interceptada se midió con un sensor cuántico lineal. Ambas mediciones se efectuaron en diferentes puntos centrales de la parcela, utilizando información agrometeorológica provista por la estación del Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía de la UNCPBA (CRAGM 2019).

Cuando el cultivo pasó a la etapa de latencia, por las bajas temperaturas (julio de 2019), se realizó la cosecha de la parte aérea, para determinar el efecto de la densidad de plantación sobre la producción de biomasa. Se tomaron cuatro muestras por metro cuadrado, dos por tratamiento, y se determinó la humedad al momento de cosecha mediante secado convectivo, a 65 °C hasta peso constante. En la cosecha final, se determinó el número de tallos por planta, el peso por tallo y la eficiencia en la utilización de la radiación (EUR, cociente entre la materia seca total y la RFA total interceptada por el cultivo durante el ciclo).

Caracterización físico-química de la biomasa cosechada

Sobre la biomasa cosechada, se procedió a su caracterización físico-química, con la finalidad de determinar el contenido de humedad y los componentes estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) para establecer el poder calorífico. La medición de holocelulosa, celulosa y lignina insoluble se realizó a partir de las normas ASTM D 1105-96, 1695-77 y 1106-96, respectivamente, y la de hemicelulosa, por diferencia de las dos primeras. El contenido de lignina soluble se determinó según el método de espectroscopía UV-visible a 205 nm y el del poder calorífico a partir de la composición de la biomasa, verificado con el valor experimental obtenido por calorimetría.

Resultados

Evaluación de la potencialidad del cultivo de AD para la zona de estudio: productividad

Durante el ciclo de cultivo (diciembre de 2018 a mayo de 2019), la radiación global se mantuvo en 17,5 MJ/m²d, próxima al promedio histórico (CRAGM 2019). Los promedios de temperatura máxima, mínima y media fueron de 22,4 °C, 10,9 °C y 16,2 °C, respectivamente. La precipitación acumulada fue de 382,2 mm. A partir del mes de mayo se verificó la ocurrencia de las primeras heladas, a los 168 y 169 días después de la plantación (DDP). A pesar de ser heladas leves (-0,6 °C y -1,1 °C), limitaron el crecimiento de la especie. En el ciclo de crecimiento del segundo ensayo (septiembre de 2019 a junio de 2020), las condiciones agrometeorológicas fueron semejantes a las de 2019.

Los resultados muestran que, en el primer año de cultivo, en una fecha de plantación tardía (2018), AD logró producir más biomasa en el tratamiento con densidad de 2 plantas/m² (11 317 kg/ha) respecto de la densidad de 1 planta/m² (5196,5 kg/ha) (Barrado et al. 2019). Con respecto al ensayo implantado en 2019, en el primer año, el tratamiento potencial rindió 18 116 kg/ha y 14 899 kg/ha para densidades de 2 y 1 planta/m², respectivamente, mientras que en condiciones reales se obtuvieron rindes de 5122 y 2712 kg/ha para las mismas densidades, respectivamente (Rodríguez et al. 2020). Esto demuestra la importancia del riego y la fertilización, y de utilizar un mayor número de plantas para captar mayor radiación en el primer año de cultivo, lo que redundará en mayor fotosíntesis y, por lo tanto, en mayor producción de biomasa por unidad de superficie. Similares resultados fueron encontrados en trabajos en Italia, con otros ecotipos de AD (Volta et al. 2016).

Durante el primer año de cultivo, los tratamientos no lograron alcanzar el IAF crítico (aquel que intercepta el 95 % de la radiación incidente), probablemente por tratarse de una fecha de plantación tardía (Barrado et al. 2019), y por ser una especie perenne que recién al tercer año estabiliza la producción de biomasa (Volta et al. 2016).

La altura máxima alcanzada por el cultivo fue de 2 m, sin que se observen diferencias significativas entre densidades de plantación ($p > 0,05$), aunque hubo una tendencia a mayor altura en el tratamiento con mayor densidad de plantas.

