

Producción de biomasa de cultivos lignocelulósicos según el número de cortes

Viana Otero María Virginia^{1*}, Siri Prieto Guillermo²

¹Investigadora independiente. *Correo electrónico: mvirginiviana@gmail.com

²Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Ruta 3 km 373, Paysandú, Uruguay.

Recibido: 20-01-17 Aceptado: 22-02-17

Resumen

En Uruguay se plantea diversificar la matriz energética a través de la producción de biomasa. Las especies *Arundo donax* L., *Panicum virgatum* L. y *Pennisetum purpureum* L. Schumacher serían una opción. Los objetivos de este trabajo fueron comparar su producción de biomasa y energía, con diferentes manejos de corte. Los cultivos se implantaron en la primavera del 2007 y se evaluaron desde enero de 2012 hasta agosto de 2013. Se realizaron dos tratamientos de cosecha: corte en enero y agosto; y un solo corte en agosto. *Arundo donax* produjo 18,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹, más que *P. virgatum* y *P. purpureum*, que produjeron respectivamente 15,0 y 14,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca. En *A. donax* y *P. virgatum* un solo corte produjo más que dos cortes. En *P. purpureum* la diferencia entre tratamientos fue significativa en 2012 y el corte de agosto produjo más que el de enero. *Arundo donax* y *P. purpureum* presentaron mayores contenidos de cenizas y los valores de agosto fueron menores a enero, en *P. virgatum* no hubo diferencias entre cosechas. La mayor producción de energía se logró con *A. donax* (407 GJ ha⁻¹ año⁻¹) al cosecharlo una sola vez. *Panicum virgatum* fue el cultivo de menor producción de energía con un solo corte (292 GJ ha⁻¹ año⁻¹), pero tuvo el menor contenido de humedad (15 %) y cenizas (4,9 %). Con una sola cosecha, en agosto, se lograría un material con menor contenido de cenizas y humedad, en las tres especies.

Palabras clave: *Arundo donax*, cultivos energéticos, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

Biomass Production of Lignocellulosic Crops as Affected by the Number of Cuttings

Summary

The diversification of the energy matrix through biomass production is being evaluated in Uruguay. The species *Arundo donax*, *Panicum virgatum* and *Pennisetum purpureum* would be an option. The objective of this paper was to compare their biomass and energy production, with different cutting moments. The crops were planted in the spring of 2007 and evaluated from January 2012 to August 2013. Two harvest treatments were performed: cuts in January and August; and a single cut in August. *Arundo donax* produced 18.6 Mg ha⁻¹ year⁻¹ dry matter, more than *P. virgatum* and *P. purpureum*, which produced 15.0 and 14.6 Mg ha⁻¹ year⁻¹ dry matter, respectively. In *A. donax* and *P. virgatum*, the single cut treatment produced more than two cuts. In *P. purpureum*, the difference between treatments was significant in 2012, and the August cut produced more than the January cut. *Arundo donax* and *P. purpureum* presented higher ash contents, and the August values were lower than the January ones. In *P. virgatum* there were no differences between harvests. The highest energy production was achieved with *A. donax* (407 GJ ha⁻¹ year⁻¹) by harvesting it once. *Panicum virgatum* was the crop of the lowest energy production with a single cut (292 GJ ha⁻¹ year⁻¹), but it had the lowest moisture (15 %) and ashes (4.9 %) content. With a single harvest, in August, a material with lower ash and moisture content would be achieved in all three species.

Keywords: *Arundo donax*, energy crops, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

Introducción

Existe preocupación a nivel mundial por el aumento de la demanda de energía y las proyecciones que reflejan el agotamiento de los combustibles fósiles en pocas décadas (Capellán Pérez et al., 2014). Esto, junto a la preocupación por el impacto ambiental de los combustibles fósiles, impulsa la necesidad de investigar en la producción de fuentes alternativas de energía, entre ellas la utilización de biomasa. Coincidiendo con esta visión, Ra et al. (2012) explican que debido al aumento del precio del combustible fósil y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, se estimuló el aumento de la producción global de energía renovable a partir de biomasa particularmente a partir del año 2000. Heaton et al. (2004) mencionan que la energía de la biomasa de los cultivos lignocelulósicos contiene típicamente rangos de 17 a 21 MJ kg⁻¹, solo ligeramente menores que la de los combustibles fósiles tales como el carbón (21 a 28 MJ kg⁻¹) en combustión directa. Según McLaughlin et al. (1999), la utilización de cultivos perennes tiene ventajas, ya que ayudarían a reducir la degradación de los suelos, bajarían la dependencia en petróleo y reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero.

En Uruguay se plantea diversificar la matriz energética, y para lograr esto, una meta es aumentar la oferta de energía generada por la biomasa a través del cultivo de *Arundo donax* L. (caña común), *Panicum virgatum* L. (pasto varilla) y *Pennisetum purpureum* (L.) Schumacher (pasto elefante). Estas especies se caracterizan por producir altos niveles de biomasa, entre 10 y 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Fontoura, Brandão y Gomes, 2015; Falasca, Flores y Galvani, 2011; Angelini, Ceccarini y Bonari, 2005; Angelini et al., 2009).

Las especies *P. virgatum* y *P. purpureum* tienen ciclo fotosintético tipo C₄ y *A. donax*, tipo C₃. Son cultivos perennes, herbáceos, cuyos tallos pueden acumular alta proporción de lignina, celulosa y hemicelulosa respecto a los demás componentes celulares. Acorde con lo expuesto por Nassi o Di Nasso, Angelini y Bonari (2010); Fike et al. (2006) y Heaton et al. (2004), la cosecha no debería comenzar hasta que el cultivo estuviera totalmente senescente, puesto que cosechas tempranas podrían resultar en alta extracción de nutrientes y altos contenidos de humedad de la biomasa. Nassi o Di Nasso, Angelini y Bonari (2010) sugirieron que es posible que estrategias como el momento de cosecha puedan mejorar la calidad de la biomasa de caña común. En relación a la calidad de la biomasa, Bulpitt (2009) y McLaughlin et al. (1999) encontraron que *A. donax* y *P. virgatum* presentaban contenidos de cenizas cerca-

nos a los recomendados para cultivos energéticos, entre 4 y 6 %. El contenido de cenizas de *P. purpureum* sería cercano a los valores deseados, entre 6,45 (Ukanwoko e Igwe, 2012) y 7,2 (Ribeiro et al., 2014), pero existen reportes de hasta 14,6 % (Ullah, Anwar y Rana, 2010). Los contenidos de humedad en la biomasa al momento de la cosecha varían según la especie desde 14 % a más de 50 % (Dragoni et al., 2011; Smith y Slater, 2011; McLaughlin et al., 1999).

