

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA INGENIERÍA FORESTAL

PROGRAMA DE MAESTRÍA ACADÉMICA EN CIENCIAS FORESTALES

“Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica”

Trabajo final de graduación sometido al Tribunal del Área Académica de Postgrado en Ciencias Forestales del Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de Magister en Ciencias Forestales

Licda. Estephanía Salazar Zeledón

Ingeniera Forestal

Cartago, Costa Rica

2016

Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica.

Estephanía Salazar-Zeledón¹

RESUMEN

La alta demanda mundial de combustibles fósiles ha dado lugar a problemas de seguridad energética y aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales han provocado el calentamiento global, degradación del ecosistema, contaminación y cambio climático global. Esto ha provocado una estimulación en la investigación para evaluar las fuentes de energía alternativa, que sea sostenible, más limpia y ambientalmente neutral. Existen dos enfoques para la producción de biomasa a partir de cultivos, uno corresponde a plantaciones dendroenergéticas, que son cultivos forestales establecidos a altas densidades para maximizar biomasa por unidad de área, y los cultivos anuales y perennes, los cuales corresponden a cultivos agrícolas para la producción de energía y que pueden persistir durante varios años. Es por esto que el presente proyecto tiene como objetivo evaluar la producción en biomasa, el contenido de humedad, las propiedades energéticas y químicas del primer, segundo y tercer ciclo de corta para tres especies de pastos (*Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) de una plantación agroenergética en condiciones de clima tropical húmedo en Costa Rica. Dichos cultivos se establecieron con espaciamientos de 1 m x 1 m para las plantas y 1 m x fila. Cada tres meses se realizó un muestreo de altura total y cantidad de rebrotes; al mismo tiempo cada seis meses se cosechó completamente para medir producción de biomasa seca (Mg ha⁻¹) y analizar química y energéticamente el material. Los resultados mostraron que los

¹ Salazar-Zeledón, E. 2015. Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica. Informe del Trabajo Final de Graduación. Maestría en Ciencias Forestales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

rendimientos más altos en producción de biomasa seca fueron para las especies del género *Pennisetum*, propagadas por tallo, en la cosecha II; con valores de 36 Mg ha⁻¹ en *P. purpureum* x *P. glaucum* y 39 Mg ha⁻¹ para *P. purpureum*, comparadas con la especie *A. donax* con valores de 6 Mg ha⁻¹. Los valores más altos de poder calórico, se obtuvieron en la cosecha II, para las tres especies; *P. purpureum* x *P. glaucum* con 17 855 kJ kg⁻¹, *P. purpureum* propagado por tallo con 17 624 kJ kg⁻¹, *P. purpureum* propagado por plántula con 17 363 kJ kg⁻¹ y *A. donax* con 17 773 kJ kg⁻¹. La mejor calidad de biomasa se presentó en la cosecha II para la especie *P. purpureum* propagada por tallo, ya que esta biomasa presenta bajas en contenido de humedad (57 %) y cenizas (5,99 %) y además, la especie *A. donax* es energéticamente diferente a las especies del género *Pennisetum*, asociado a la baja producción en sus tres cosechas (3 Mg ha⁻¹, 6 Mg ha⁻¹ y 11 Mg ha⁻¹) y características químicas máximas en S (0,20 %, 0,31 % y 0,19 %), Mg (0,27 %, 0,33 % y 0,31 %), N (1,30 %, 1,59 %, 0,93 %), y Mn (150 mg kg⁻¹, 196 mg kg⁻¹ y 243 mg kg⁻¹). Las variables más correlacionadas con el componente 1 son Ca, S, Mg y N con 90 %, la biomasa seca, la relación C/N y Mn con 85 %.

Palabras clave. bioenergía, especies tropicales, plantaciones de larga duración, potencial energético, pastos.

Evaluation of the energy potential for the grass species of *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* and *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* for three different harvests, located in an agroenergetic plantation in conditions of Tropical Humid climate of Costa Rica.