La eficiencia en la utilización de la radiación (EUR) fue de 1,13 y 0,97 g/MJ en la densidad de 2 y 1 planta/m², respectivamente. El cultivo de mayor densidad produjo 1,13 g de biomasa por cada MJ de PAR interceptado, valores típicos de una especie C₃ (Barrado et al. 2019). En el segundo ensayo, la EUR fue de 1,24 g/MJ (tratamiento potencial con 2 plantas/m²), sin diferencias significativas entre densidades (Rodríguez et al. 2020). Algunos experimentos realizados en el hemisferio Norte con

esta especie muestran valores de EUR desde 1,4 g/MJ cuando crece sin riego ni fertilización, y hasta 1,8-1,9 g/MJ cuando es regada y fertilizada (Cosentino et al. 2016).

Los resultados presentados corresponden a los primeros años de implantación del cultivo. Los ensayos continuaron en los ciclos siguientes de crecimiento.

Características físico-químicas del *Arundo donax L.* cosechado en los ensayos 2018-2020

Los resultados de los análisis de la biomasa cosechada mostraron un contenido de sólidos volátiles promedio del 92 % ($\pm 0,009$, b.s.), sin observar diferencias significativas entre ambientes ($p > 0,05$), es decir, entre los ensayos realizados en Azul y Olavarría. Los análisis químicos de composición detallados en la tabla 1 mostraron diferencias significativas por ambiente para celulosa y hemicelulosa, pero no para lignina. Se encuentran en el rango de valores reportado por Shatalov y Pereira (2006).

Tabla 1. Composición estructural de la biomasa, valor promedio en g/g de sólidos libres de extractivos y su desvío, en Azul y Olavarría

	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Azul	0,483 \pm 0,009	0,461 \pm 0,025	0,277 \pm 0,042
Olavarría	0,587 \pm 0,028	0,209 \pm 0,026	0,325 \pm 0,125

Fuente: elaboración propia.

Considerando los promedios por ambiente, el poder calorífico superior de la biomasa resultó 4565 kcal/kg ($\pm 127,5$), mientras que el valor experimental obtenido por calorimetría fue 4478 kcal/kg. El poder calorífico inferior, que tiene en cuenta el contenido de agua que aporta la biomasa, resultó 4051,3 kcal/kg. No se observan diferencias significativas entre ambientes. Como puede constatar, el contenido energético de AD evidencia la potencialidad de este cultivo como fuente renovable de energía, si se lo compara con otras fuentes como el carbón de coque (3200 kcal/kg), la cáscara de arroz (2300 kcal/kg), de girasol y maní (3700-3900 kcal/kg), entre otras.

Acondicionamiento y uso potencial de *Arundo donax L.*

Una vez que las heladas limitaron el crecimiento del cultivo, que alcanzó la senescencia, se procedió a la cosecha a través del corte de las plantas y al secado a campo hasta llegar a un 20 % de humedad, para luego enrollar con la maquinaria convencional utilizada en cultivos anuales y pasturas de la zona (fotografías 3, 4 y 5).

Fotografía 3. Máquina convencional cortando AD (izquierda).
Fotografía 4. Confección de rollos (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Fotografía 5. Producto final



Fuente: elaboración propia.

Los rollos, de aproximadamente 260 kg, fueron utilizados como combustible en un horno de cemento de la ciudad de Olavarría, que dispone de una instalación para la triturración, el transporte y la combustión de la biomasa. Como el objetivo es reducir las emisiones de CO_2 , varias industrias han implementado sistemas para la carga de combustibles alternativos (cáscaras de girasol, de arroz, de maní y actualmente residuos urbanos). El AD densificado en rollos presentó resultados satisfactorios, ya que la combustión tuvo un comportamiento adecuado en cuanto a humedad ($<20\%$), grado de triturración y poder calorífico inferior (> 3500 kcal/kg), con ventajas adicionales de bajo contenido en volátiles y cenizas. Esas características fundamentan las ventajas del recurso renovable frente a cualquier combustible fósil, por la ausencia de emisiones de dióxido de carbono y de azufre. Además, el *Arundo donax L.* resulta más favorable que los combustibles artificiales alternativos, como los derivados de residuos, ya que estos presentan alta heterogeneidad en su composición, lo que requiere establecer mayores controles de calidad y de proceso (Córdoba, Manzur y Santalla

2021). La disponibilidad de conocimientos técnicos relacionados con el manejo y el rendimiento agronómico, así como la determinación del costo energético del cultivo de AD son factores clave que permitirán avanzar en el desarrollo de una cadena de valor vinculada a esta biomasa.