Los cultivos perennes podrían aumentar el contenido de carbono en el suelo al aumentar las entradas de carbono al sistema y disminuir las pérdidas ligadas al proceso de erosión y respiración (Angelini et al., 2009; Boehmel, Lewandowski y Claupein, 2008). Acorde a de Moraes Sá et al. (2017) la expansión del área sin laboreo asociada a cultivos con alta captura de C, como los aquí evaluados, podrían disminuir la emisión de CO₂ en 24,3 % en América del Sur.

Se ha observado que la producción de biomasa varió según se realizaran un corte o dos cortes, aunque esto depende también de las condiciones ambientales en que se desarrollan los cultivos. En años con estrés hídrico, los cultivos de *P. virgatum* rindieron más al realizar un solo corte, mientras que en años normales rindieron más al realizar dos cortes (Reynolds, Walker y Kirchner, 2000; McLaughlin et al., 1999). Vogel et al. (2002) recomendaron dos cosechas anuales a diferencia de Rinehart (2006) quien recomendó una sola cosecha para *P. virgatum*. Thomason et al. (2005) lograron la mayor producción de biomasa al realizar tres cortes al año, con un incremento de 3,4 Mg ha⁻¹ año⁻¹ sobre el sistema de un solo corte.

En *P. purpureum* se observaron aumentos de rendimiento al aumentar de 60 a 120 los días entre cortes (Madera et al., 2013; Ansah, Osafo y Hansen, 2010; Tessema, Mihret y Solomon, 2010). Los contenidos de cenizas y humedad de la biomasa dependieron del momento de cortes, los niveles de extracción y contenidos de humedad disminuyeron en el corte de invierno en *P. purpureum* (Ansah, Osafo y Hansen, 2010) y en *P. virgatum* (McLaughlin et al., 1999).

En Uruguay existe escasa información acerca de la producción de materia seca de los cultivos de *A. donax*, *P. virgatum* y *P. purpureum*. Al ser especies de orígenes diferentes, es posible que sus potenciales productivos y de calidad de biomasa varíen acorde al número de cosechas anuales. Se planteó como objetivo de este trabajo identificar la especie y número de cosechas anuales que logre el mayor rendimiento potencial, mejor calidad de biomasa y mayor producción de energía. Al ser cultivos perennes y de alta

producción de biomasa, es posible que generen variación en la composición química del suelo acorde a su producción, debido a cambios en los procesos de ganancia y pérdida de carbono orgánico del suelo (COS), así como diferencias en la extracción de nutrientes. Se comparó el contenido de COS del suelo, potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P), al término del experimento, con el objetivo de identificar el impacto de cada cultivo y manejos de cosecha en el recurso suelo.

Materiales y métodos

Ubicación del experimento

El experimento se realizó en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República, ubicada en el departamento de Paysandú (32 ° 21 ' S y 58 ° 02 ' W; 61 m de altitud) en Uruguay, sobre suelos clasificados como Brunosoles Éutricos Típicos Fr de la unidad cartográfica San Manuel (Altamirano et al., 1976).

Los cultivos energéticos evaluados fueron *Panicum virgatum*, *Arundo donax* y *Pennisetum purpureum*. Los cultivos se implantaron en la primavera del 2007 y el período de evaluación fue desde el corte de enero del 2012 al de agosto del 2013. *Panicum virgatum* se cultivó a partir de semillas con una población objetivo de 1.000.000 plantas ha⁻¹. *P. purpureum* y *A. donax* se cultivaron por esquejes, con una población objetivo de 20.000 pl ha⁻¹. Las parcelas fueron de 3 x 5 m y el experimento se diseñó en bloques completos al azar, con tres repeticiones.

Se realizaron dos tratamientos de corte: un corte en agosto y un corte en enero y otro en agosto.

Evaluación de la producción

Todos los cortes se realizaron a una altura de 10 a 15 cm. La biomasa cosechada se pesó con balanza electrónica de precisión 0,5 kg y capacidad de 100 kg. En cada corte se cosechó un área de 2,2 m² de cada parcela. Los tratamientos se fertilizaron luego de cada cosecha con 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno agregado en forma de urea, un mes después de cada cosecha de agosto.

En cada cosecha, para la determinación de materia seca (MS) se pesó una muestra fresca (aproximadamente 1 kg), se la trozó a fracciones de 5 cm y secó a 60 °C durante 48 horas. El contenido en MS se expresó como porcentaje del peso inicial % MS = (peso seco:peso fresco) × 100, y el de humedad se estimó como la diferencia (%100-% MS). A partir del material secado y molido hasta pasar una malla de

2 mm se obtuvieron los porcentajes de cenizas, potasio (% K) y el poder calorífico superior (MJ kg⁻¹). El contenido de potasio se midió por cenizado y posterior determinación por emisión atómica (Bataglia et al., 1983) con espectrofotómetro de emisión y absorción atómica marca Perkin Elmer Modelo AAnalyst 700. El poder calorífico se determinó por el método dinámico con un calorímetro Modelo Parr 6100.

La producción de energía (e) en una hectárea se estimó acorde a la siguiente fórmula [1]:

$$e(\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}) = \text{Biomasa} (\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) \cdot \text{MS} \cdot \text{C} (\text{GJ} \cdot \text{Mg}^{-1}) \quad [1]$$

donde: biomasa son los Mg de materia verde producida en una hectárea; MS es la proporción de materia seca o Mg materia seca contenidos por cada Mg de materia verde; y C o contenido calórico son los GJ que produce cada Mg de materia seca producida.