Estephanía Salazar-Zeledón²

ABSTRACT

The high global demand for fossil fuels has led to problems of energy security and increased greenhouse gas emissions, which have led to global warming, ecosystem degradation, pollution and global climate change. This has led to stimulation in research to evaluate alternative energy sources, which is sustainable, cleaner and environmentally neutral. There are two approaches to the production of biomass from crops, one corresponding to dendroenergetic plantations, which are forest plantations established at high stocking to maximize biomass per unit area, and annual and perennial crops, for energy production and can persist several years. This is why the present project aims to evaluate the biomass production, moisture content, energy and chemical properties of the first, second and third cycle of cutting for three pasture species (*Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) of an agroenergy plantation under tropical humid conditions in Costa Rica. These crops were established with spacing of 1m x 1m for plants and 1m x line. Every three months a sampling of total height and number of sprouts was carried out; at the same time every six months was harvested completely to measure dry biomass (Mg ha^{-1}) production and to analyze chemically and energetically the material. The results showed that the highest yields in dry biomass production were for the species of the genus *Pennisetum*, propagated by stem, in harvest II; with values of 36 Mg ha^{-1} in *P. purpureum* x *P. glaucum* and 39 Mg ha^{-1} in *P. purpureum*,

² Salazar-Zeledón, E. 2015. Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica. Informe del Trabajo Final de Graduación. Maestría en Ciencias Forestales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

compared to the *A. donax* species with values of 6 Mg ha⁻¹. The caloric value were obtained in harvest II, for the three species; *P. purpureum* x *P. glaucum* with 17 855 kJ kg⁻¹, *P. purpureum* propagated by stem with 17 624 kJ kg⁻¹, *P. purpureum* propagated by seedling with 17 363 kJ kg⁻¹ and *A. donax* with 17 773 kJ kg⁻¹. The best quality of biomass was presented in harvest II for the *P. purpureum* species propagated by stem, since this biomass presents low in moisture content (57 %) and ashes (5,99 %), and the *A. donax* species is energetically different from the *Pennisetum* species, associated with low yields in their three harvests (3 Mg ha⁻¹, 6 Mg ha⁻¹ and 11 Mg ha⁻¹) and (0,20 %, 0,31 % and 0,19 %), Mg (0,27 %, 0,33 % and 0,31 %), N (1,30 %, 1,59 %, 0,93 %), and Mn (150 mg kg⁻¹, 196 mg kg⁻¹ and 243 mg kg⁻¹). The most correlated variables with component 1 are Ca, S, Mg and N with 90 %, dry biomass, C / N and Mn with 85 %.

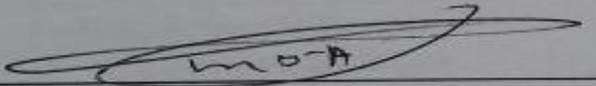
Keywords. bioenergy, tropical species, long-term crops, energy potential, pastures.

ACREDITACIÓN

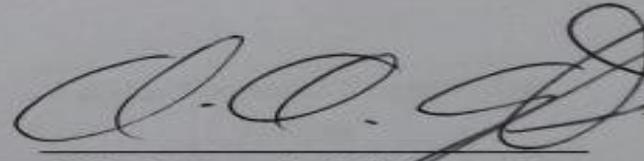
Esta tesis fue aceptada por el Tribunal evaluador del Área Académica de Postgrado en Ciencias Forestales del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Magister.

“Evaluación del potencial energético para las especies de pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* para tres diferentes cosechas, localizadas en una plantación agroenergética en condiciones de clima Tropical Húmedo de Costa Rica.”

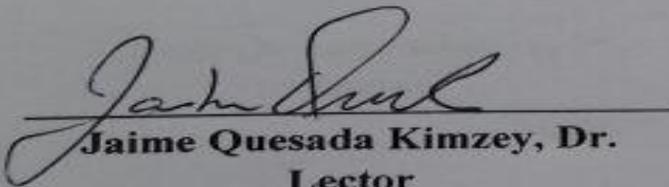
Miembros del Tribunal Evaluador



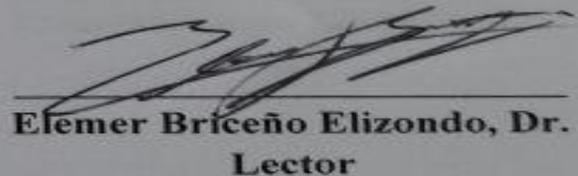
Róger Moya Roque, Dr.
Director de Tesis



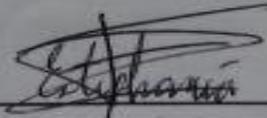
Edwin Esquivel Segura, Dr.
Lector



Jaime Quesada Kimzey, Dr.
Lector



Elemer Briceño Elizondo, Dr.
Lector



Estephania Salazar Zeledón
Estudiante

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a esa persona con la que compartí mi niñez, mis travesuras, mis primeros pasos, a ese hombre que me enseñó a luchar por los sueños, a sonreír ante la adversidad, a ver los días grises llenos de colores y tantas pero tantas cosas más...