El desarrollo de bioenergía a partir de biomasa en Argentina tiene múltiples fortalezas: la disponibilidad de tierras, el despliegue que ha alcanzado la agricultura en el país, la posibilidad de generar valor agregado y empleo para las zonas rurales y la experiencia previa en el desarrollo de biocombustibles (Griffa, Marcó y Goldstein 2017), entre otras. Por tanto, este estudio pretende aportar herramientas de conocimiento para incentivar el uso bioenergético de AD. Junto con otras fuentes de bioenergía desarrolladas en la región como el biogás (Teixeira Coelho et al. 2020) y los biocombustibles (FAO 2013), el AD contribuiría a mejorar las perspectivas de sostenibilidad, tal como se plantea a continuación.

Discusión y conclusiones

Los resultados agronómicos de los ensayos realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Azul y Olavarría) y en ausencia de fertilización arrojaron rendimientos que oscilaron entre 5 y 18 t/ha, en dependencia de la densidad de plantación. El tratamiento con mayor densidad de plantación mostró mayor rendimiento de materia seca, debido a una mejor eficiencia en la intercepción de la RFA. Si bien no se alcanzó el IAF crítico para esta especie, es muy probable que se logre con el transcurso de los años, ya que los resultados aquí presentados corresponden solo al año de implantación del cultivo. Las características físico-químicas del material mostraron un contenido promedio de celulosa de 53 % y un poder calorífico superior entre 4000 y 4500 kcal/kg, lo que confirma el potencial de esta biomasa como cultivo energético.

La explotación del AD puede constituir una alternativa viable, desde el punto de vista tecnológico, para desarrollar una cadena de valor vinculada al sector comunitario y agroindustrial. Con base en la respuesta de la biomasa a los procesos de acondicionamiento y uso, se infiere que existen las capacidades tecnológicas para desarrollar su explotación y potenciar el uso de AD como un recurso energético renovable que, además, no presenta impactos negativos en el uso del suelo, la demanda de agua y el requerimiento de fertilizantes.

Los ensayos preliminares permiten visualizar innovaciones tecnológicas necesarias, tales como mejorar las técnicas de plantación y de micropropagación, adecuar maquinarias y desarrollar equipos. Esos avances permitirán disponer de materiales para favorecer el desarrollo del cultivo, para mejorar el corte y acondicionado durante la cosecha, de manera que se acelere la pérdida de humedad y se disminuyan

los costos de transporte, y para facilitar la densificación de la biomasa a través del desarrollo del mercado de pellets, picados, rollos y/o briquetas.

Desde el punto de vista ambiental, y en el marco de un enfoque de ciclo de vida, la explotación del AD como fuente de energía térmica presenta ventajas. Por ejemplo, en relación con el consumo de leña, ya que se puede demostrar la trazabilidad vinculada al consumo de recursos (agua, nutrientes y energía solar), al ser un cultivo con prácticas de manejo establecidas. Además, las emisiones de briquetas de residuos y biomasa agropecuarias emiten menos gases contaminantes al ambiente que la leña (en especial, de material particulado y monóxido de carbono). También presentan mayor eficiencia térmica (López Rivera et al. 2016), y su uso mitiga los impactos negativos que provocan la deforestación y la tala descontrolada de montes nativos.

Los procesos promovidos por la localización de proyectos de aprovechamiento energético activan complementariedades entre territorios singulares. La ciencia y la innovación han permitido visualizar al *Arundo donax L.* como biomasa, a través de herramientas exploratorias. Más allá de los obstáculos en tiempos de economía circular, la reciprocidad de intercambios de bienes y servicios comunes (agronómicos y técnicos) pone de relieve la necesaria articulación entre actores gubernamentales y otros: privados, asociativos, cooperativos y colectivos. La reciprocidad requiere “la inclusión de la acción pública en una acción colectiva más global (...) de una sociedad fundada en la circulación, los flujos, las redes, las transacciones” (Vanier 2017, 109). Una reciprocidad necesaria para paliar los desequilibrios, pero debilitada ante la multipolarización de los poderes y la vulnerabilidad cambiante de las administraciones políticas de turno.