En una submuestra fresca se contó el número de tallos y se registró su peso individual (PIT: peso individual por tallo), expresado en base seca. A partir del número de tallos de la submuestra se estimó el número de tallos por metro cuadrado (N°T m⁻²).

Evaluación de propiedades químicas del suelo (potasio, fósforo, nitrógeno y carbono orgánico del suelo)

El muestreo se realizó en octubre del año 2013, en el sexto año de implantación de los cultivos. Se extrajeron muestras de suelo a las profundidades 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm en todos los tratamientos. Las muestras fueron secadas a 40 °C y molidas hasta pasar por malla 2 mm. La determinación de potasio intercambiable (K_{int}) se realizó mediante extracción con acetato de amonio y posterior determinación en espectrometría de llama por emisión atómica (Jackson, 1964). El contenido de fósforo (P_{Bray I}) se realizó acorde al extractante propuesto por Bray y Kurtz (1945) y el contenido de P en el extracto se determinó por desarrollo de color azul del complejo P-molibdato, acorde a Murphy y Riley (1962). El N total se determinó por digestión húmeda acorde a una modificación de la técnica de Kjeldahl propuesta por Bremner (1965); y el carbono orgánico del suelo (COS) se determinó mediante digestión húmeda acorde a Tynslley (1967).

Análisis estadístico

La producción de materia fresca y seca se analizó por modelos mixtos, con el software InfoStat/Profesional. Al haber medidas repetidas en el tiempo se consideraron a las parcelas como efecto aleatorio. Los niveles de K_{int}, P_{Bray I}, N_{total}, COS, % K, cenizas y poder calórico, se analizaron

como modelo general lineal. Se consideraron efectos significativos del ANAVA aquellos con $p < 0,1$ y se consideró que existió tendencia en los efectos con $p < 0,2$. Todas las medias se compararon por test de Fisher con $\alpha = 0,10$.

Se estimó la producción de materia seca en función del PIT y el $N^{\circ}T \text{ m}^2$ y se evaluó por el ajuste de la regresión obtenida.

Resultados y discusión

Producción de materia seca

En el promedio de ambos años de evaluación, *A. donax* produjo aproximadamente 24 % más biomasa seca que *P. virgatum* y *P. purpureum* (Cuadro 1). El rendimiento de *A. donax* fue ligeramente superior al potencial estimado por Falasca, Flores y Galvani (2011) para Argentina, para zonas con precipitaciones de 400 a 500 mm, similares a las ocurridas durante los meses de crecimiento en los dos años aquí evaluados (Figura 1). El rendimiento obtenido en *P. virgatum* también fue ligeramente superior a lo registrado en climas templados, según lo sugerido por Searle y Malins (2014). Los rendimientos obtenidos en investigaciones de *P. purpureum* son diversos, hay investigaciones con rendimientos de 5 a 16 Mg ha^{-1} (Cerdas y Vallejos, 2010),

mientras que otras investigaciones reportan hasta 53,2 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Ra et al., 2012). Petruzzi (2010) reportó rendimientos de 5,0 a 12,0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en cultivos de *P. purpureum* en Argentina. A nivel nacional se obtuvo un rendimiento de 45 Mg ha^{-1} con tres cortes anuales (Bernhaja, 2000). Esta variabilidad, como en las otras especies, podría ser atribuible a factores climáticos, variedades y prácticas de manejo.

En *A. donax* y *P. virgatum* la mayor producción de biomasa seca fue en el tratamiento de un solo corte en ambos años (Cuadro 1). Al realizar dos cortes se obtuvo mayor producción en enero que en agosto, lo cual podría atribuirse a que la cosecha de enero podría haber comprometido el rebrote y posterior acumulación de biomasa. *P. virgatum* y *A. donax* presentaron mayor producción en enero que *P. purpureum*, debido a un mayor crecimiento inicial. Ambas especies fueron, también, las de menor producción en agosto ($\text{DMS} = 1,3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) al realizar dos cortes. Reynolds, Walker y Kirchner (2000) y McLaughlin et al. (1999) observaron un mayor rendimiento en cultivos de *P. virgatum* al realizar dos cortes al año, pero en los sitios o años en que hubo estrés hídrico los rendimientos fueron mayores al realizar un solo corte. McLaughlin et al. (1999) consideran que al realizar dos cortes se perjudica el crecimiento radicular y