*A ti mi amigo y hermano, **Reiner Salazar Zeledón**, a pesar que ya no estás conmigo aquí en la Tierra, te siento todos los días en mi corazón y te recuerdo a cada segundo.*

Te dedico este proyecto porque la inspiración para vivir cada día y perseguir mis sueños... me la diste tú.

*“Jamás olvides que TE QUIERO...
y jamás quieras que te olvide...
porque el lazo que Dios creó
entre tú y yo ya nada ni nadie lo podrán destruir...”*

*Crees que por estar lejos no te recuerdo
y si no te veo te dejo de querer,
mmm no te equivoques yo siempre estaré aquí
y nunca olvido a quien es especial para mí!!!”*

(Reiner Salazar Zeledón, 2010)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios y a la Virgencita de Los Ángeles, porque ellos son los que me guían y protegen en mi camino diario.

A mis papás Mirna Zeledón Fallas y Reiner Salazar Rojas por su amor sin fronteras, apoyo incondicional, consejos y por hacer de mí lo que soy hoy.

A mi hermana Jennifer Salazar Zeledón por su cariño, apoyo, dirección y por estar siempre dispuesta a ayudarme.

A todos los profesores y profesoras de la Escuela de Ingeniería Forestal del ITCR por sus enseñanzas no solo académicas sino de la vida.

Al profesor Róger Moya por su guía, consejos y hasta “jalones de orejas” para hacer de mí una gran profesional y sobre todo porque creyó en mí para desarrollar este proyecto.

Al profesor Edwin Esquivel porque me tendió la mano con sus conocimientos, consejos y me enseñó que en esta vida hay que cuestionar absolutamente TODO.

Al profesor Elemer Briceño por su disposición y darme ánimo para desarrollar este proyecto.

Al profesor Dagoberto Arias por su apoyo incondicional, guía y por enseñarme que ante cualquier adversidad hay que regalar una sonrisa.

A la empresa Agrep Forestal S.A. por brindar todo el apoyo logístico para que este proyecto fuera hoy una realidad.

A todo el equipo del CIF por su guía y apoyo para poder desarrollar este proyecto.

A mis amigos porque con ustedes hasta con el problema más grande se ríe uno y enfrenta los días con mucho positivismo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT	iv
ACREDITACIÓN	vi
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	5
2.1.Descripción del ensayo experimental de plantación bioenergética	5
2.2.Descripción del suelo.....	6
2.3.Diseño experimental	6
2.4.Muestreo y cosecha de las plantaciones energéticas.....	8
2.5.Procesamiento del material a cosechar	10
2.6. Cálculo de producción de biomasa seca aérea.....	11
2.7.Cantidad de rebrotes por hectárea.....	12
2.8.Determinación de propiedades energéticas.....	12
2.9.Determinación de propiedades químicas	14
2.10.Determinación de macro y micro elementos	14
2.11.Análisis Estadístico.....	15
3.RESULTADOS	16
3.1.Variación de rebrotes, altura total y producción de biomasa seca de tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía.	16
3.2.Caracterización energética para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	21
3.3.Caracterización química de elementos para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	24