En Argentina, las administraciones públicas distan mucho de entender el escenario descrito, de ser responsables con la apropiación de los recursos, de visualizar los límites biofísicos y de reconocer que la producción de *commodities* beneficia a las transnacionales y a los gobernantes de turno, mientras trastoca la matriz territorial e induce marginalidad, despojo y deslocalización. Si bien en el presente artículo se recogen los primeros resultados de una investigación que prosigue, estos enuncian oportunidades para el ambiente, visualizan fuentes de bioenergía y ponderan estrategias de energización sostenibles y saludables. A la vez, se valorizan recursos situados en los espacios rurales.

La innovación propuesta, en un contexto de transición energética, pretende diferenciar el desarrollo que hasta el momento ha tenido la bioenergía en Argentina. No se pondera la producción de *commodities* en detrimento de la seguridad alimentaria, sino que se postula la producción de biomasa a partir de *Arundo donax L.* para producir bioenergía.

Agradecimientos

El trabajo se enmarca en el proyecto “*Arundo Donax L. como fuente de bioenergía para la sustitución de combustible fósiles*”, financiado por el programa PEIDyT Fortalecimiento II de la Secretaría de Ciencia, Arte y Técnica (SECAT) de la UNCPBA. Los autores agradecen la colaboración de las Dras. Adriana Confalone y Laura Lázaro, los Ing. Agr. Juan Ressia, Javier Grosso, Juan Laddaga y Ramiro Alberti, de la Facultad de Agronomía UNCPBA, por aportar sus ideas y por el trabajo experimental de campo. Gracias al Ing. Carlos D’Allesandro, de Cementos Avellaneda S.A., por el apoyo en la coordinación de tareas en la planta; a la Dra. Verónica Córdoba y al alumno Nahuel Pereyra Müller del Laboratorio de Bioenergía de la Facultad de Ingeniería UNCPBA, por los análisis de laboratorio, y a la Lic. Paula Valania por la confección de la cartografía.

Bibliografía

- Abreu, Mariana, Alberto Reis, Patricia Moura, Ana Fernando, Antonio Luís, Lidia Quental, Pedro Patinha y Francisco Gírio. 2020. “Evaluation of the Potential of Biomass to Energy in Portugal. Conclusions from the CONVERTE Project”. *Energies* 13 (4): 937. doi.org/10.3390/en13040937
- Barney, Jacob, y Joseph Di Tomaso. 2008. “Nonnative Species and Bioenergy: Are We Cultivating the Next Invader?”. *BioScience* 58 (1): 64-70. doi.org/10.1641/B580111
- Barrado, Nicolás, Facundo Elizalde, Damián Rodríguez, Juan Laddaga, Gabriela Hernández, Carlos Bongiorno, Carlos Vilatte, Carlos D’Alfonso, Laura Aguas y Adriana Confalone. 2019. “Arundo donax, una alternativa para producir energía en el centro de la provincia de Buenos Aires”. Ponencia en el IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental. Buenos Aires, 2 al 5 de diciembre, Universidad Nacional Arturo Jauretche (UNAJ), Florencio Varela, Argentina.
- Basso, María, Elsa Cerrella, Enrique Buonomo, Pablo Bonelli y Ana Cukierman. 2005. “Thermochemical Conversion of Arundo Donax into Useful Solid Products”. *Energy Sources* 27 (15): 1429-1438. doi.org/10.1080/009083190523280
- Bertinat, Pablo, y Jorge Chemes. 2018. *Aportes del sector energético a una transición socioecológica*. Documento de discusión presentado en la V Cumbre Cooperativa de las Américas. <https://bit.ly/3BSPGRh>
- Bertinat, Pablo, Jorge Chemes y Lyda Forero. 2020. “Transición Energética. Aportes para la reflexión colectiva”. En *Es posible construir el derecho a la energía?*, editado por Beatriz Martínez, 15-18. Publicado por Transnational Institute y Taller Ecologista.
- Boissonade, Lea. 2017. “La Transition. Analyse d’un concept. Thém”, <https://bit.ly/3jVm4LS>