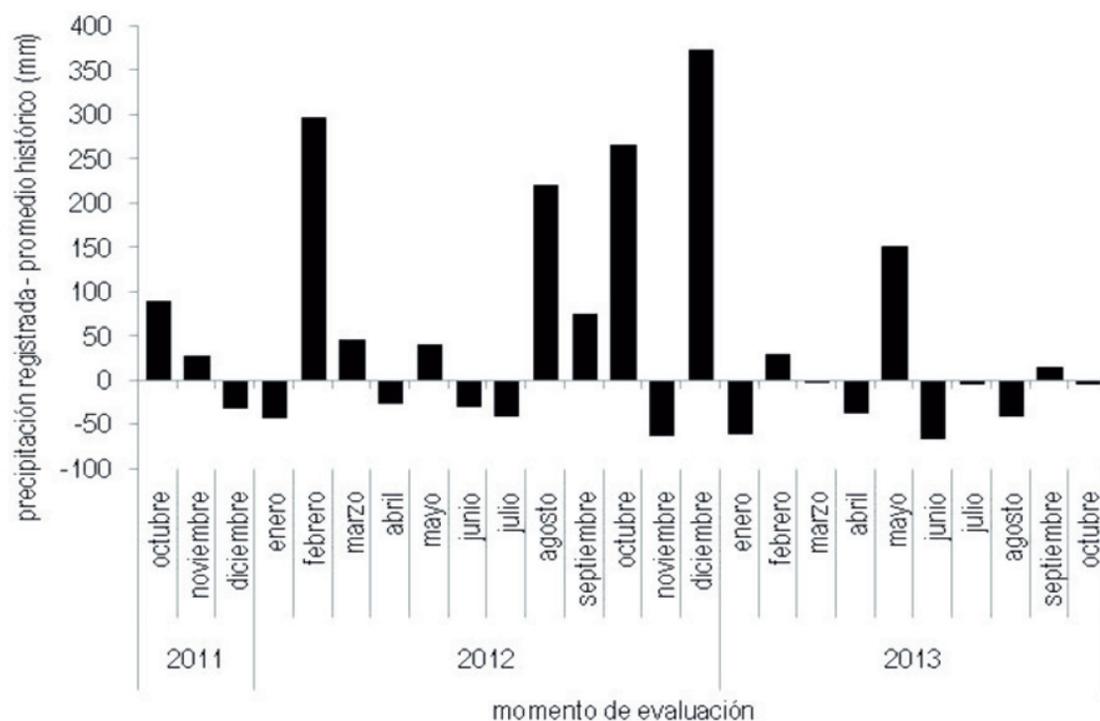


Figura 1. Diferencia de precipitaciones entre los meses y años evaluados en el experimento y las precipitaciones promedio históricas de la EEMAC, Paysandú (1980-2010).

Cuadro 1. Producción de materia seca de cada especie en cada año y cortes.

Especie	Número de cortes	2012			2013		
		enero	agosto	Total	enero	agosto	Total
Mg ha ⁻¹							
<i>A. donax</i>	un corte	—	23	23	—	24,4	24,4
	dos cortes	9,8	3,7	13,5	8,2	5,7	13,9
<i>P. purpureum</i>	un corte	—	21,7	21,7	—	15,1	15,1
	dos cortes	3,9	5,7	9,6	4,5	7,9	12,4
<i>P. virgatum</i>	un corte	—	15,8	15,8	—	17,7	17,7
	dos cortes	11,3	2,9	14,2	9,3	3	12,3
DMS		2,1	3,2	3,8	1,6	2,8	3,3

DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

en condiciones de stress hídrico se comprometería la absorción de agua necesaria para el rebrote. Vogel et al. (2002) recomiendan realizar dos cosechas al año, la última en estado reproductivo (fenología R3 a R5) y señalan que postergar la cosecha a estadios de mayor madurez puede disminuir el rendimiento. Rinehart (2006) recomienda realizar un solo corte anual de *P. virgatum* en cultivos con fines energéticos. En *P. purpureum* el tratamiento de un solo corte produjo más materia seca en el año 2012, pero no hubo diferencias en el año 2013. En esta especie, a diferencia de *A. donax* y *P. virgatum*, el corte de agosto produjo más que el corte de enero. La especie *P. purpureum* podría tener mayor capacidad de rebrote que las otras dos especies y, si las condiciones climáticas fueran favorables, al realizar dos cortes el rendimiento alcanzaría el de un solo corte. Las lluvias concentradas en diciembre del 2012 habrían permitido al cultivo superar la etapa de mayor demanda hídrica durante el rebrote pos corte. Madera et al. (2013), Ansah, Osafo y Hansen (2010) y Tessema, Mihret y Solomon (2010) obtuvieron aumentos de rendimiento al distanciar la frecuencia de corte de 60 a 90 días y la mayor producción fue al cosechar cada 120 días. En el año 2012, las escasas lluvias ocurridas hasta febrero (Figura 1) acentuaron el efecto adverso del corte de enero en *A. donax* y *P. virgatum*, ya que ese año se apreció la mayor diferencia de rendimiento respecto a agosto. En *P. purpureum* la diferencia entre el corte de enero y agosto fueron similares para ambos años de evaluación.

Al comparar la producción de materia seca de *P. purpureum* y *A. donax* con dos cortes, la primera especie produjo menos que la segunda en el promedio de los dos años. Con un solo corte *P. purpureum* produjo menos materia

seca que *A. donax* en el año 2013 (Cuadro 1). La posible razón de este resultado podría ser que *P. purpureum* fue más afectado por las deficiencias hídricas que *A. donax* y que las precipitaciones concentradas en diciembre del 2012 no cubrieron tales déficits, a diferencia de febrero del 2012.

El N°T m⁻² y el PIT, fueron indicadores apropiados del rendimiento de materia seca en las tres especies. En *A. donax* el PIT explicó el 60 % de la variación en producción de materia seca, mientras que el N°T m⁻² no tuvo una relación significativa. Angelini et al. (2009), al trabajar con *A. donax*, obtuvieron una correlación positiva entre rendimiento, altura y diámetro del tallo, lo cual se puede considerar un resultado similar al aquí obtenido, ya que el PIT dependería en parte del grosor del tallo, aunque esta relación no se evaluó en el presente trabajo. En *P. virgatum* ambos componentes tuvieron una relación satisfactoria con la producción de biomasa seca. El PIT explicó el 65 % de la variación observada y el N°T m⁻² el 47 %. Boe y Beck (2008) observaron resultados similares para esta especie, ya que las variables de mayor relación con el rendimiento fueron N°T m⁻² y peso del fitómero, el cual podría estar relacionado con PIT, aunque esta relación no fue estudiada. En *P. purpureum* el PIT explicó el 47 % del rendimiento y el N°T m⁻² explicó el 25 % del rendimiento. Oliveira et al. (2011) determinaron una relación satisfactoria entre rendimiento y altura de los tallos. Aunque no fue una variable medida en el presente trabajo, es esperable que la altura sea influenciada por N°T m⁻² debido a la competencia por luz que se genera al aumentar la densidad. Si bien no puede llegarse a información concluyente, sería posible suponer que N°T m⁻² y PIT serían indicadores de interés al evaluar el desempeño de los cultivares de *A. donax* y *P.*

virgatum. En el caso de la especie *P. purpureum* sería necesario considerar otras variables, como ser altura del tallo y/o peso de los fitómeros.

En *P. virgatum* al realizar dos cortes al año se producen tallos más livianos en agosto y menor N°T m², que al realizar un corte al año. Igual tendencia se observó en *P. purpureum* y *A. donax*, en ambas variables, pero dichas diferencias no fueron significativas. Este comportamiento se pudo deber a que el corte de enero no alcanzó para que el cultivo tuviese suficientes fotoasimilados para un correcto rebrote. Los rebrotes no tuvieron suficiente tiempo de crecimiento como para lograr un peso equiparable al de los cultivos que tuvieron un solo corte.