3.4.Extraíbles presentes en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	27
3.5.Análisis multivariado en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	28
4.DISCUSIÓN.....	33
4.1.Variación de rebrotes, altura total y producción de biomasa seca de tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía.	33
4.2.Caracterización energética para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	35
4.3.Caracterización química de elementos para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	37
4.4.Extraíbles presentes en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	39
4.5.Análisis multivariado en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.	39
5.CONCLUSIONES.....	40
6.RECOMENDACIONES	41
7.REFERENCIAS	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de ensayo experimental agroenergético para tres especies de pastos en Costa Rica.	6
Cuadro 2. Crecimiento y mortalidad para tres especies de pastos en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.	18
Cuadro 3. Análisis de ANDEVA para las variables rendimiento, físicas, energéticas, químicas y de extractivos para pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.	21
Cuadro 4. Caracterización energética para tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.	23
Cuadro 5. Caracterización química de elementos para tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.	26
Cuadro 6. Matriz de correlación del análisis multivariado a partir de componentes principales para todos los parámetros evaluados de 3 especies de pastos, para 3 distintas cosechas y con 2 tipos de propagación en Costa Rica.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la precipitaciones y temperatura promedio mensual de octubre de 2014 a junio de 2016 en la estación Finca Tiburcia próxima a 16 km plantación agroenergética de pastos.....	5
Figura 2. Diseño experimental de plantación agroenergética para tres especies de pastos en Alajuela, Costa Rica.	7
Figura 3. Ensayo de cultivos agroenergéticos a partir de tres especies de pastos en San Carlos, Costa Rica.	8
Figura 4. Descripción de muestreo de crecimiento en altura total (Ht) en metros y cantidad de rebortes (# rebortes) para las tres especies de pasto por tipo de propagación. Propagación por tallo (a) y propagación por plántula (b).....	9
Figura 5. Procesado del material cosechado para pruebas energéticas y químicas. Astillado del pasto (a), material secado en horno solar (b), material molido (c) y material tamizado a 40-60 mesh (d).....	11
Figura 6. Crecimiento de altura total y cantidad de rebortes por hectárea cada 3 meses de edad para 3 especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía, con diferente propagación y deferentes edades en Costa Rica.....	17
Figura 7. Relación entre producción de biomasa seca y contenido de humedad para tres especies de pasto en condiciones de corta rotación para uso energético con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.	20
Figura 8. Comportamiento del poder calórico para tres especies de pastos en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.....	22
Figura 9. Comportamiento de extractivos presentes en tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.....	28
Figura 10. Relación entre varianzas (valores eigen) para los componentes 1 y 2 del análisis multivariado para los componentes principales de 3 distintas cosechas, 2 tipos de propagación y 3 especies de pasto en Costa Rica.....	30
Figura 11. Relación entre puntuaciones del componente principal 1 con las diferentes variables para 3 distintas cosechas, 3 especies de pasto y 2 tipos de propagación.	32

1. INTRODUCCIÓN

La alta demanda mundial de combustibles fósiles ha dado lugar a problemas de seguridad energética y aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales han provocado el calentamiento global, degradación del ecosistema, y cambio climático global; aunado a esto y se puede decir que la razón más importante, es debido a la inestabilidad de precios del petróleo crudo y el gas natural (Na et al., 2014; Hood et al., 2013; Kim et al., 2013; Liu et al., 2012 y Guretzky et al., 2011). Esto ha provocado una estimulación en la investigación para evaluar las fuentes de energía alternativa, que sea sostenible, más limpia y ambientalmente neutral (Hood et al., 2013 y Na et al., 2014).

Entre las energías alternativas, está la bioenergía obtenida a partir de material vegetal renovable que incluye desde cultivos energéticos, residuos forestales, residuos agrícolas, y silvicultura (Feltus y Vandenbrink, 2012 y Offermann et al., 2011). López-Bellido y López-Bellido (2014), indican que la bioenergía es la energía química almacenada en la materia orgánica, que puede convertirse directamente o indirectamente en fuentes de energía útiles por procesos biológicos, mecánicos o termoquímicos para utilizarse en calefacción, electricidad y combustible, así como productos derivados. Además, la bioenergía se acerca a la neutralidad del carbono de la biomasa, ya que este carbono es liberado en la combustión de la misma para ser absorbido por la biomasa creciente, lo que la vuelve una opción eficiente para la mitigación del cambio climático (Koponen y Soimakallio, 2015).

Existen dos enfoques para la producción de biomasa a partir de cultivos, uno corresponde a plantaciones dendroenergéticas, que son cultivos forestales establecidos a altas densidades para maximizar biomasa por unidad de área (Mola-Yudego et al., 2015), y los cultivos anuales y perennes, los cuales corresponden a cultivados agrícolas para la producción de energía (El Kasmioui y Ceulemans, 2013) y que pueden persistir durante varios años (Hood et al., 2013). De acuerdo a Jungers et al. (2015), estas materias primas bioenergéticas tienen una serie de beneficios ambientales como por ejemplo la retención de carbono y una reducción en la contaminación por nitrógeno.