- Clementi, Luciana. 2017. “Energía eólica y territorios en Argentina: proyectos en el sur de la provincia de Buenos Aires entre fines del siglo XX y principios del siglo XXI”. Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur.
- Clementi, Luciana, y Guillermina Jacinto. 2021. “Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en Argentina”. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales* 29: 48-64.
doi.org/10.17141/letrasverdes.29.2021.4590
- Córdoba, Verónica, Alejandra Manzur y Estela Santalla. 2021. “Evaluación tecnológica del potencial energético y ambiental del Arundo *donax* L”. Ponencia presentada en las *III Jornadas Internacionales y V Nacionales de Ambiente*, Universidad Nacional de Hurlingham y Universidad Nacional de Moreno, 12 de mayo.
- Cosentino, Salvatore, Cristina Patané, Emanuele Sanzone, Giorgio Testa y Danilo Scordia. 2016. “Leaf gas exchange, water status and radiation use efficiency of giant reed (*Arundo donax* L.) in a changing soil nitrogen fertilization and soil water availability in a semi-arid Mediterranean area”. *European Journal of Agronomy* 72: 56-69.
doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.011
- CRAGM (Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía). 2019. “Boletines de diciembre de 2018 a junio de 2019”, <https://bit.ly/30vqK4l>
- Curt Fernández de la Mora, María, Marina Sanz Gallego y Jesús Fernández González. 2012. “Caña común (*Arundo donax* L.): Cultivo energético para biocombustibles sólidos. Tierras de Castilla y León”. *Agricultura* 188: 90-93.
- Egler, Claudio. 2020. “Crisis y transición energética en América del Sur”, <https://bit.ly/3jbGff2>
- Falasca, Silvia, Noelia Flores y Graciela Galvani. 2011. “¿Puede usarse una especie invasora como *Arundo donax* (caña común) con fines energéticos en Argentina?”, <https://bit.ly/2XkAvkD>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1955. *Perspectivas de la industria de papel y celulosa en la América Latina*. Nueva York: Naciones Unidas.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2009. *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina. Wisdom Argentina. Informe final*. Roma: FAO. <https://bit.ly/3vncKoT>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. *La Bioenergía en América Latina y El Caribe. El estado de arte en países seleccionados*. Santiago de Chile: FAO.
- Fornillo, Bruno. 2017. “Hacia una definición de transición energética para Sudamérica: Antropoceno, geopolítica y posdesarrollo”. *Prácticas de oficio* 2 (20): 46-53.
- Fornillo, Bruno. 2021. “Energy transition in Uruguay: market dominance or public-social power?”. *Ambiente & Sociedade* 24: 1-15.
doi.org/10.1590/1809-4422asoc20190229r1vu2021L1DE
- García, Ernest. 2018. “La transición ecológica: definición y trayectorias complejas”. *Ambienta* 125: 86-100. <https://bit.ly/3vngEOl>

- Garrido, Santiago. 2020. "Del cambio de matriz energética a la transformación del sistema socio-técnico. Repensando la transición energética en Argentina". En *Energía, Innovación y Ambiente para la transición energética sustentable. Retos y Perspectivas*, editado por EdiUNS (editorial de la Universidad Nacional del Sur), 587-599. Bahía Blanca: EdiUNS.
- Ghía, Andrés. 2012. *Bicentenario de la Argentina. Historia de la Energía Eléctrica. 1810-1820*. Buenos Aires: FODECO.
- González-Longatt, Francisco. 2004. "Tecnologías de generación distribuida: costos y eficiencia". <https://bit.ly/3aNh3A8>
- Griffa, Balbina, Leandro Marcó y Evelin Goldstein. 2017. "Producir electricidad con biomasa: beneficios, experiencias y actualidad en Argentina". *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas UNNE* 19: 67-79. doi.org/10.30972/rfce.0192858
- IEA (International Energy Agency). 2019. *World Energy Outlook 2019*. <https://bit.ly/3jdIYxY>
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2019. *Transforming the energy system and holding the line on the rise of global temperatures*. Abu Dhabi: IRENA. <https://bit.ly/30CqlgH>
- Jambor, Attila, y Aron Török. 2019. "The Economics of *Arundo donax*. A Systematic Literature Review". *Sustainability* 11 (15): 4225. doi.org/10.3390/su11154225
- Lasheras Merino, Miguel. 2021. "Geopolítica del pacto verde: órdago de la UE". *Energía y Geoestrategia* 2021: 111-190. <https://bit.ly/3C5Frt3>
- López Rivera, Juan, Carlos Cajina Valdivia, Jorge Ramírez Camas, Edwin Reyes Aguilera, Noé Olivas Reyes y Lidamar Molina Cruz. 2016. "Evaluación de los parámetros físicos y químicos de las briquetas obtenidas con la máquina briquetadora construida en FAREMEsteli". *Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano* 16: 3-14.
- Mack, Richard. 2008. "Evaluating the Credits and Debits of a Proposed Biofuel Species: Giant Reed (*Arundo donax*)". *Weed Science* 56 (6): 883-888. doi.org/10.1614/WS-08-078.1
- Mantineo Mariadaniela, Giuseppina M. D'Agosta, Venera Copani, Cristina Patane y Salvatore L. Cosentino. 2009. "Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment". *Field Crops Research* 114: 204-213. doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.020
- Milia, Matías. 2019. "La energía como horizonte. Un estudio de la evolución de un dominio global de investigación en Energías Renovables y sus especificidades en México y Argentina entre 1992 y 2016". Tesis doctoral, FLACSO México.
- Nassi, Nicoletta, Neri Roncucci, Federico Triana, Cristiano Tozzini y Enrico Bonari. 2011. "Productivity of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis". *Italian Journal of Agronomy* 6 (3): e22. doi.org/10.4081/ija.2011.e22
- Pan, Rongrong, FuLi Fan, Yue Li y Xiao-Juan Jin. 2016. "Microwave regeneration of phenol-loaded activated carbons obtained from *Arundo donax* and waste fiberboard". *RSC Advances* 6: 32960-32966. doi.org/10.1039/C6RA01642A