Contenido de humedad

P. virgatum tuvo el menor contenido de humedad en la cosecha de agosto; el mayor contenido lo tuvo *P. purpureum* y *A. donax* tuvo un valor intermedio (Cuadro 2). *P. virgatum* cumple con los requisitos exigidos a la materia prima que se utiliza para la producción de energía a partir de biomasa coincidiendo con McLaughlin et al. (1999). Las otras dos especies deberían retirarse del campo con un estado de deshidratación mayor o ser secadas artificialmente. Al investigar estos cultivos con fines energéticos, McLaughlin et al. (1999) cuantificaron para *P. virgatum* un contenido de humedad de 15 %. Los contenidos de humedad reportados para cosechas de *A. donax* oscilan entre 14 y 30 % (Smith y Slater, 2011; Bulpitt, 2009) y hasta 61 % (Dragoni et al., 2011). Para *P. purpureum* los contenidos de humedad son ligeramente superiores en la bibliografía consultada (Ribeiro et al., 2014; Zetina-Cordoba et al., 2013; Ukanwoko e Igwe, 2012), debido probablemente, a diferencias en el momento de cosecha.

Cuadro 2. Contenido de humedad (%) por especie, año y corte.

Especie	2012		2013	
	enero	agosto	enero	agosto
% humedad				
<i>A. donax</i>	57	44	59	27
		40		26
<i>P. purpureum</i>	72	55	75	69
		50		55
<i>P. virgatum</i>	51	18	60	11
		19		10

En *P. purpureum* el contenido de humedad del corte de agosto fue mayor al realizar dos cortes al año (Cuadro 2). Similar tendencia se observó en las otras dos especies, pero la diferencia no fue significativa. Es posible que al realizar dos cortes, los tallos que comienzan la senescencia al final del período de crecimiento hayan generado tejidos con paredes celulares de menor espesor. En el sistema de dos cortes, el contenido de humedad en enero (entre 56 a 74 %) fue mayor que en el corte de agosto en las tres especies, lo cual era esperable acorde a lo observado por Nassi o Di Nasso, Angelini y Bonari (2010). La especie que tiene el menor contenido de humedad en agosto con el tratamiento de dos cortes es *P. virgatum* (14 %), valor mencionado por McLaughlin et al. (1999) para esta materia prima.

Carbono en el suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) se vio afectado por las diferentes especies y el número de cortes para las tres especies consideradas y en las profundidades 0-20 y 40-60 cm. No se observaron estos efectos en la profundidad de 20-40 cm. El suelo cultivado con *P. purpureum* fue el que presentó mayor contenido de COS a la profundidad de 0-20 cm (Cuadro 3), probablemente debido a que esta fue la especie de mayor producción pos corte de enero y la que tuvo mayor humedad al momento del corte, por lo que es presumible que haya tenido mayor caída de hojas al comenzar el período de heladas, las cuales son un aporte de carbono al suelo. En la profundidad de 40-60 cm, *P. virgatum* presentó mayor contenido que *A. donax*, mientras que el suelo cultivado con *P. purpureum* tuvo un nivel intermedio (Cuadro 3). Esto podría explicarse por diferencias en el crecimiento radicular entre especies, pero no se realizaron mediciones que permitieran aseverar este aspecto. En ambas profundidades la mayor cantidad de COS se favoreció por el tratamiento de un solo corte. Esto puede estar asociado a la mayor producción de biomasa lograda en este tratamiento. McLaughlin et al. (1999) sugieren que al realizar dos cortes en *P. virgatum* se puede perjudicar el crecimiento radical, por lo que al realizar dos cortes es posible que se haya logrado menor aporte de C al suelo al haber producido menos raíces. Esta especie podría favorecer el aumento de COS, acorde a lo expuesto por Dou et al. (2013); Jung y Lal (2011); Omonode y Vyn (2006); Lobo y Porfirio (2004); McLaughlin et al. (1999). Sarkhot et al. (2012) observaron aumento del COS al cabo de 40 años de cultivo de *A. donax*. El aumento de COS que se pueda lograr con estas especies dependerá de la producción de

Cuadro 3. Contenido de carbono orgánico en el suelo (g kg^{-1}) para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A. donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un corte			
0-20	23,4	20,7	19,9	0,05
20-40	14,7	15,3	13,6	ns
40-60	8,6	8,9	7,5	ns
Media de un corte	15,6	15	13,7	ns
	Dos cortes			
0-20	22	19,9	19,8	0,14
20-40	13,9	13,5	13,2	ns
40-60	7,4	8,5	6,4	0,13
Media de dos cortes	14,4	14	13,1	ns
Media	15	14,5	13,4	ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

biomasa y del tiempo de crecimiento, lo cual determinará mayor aporte de C. Al tratarse de cultivos perennes, se reducirían las pérdidas de C del sistema a través de la mineralización y erosión.

Fósforo en el suelo

En la profundidad de 0-20 cm el valor de P_Bray I en *P. virgatum* (19 mg kg^{-1}) fue mayor que en *A. donax* (9 mg kg^{-1}), mientras que *P. purpureum* tuvo valor inter-

medio (15 mg kg^{-1}) (Cuadro 4). No hubo diferencias entre los tratamientos de corte. La especie *A. donax* fue la de mayor rendimiento, por lo que exportaría mayor cantidad de P en su cosecha, aunque es posible que *P. purpureum* tenga mayor concentración de P en su biomasa al momento de la cosecha debido al mayor contenido de humedad de la misma. Las profundidades de 20-40 y 40-60 cm tuvieron 3 mg kg^{-1} P_Bray I sin diferencias entre especies ni cortes. La mayor cantidad de P_Bray I en superficie se

Cuadro 4. Contenido de P_Bray I (mg kg^{-1}) en el suelo para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A. donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un corte			
0-20	17,77	23,37	9,01	ns
20-40	4,38	3,17	3,16	ns
40-60	3,65	2,43	2,68	ns
Media de un corte	8,6	9,66	4,95	ns
	Dos cortes			
0-20	13,14	13,88	9,74	ns
20-40	3,65	2,63	2,19	ns
40-60	4,26	3,16	2,19	ns
Media de dos cortes	7,02	6,56	4,71	ns
Media	7,81	8,11	4,83	ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

debió a la estratificación esperable debida a la ausencia de laboreos en cultivos perennes.

Potasio en el suelo

En los primeros 20 cm de suelo, los tratamientos cultivados con *A. donax* y *P. purpureum* tuvieron mayor contenido de K_{int} que los cultivados con *P. virgatum* (Cuadro 5). Las especies *A. donax* y *P. purpureum* tuvieron mayor concentración de K en la biomasa que *P. virgatum*, por lo que es de esperar que al senescer sus tejidos aportaran más K a la superficie del suelo. No hubo diferencias generadas por el tratamiento de corte. La profundidad de 20-40 cm tuvo un contenido promedio de K_{int} de 0,74 meq. 100 g⁻¹ para todos los tratamientos. En la profundidad de 40-60 cm, el suelo cultivado con *P. purpureum* presentó 1,2 meq. 100 g⁻¹: más que en el suelo cultivado con *P. virgatum*, que presentó 0,98 meq. 100 g⁻¹. El suelo de los tratamientos con *A. donax* tuvo un valor promedio de 1,1 meq. 100 g⁻¹, el cual no se diferenció de los otros dos casos. Es posible que *P. virgatum* haya tenido una absorción relativa mayor de K a esta profundidad dado por la mayor cantidad de raíces, ya que a esa profundidad el contenido de COS del suelo cultivado con *P. virgatum* fue mayor.

Potasio en la biomasa

La especie *P. purpureum* fue la que tuvo mayor contenido de K, *A. donax* presentó un contenido intermedio, mientras *P. virgatum* fue la especie de menor concentración de

K (Cuadro 6). *P. purpureum* tuvo mayor contenido de humedad al momento de cosecha y se puede suponer que tuvo menor translocación de K a los órganos de reserva. McLaughlin et al. (1999) consideran que la alta relación de tallo:hoja en *P. virgatum* puede favorecer los bajos valores de K en la biomasa.

El corte de enero tuvo mayor contenido de K que el de agosto en las tres especies. Esto puede deberse a la translocación de K ocurrida a finales de la etapa de crecimiento, previo a la cosecha de agosto y a las diferencias en la relación hoja:tallo entre ambas cosechas. La especie que tuvo mayor diferencia relativa entre el K medido en enero y agosto fue *P. virgatum*, mientras la que presentó menor diferencia fue *P. purpureum*.

El contenido de K en agosto fue mayor en los cultivos de dos cortes en *P. purpureum* que con un solo corte. En las otras dos especies no hubo diferencias entre el número de cortes. En *P. purpureum* el rebrote luego del corte de enero no habría logrado la misma translocación que la biomasa generada desde comienzos del período de crecimiento.

P. purpureum tuvo la mayor extracción de K (293 kg ha⁻¹ año⁻¹) de las tres especies evaluadas al realizar una sola cosecha. Mientras tanto, *P. virgatum* tuvo la menor extracción al realizar un solo corte, la cual fue de tan solo 17 kg ha⁻¹ año⁻¹ de K. La alta exportación de K del cultivo *P. purpureum* no se vio reflejada en los contenidos de K_{int} , esto pudo deberse a que esta especie absorbe K desde formas no cuantificadas por la técnica de análisis o al reciclaje discutido anteriormente.

Cuadro 5. Contenido de K_{int} (meq. 100 g⁻¹) en el suelo para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A. donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un corte			
0-20	0,86	0,73	0,91	ns
20-40	0,80	0,76	0,70	ns
40-60	1,01	1,03	1,03	ns
Media de un corte	0,89	0,84	0,88	ns
	Dos cortes			
0-20	0,74	0,44	0,92	0,12
20-40	0,92	0,61	0,65	ns
40-60	1,39	0,93	1,20	0,35
Media de dos cortes	1,02	0,66	0,92	0,29
Media	0,95	0,75	0,90	0,17

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

Cuadro 6. Contenido de K (%) en la biomasa en las tres especies, según número y momentos de cortes.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A. donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un corte			
Agosto	1,59	0,11	0,45	0,34
	Dos cortes			
Enero	2,69	0,77	1,27	0,14
Agosto	2,09	0,1	0,61	0,6
Media	2,12	0,33	0,78	0,35

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

Los niveles de % K de las cosechas de agosto 2013 fueron mayores que en el año 2012. El rebrote luego de la cosecha de enero del 2013 pudo sufrir estrés hídrico ya que las precipitaciones fueron menores en ese año. Nassi o Di Nasso, Angelini y Bonari (2010) observaron un incremento de K en biomasa de *A. donax* debido al estrés hídrico.

Nitrógeno en el suelo

P. purpureum fue la especie que tuvo más N en los primeros 20 cm de suelo, 0,19 % N, mientras *A. donax* y *P. virgatum* tuvieron 0,16 y 0,15 %, respectivamente (Cuadro 7). Este resultado fue el esperable, ya que *P. purpureum* fue la que presentó mayor contenido de COS a esta profundidad. No hubo efecto del número de cortes sobre esta variable. En el resto de las profundidades de muestreo, no hubo efecto de la especie ni del número de cortes. Era esperable, sin embargo, que existiese una mayor extracción de N en los sistemas de dos cortes y en consecuencia una menor

cantidad de N en los suelos de estos sistemas. Reynolds, Walker y Kirchner (2000) cuantificaron en *P. virgatum* mayor remoción de N al realizar dos cortes que un solo corte, y McLaughlin et al. (1999) observaron que los cultivos de *P. virgatum* cosechados dos veces al año extrajeron de 3,0 a 5,6 veces más N que los cultivos cosechados una sola vez. En este estudio no se cuantificó la extracción de N realizada, por lo que no es posible concluir sobre este aspecto.