- Perdue, Robert. 1958. "Arundo donax-Source of musical reeds and industrial cellulose". *Economic Botany* 12: 368-404.
- Porcelli, Adriana, y Adriana Martínez. 2018. "Una inevitable transición energética: el prosumidor y la generación de energías renovables en forma distribuida en la legislación ambiental nacional y provincial". *Actualidad jurídica ambiental* 75: 4-49.
- Rodríguez, Damián, Juan Laddaga, Manuel Ressia, Laura Lázaro, Javier Grosso, Carlos Bongiorno y Adriana Confalone. 2020. "Arundo donax L. como fuente de bioenergía en el centro de la provincia de Buenos Aires". Ponencia presentada en la *XVIII Reunión Argentina y IX Latinoamericana de Agrometeorología: Agrometeorología inteligente para una producción sustentable*, organizado por Asociación Argentina de Meteorología (AADA) y la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Entre Ríos (UNER), 23 al 27 de noviembre.
- Shatalov, Anatoly, y Helena Pereira. 2006. "Papermaking fibers from giant reed (Arundo donax L.) by advanced ecologically friendly pulping and bleaching technologies". *BioResources* 1 (1): 45-61.
- Teixeira Coelho, Suani, Alessandro Sanches Pereira, Daniel Bouille, Shymala Mani, Marina Recalde, Atilio Savino y William Stafford, ed. 2020. *Municipal Solid Waste Energy Conversion in Developing Countries. Technologies, Best Practices, Challenges and Policy*. Ámsterdam: Elsevier.
- Toledo López, Virginia, y Anne Tittor. 2019. "Contradicciones en torno a las innovaciones y certificaciones en el sector de la bioenergía en Argentina". *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales* 26: 87-110. doi.org/10.17141/letrasverdes.26.2019.3896
- Üner, Osman, y Yuksel Bayrac. 2018. "The effect of carbonization temperature, carbonization time and impregnation ration on the properties of activated carbon produced from *Arundo donax*". *Microporous and Mesoporous Materials* 268: 225-234. doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.04.037
- Vanier, Martín. 2017. *Demain les territoires. Capitalisme reticulaire et espace politique*. París: Hermann.
- Vernersson, Thomas, Pablo Bonelli, Elsa Cerrella y Ana Cukierman. 2002. "Arundo donax cane as a precursor for activated carbons preparation by phosphoric acid activation". *Bioresource Technology* 83: 95-104. doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00205-X
- Villanueva, Gladys. 2016. "Arundo donax como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo". Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona.
- Volta, Antonio, Giulia Villani, Vittorio Marletto y Enrico Ceotto. 2016. "Growth of the perennial energy crop giant reed (Arundo donax L) simulated with ARMIDA, a modified version of the LINTUL model". *Revista Italiana di Agrometeorologia* 34: 5-12. doi.org/10.19199/2016.3.2038-5625.005