Contenido de cenizas

Las especies *A. donax* y *P. purpureum* fueron las que presentaron mayor porcentaje de cenizas y contenido de K. En enero, *A. donax* y *P. purpureum* presentaron contenidos de 14,8 y 14,1 % respectivamente, los cuales fueron mayores al contenido de agosto, de 5,6 y 6,3 % respectivamente. La especie *P. virgatum* presentó menores contenidos en ambas cosechas, de 4,3 y 5,5 % para la cosecha

Cuadro 7. Contenido de N en suelo (%) para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A. donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un corte			
0-20	0,2	0,17	0,15	0,04
20-40	0,13	0,13	0,12	ns
40-60	0,09	0,08	0,08	ns
Media de un corte	0,14	0,13	0,12	ns
	Dos cortes			
0-20	0,19	0,14	0,17	ns
20-40	0,12	0,12	0,13	ns
40-60	0,09	0,08	0,08	ns
Media de dos cortes	0,13	0,11	0,13	ns
Media	0,14	0,12	0,12	ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

de agosto y enero respectivamente. Los menores contenidos de cenizas evaluados en agosto concuerdan con lo observado por McLaughlin et al. (1999) al estudiar *P. virgatum*, y con Ansah, Osafo y Hansen (2010) al estudiar *P. purpureum*. Con el atraso de la cosecha, al haber ocurrido el envejecimiento de los tejidos, es esperable que el contenido de minerales (cenizas) de los tejidos sea menor, debido al proceso de translocación o lixiviación de los mismos desde las hojas. La reducción en el contenido de cenizas que incluye paralelamente la reducción en K, puede ser atribuido a la mayor proporción de tallo:hoja con el retraso de la cosecha, y contribuye de forma importante a disminuir los residuos que generan problemas en la combustión (McLaughlin et al., 1999). Es deseable además que estos materiales posean altos contenidos de carbohidratos de alto peso molecular, como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cual brinda mayor poder calórico por unidad de peso.

Poder calorífico y producción de energía

P. purpureum y *A. donax* tuvieron mayor poder calorífico en el corte de agosto (Cuadro 8). En *P. virgatum* no hubo diferencias en el poder calorífico entre épocas de corte y tuvo mayor poder calorífico que las otras dos especies en enero. Esto podría deberse a que en agosto habría menor contenido de cenizas, producto de la translocación de los minerales y, por lo tanto, la composición de la biomasa sería principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina.

El tratamiento de mayor producción de energía por hectárea fue *A. donax* con un solo corte y el tratamiento de menor producción fue *P. purpureum* con dos cortes (Cuadro 8).

Conclusiones

La mayor producción de energía se lograría con el cultivo de *A. donax* a través de una única cosecha en agosto. Al realizar una sola cosecha se disminuiría el costo energético, se lograría un material con menor contenido de cenizas

y humedad, y se extraería menor cantidad de K del sistema. El cultivo de *P. virgatum* fue el de menor producción de energía con un solo corte, pero tendría la ventaja de ser un material con bajo contenido de humedad, lo cual abarataría el costo de transporte y procesamiento previo a la combustión, a la vez que es el material de menor contenido de cenizas y extracción de K. El cultivo de *P. purpureum* produjo valores intermedios de energía, además de los mejores valores de COS y N en suelo, pero a causa de los altos valores de humedad, extracción de K y cenizas, es cuestionable su calidad como materia prima y la sostenibilidad en el sistema.

Bibliografía

- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D. y Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III*. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca.
- Angelini, L. G., Ceccarini, L. y Bonari, E. (2005). Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy*, 22, 375–389.
- Angelini, L. G., Ceccarini, L., Nasso, N. y Bonari, E. (2009). Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, 33, 635–643.
- Ansah, T., Osafo, E. L. K. y Hansen, H. H. (2010). Herbage yield and chemical composition of four varieties of Napier (*Pennisetum purpureum*) grass harvested at three different days after planting. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(5), 923-929.
- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R. y Gallo, J. R. (1983). *Métodos de análise química de plantas*. Campinas: IAC. (Boletim Técnico N° 78)
- Benhaja, M. (2000). *Pasto Elefante (Pennisetum purpureum Schum.)* INIA Lambaré. Montevideo: INIA.
- Boe, A. y Beck, D. L. (2008). Yield components of biomass in switchgrass. *Crop Science*, 48(4), 1306-1311.
- Boehmel, C., Lewandowski, I. y Claupein, W. (2008). Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural Systems*, 96, 224-236.
- Bray, R. H. y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45

Cuadro 8. Poder calorífico y producción de energía, por especie, mes de corte y número de cortes.

Especie	Poder calorífico		Producción de energía	
	Enero	Agosto	Un corte	Dos cortes
	MJ kg ⁻¹		GJ ha ⁻¹ año ⁻¹	
<i>A. donax</i>	15,2	17,2	407	217
<i>P. purpureum</i>	15,2	17,4	320	182
<i>P. virgatum</i>	17,3	17,3	289	229

- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. En C. A. Black (Ed). *Methods of soil analysis* (pp. 1149-1178). Madison: American Society of Agronomy.
- Bulpitt, W. S. (2009). Fuel properties and combustion theory. En T. F. McGowan (Ed.). *Biomass and alternate fuel systems: An engineering and economic guide* (pp. 13-35). New Jersey: Wiley.
- Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, O. y Miguel, L. J. (2014). *Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: Un enfoque integrado*. Recuperado de http://www.eis.uva.es/energiasostenible/wp-content/uploads/2014/09/Capellanelal2014_109/Capellanelal2014_esp.pdf
- Cerdas, R. y Vallejos, E. (2010). Productividad del pasto Camerún (*Pennisetum purpureum*) con varias dosis de nitrógeno y frecuencias de corte en la zona seca de Costa Rica. *InterSedes*, 11(22), 180-195.
- de Moraes Sá, J. C., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hungria, M. y de Faccio Carvalho, P. C. (2017). Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 98, 102-112.
- Dou, F. G., Hons, F. M., Ocumpaugh, W. R., Read, J. C., Hussey, M. A. y Muir, J. P. (2013). Soil organic carbon pools under switchgrass grown as a bioenergy crop compared to other conventional crops. *Pedosphere*, 23(4), 409-416.
- Dragoni, F. F., Ragolini, G. G., Nassi o Di Nasso, N. N., Tozzini, C. C. y Bonari, E. E. (2011). Suitability of giant reed and miscanthus for biogas: Preliminary investigations on harvest time and ensiling. *Aspects of Applied Biology*, 112, 291-296.
- Falasca, S., Flores, M. N. y Galvani, G. (2011). *¿Puede usarse una especie invasora como Arundo donax (caña común) con fines energéticos en Argentina?* Recuperado de <http://ebookbrowse.net/file-name-inta-arundo-donax-con-fines-energeticos-en-argentina-pdf-d314127398>
- Fike, J. H., Parrish, D. J., Lobo, D. D., Wolf, D. D., Balasko, J. A., Green, J. T., ... y Reynolds, J. H. (2006). Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass and Bioenergy*, 30(3), 198-206.
- Fontoura, C. F., Brandão, L. E. y Gomes, L. L. (2015). Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix? *Journal of Cleaner Production*, 96, 85-93.
- Heaton, E. A., Brown-Clifton, J., Voigt, T. B., Jones, M. B. y Long, S. P. (2004). *Miscanthus* for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 9(4), 433-451.
- Jackson, M. L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Jung, J. Y. y Lal, R. (2011). Impacts of nitrogen fertilization on biomass production of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and changes in soil organic carbon in Ohio. *Geoderma*, 166(1), 145-152.
- Lobo, A. y Porfirio, J. (2004). *Changes in soil carbon and nitrogen associated with switchgrass production* (Tesis de maestría). Texas A&M University, Texas. Recuperado de <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/11258>
- Madera, N. B., Ortiz, B., Bacab, H. M. y Magaña, H. (2013). Influencia de la edad de corte del pasto morado (*Pennisetum purpureum*) en la producción y digestibilidad *in vitro* de la materia seca. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(2), 41-52.
- McLaughlin, S., Bouton, J., Bransby, D., Conger, B., Ocumpaugh, W., Parrish, D., ... y Wulschleger, S. (1999). Developing switchgrass as a bioenergy crop. En J. Janick (Ed). *Perspectives on new crops and new uses* (pp. 282-299). Alexandria, VA: ASHS Press.
- Murphy, J. y Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36
- Nassi o Di Nasso, N., Angelini, L. G. y Bonari, E. (2010). Influence of fertilization and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *European Journal of Agronomy*, 32(3), 219-227.
- Oliveira, T., Pereira, J. C., Reis, C., Queiroz, A., Cecon, P. y Gomes, S. (2011). Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 12(1), 32-42.
- Omonode, R. A. y Vyn, T. J. (2006). Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 117(2-3), 159-170.
- Petruzzi, H. (2010). *Pasto varilla –cultivo bio-energético*. Recuperado de http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/37-Residuos_cultivos.pdf
- Ra, K., Shiotsu, F., Abe, J. y Morita, S. (2012). Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 37, 330-334.
- Reynolds, J. H., Walker, C. L. y Kirchner, M. J. (2000). Nitrogen removal in switchgrass biomass under two harvest systems. *Biomass and Bioenergy*, 19(5), 281-286.
- Ribeiro, L. S. O., Pires, A. J. V., de Carvalho, G. G. P., Pereira, M. L. A., dos Santos, A. B. y Rocha, L. C. (2014). Fermentation characteristics, chemical composition and fractionation of carbohydrates and crude protein of silage of elephant grass wilted or with addition of castor bean meal. *Ciências Agrárias*, 35(3), 1447-1462.
- Rinehart, L. (2006). *Switchgrass as a bioenergy crop*. Recuperado de <https://attra.ncat.org/attra-pub/summaries/summary.php?pub=311>
- Sarkhot, D. V., Grunwald, S., Morgan, C. L. S. y Geb, Y. (2012). Total and available soil carbon fractions under the perennial grass *Cynodon dactylon* (L.) Pers and the bioenergy crop *Arundo donax* L. *Biomass and Bioenergy*, 41, 122-130.
- Searle, S. Y. y Malins, C. J. (2014). Will energy crop yields meet expectations? *Biomass and Bioenergy*, 65, 3-12.
- Smith, R. R. y Slater, F. M. (2011). Mobilization of minerals and moisture loss during senescence of the energy crops *Miscanthus x giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea* in Wales, UK. *GCB Bioenergy*, 3(2), 148-157.
- Tessema, Z. K., Mihret, J. y Solomon, M. (2010). Effect of defoliation frequency and cutting height on growth, dry-matter yield and nutritive value of Napier grass (*Pennisetum purpureum* (L.) Schumacher). *Grass and Forage Science*, 65, 421-430.
- Thomason, W. E., Raunb, W. R., Johnsonb, G. V., Taliiferrob, C. M., Freemanb, K. W., Wynn, K. J. y Mullenb, R. W. (2005). Switchgrass response to harvest frequency and time and rate of applied nitrogen. *Journal of Plant Nutrition*, 27 (7), 1199-1226.
- Tynsley, J. (1967). *Soil Science: Manual of experiments*. Aberdeen: University of Aberdeen.
- Ukanwoko, A. I. e Igwe, N. C. (2012). Proximate composition of some grass and legume silages prepared in a humid tropical environment. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2(2), 68-71.
- Ullah, M. A., Anwar, M. y Rana, A. S. (2010). Effect of nitrogen fertilization and harvesting intervals on the yield and forage quality of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) under mesic climate of pothowar plateau. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 47(3), 231-234.
- Vogel, K. P., Bredja, J. J., Walters, D. T. y Buxton, R. D. (2002). Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and nitrogen management. *Agronomy Journal*, 94, 413-420.
- Zetina-Cordoba, P., Ortega-Cerrilla, M. E., Ortega-Jimenez, E., Herrera-Haro, J. G., Sanchez-Torres-Esqueda, M. T., Reta-Mendiola, J. L., ... y Munguia-Ameca, G. (2013). Effect of cutting interval of Taiwangrass (*Pennisetum purpureum*) and partial substitution with duckweed (*Lemna* sp. and *Spirodela* sp.) on intake, digestibility and ruminal fermentation of Pelibuey lambs. *Livestock Science*, 157, 471-477.