Ehret et al. (2015) y Dragoni et al. (2015), afirman que la producción de materia prima bioenergética perenne se destaca sobre los cultivos anuales por su capacidad para producir grandes rendimientos de biomasa con un uso más eficiente de los insumos y que proporcionan cosechas anuales o múltiples por año que al mismo tiempo provocan un secuestro de carbono en las raíces, tallos, hojas y el suelo.

Dicha afirmación sucede debido a que corresponden a cultivos con fotosíntesis C₃ (tres carbonos) y C₄ (cuatro carbonos) (Wang y Wang, 2012; Wang y Paterson, 2013); donde los C₃ son los que poseen sólo una enzima carboxilasa que fija y reduce el CO₂, denominada Ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa y que únicamente utiliza el Ciclo de Calvin para dicha fijación (Wang y Wang, 2012; Wang y Paterson, 2013); mientras que los C₄ tienen dos enzimas, la primera es llamada fosfoenolpirúvico carboxilasa que en el proceso se encarga de reincorporar el CO₂ al Ciclo de Calvin aumentando la concentración de CO₂, junto con la segunda enzima denominada Ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa, las cuales siguen enlazando con compuestos de carbono (Wang y Wang, 2012; Wang y Paterson, 2013); ambos tipos de cultivo sintetizan el CO₂ en azúcares y más adelante sirven para alimentar procesos celulares de las plantas (Wang y Wang, 2012; Wang y Paterson, 2013), que al mismo tiempo influyen en la producción de biomasa en las plantas.

Se estima que cerca de 100 Mg ha⁻¹, promedio en el mundo, de biomasa seca corresponde a numerosas gramíneas tropicales con ruta C₄, mientras que para los cultivos C₃ apenas abarcan aproximadamente 50 Mg ha⁻¹ (Sage y Sage, 2012); además, hay un especial interés en los cultivos perennes, como las especies de pastos del género *Pennisetum* y la especie *Arundo donax* debido a que son establecidos en suelos marginales con una excelente producción de biomasa lignocelulósica y ello evita la competencia del biocombustible frente a tierras agrícolas de primera para la obtención de alimentos para el hombre (Stoof et al., 2015, Agostini et al., 2015 y Fedenko et al., 2013).

Al mismo tiempo, los cultivos perennes para la producción de bioenergía ofrecen beneficios ambientales al suelo, agua y vida silvestre (Pennington, 2014). Por ejemplo una de las principales ventajas de estos cultivos es que pueden rebrotar por su sistema de raíces cada año o cada vez que sea cosechada y por tanto no se debe hacer resiembra; esto ayuda a crear una cubierta en el suelo y generalmente necesitan menos fertilización (Pennington,

2014). También, de acuerdo a un estudio realizado por Anguiano et al. (2013) en México, los cultivos perennes al tener una ruta fotosintética C₄ o C₃, tiene una mayor capacidad de integrar el gas en la materia orgánica de las plantas y por tanto en la mitigación del calentamiento global.

Sin embargo, cuando se elige una especie con fines bioenergéticos, es importante estudiar diferentes características de la especie o del cultivo, como aspectos relacionados a rendimiento, consumo de energía para la producción, costos, contenidos mínimos de contaminantes, requerimiento de nutrientes, entre otros (Pérez-Cruzado et al., 2011). También se debe conocer la calidad de la biomasa, contenido de humedad, composición química y energética del material, capacidad de producción, entre otras (Bonner et al., 2014).

Por ejemplo, Gamble et al. (2015) estudió la especie *Panicum virgatum* y policultivos nativos en Minnesota, Estados Unidos, y se orientó en determinar la calidad energética y cantidad de biomasa con respecto al momento de la cosecha, con diferentes ubicaciones y temporadas de cultivo. Dichos autores encontraron que el rendimiento de la biomasa varió considerablemente por ubicación y año, con rangos de 0,7 a 11,7 Mg ha⁻¹. Así mismo señalan la importancia de conocer la calidad de la biomasa, extracción de nutrientes en las cosechas y la época de cosecha, pues esto va a influir directamente en los costos económicos de reemplazar los minerales exportados y los cambios en los ingresos del rendimiento de la biomasa a través del tiempo.

Monti y Zegada-Lizarazu (2015) y Dragoni et al. (2015) explican que aunque *Arundo donax* presenta un potencial de materia prima energética en climas mediterráneos, pues tiene altos rendimientos, adaptabilidad a suelos marginales y un impacto ambiental positivo, puede ser usado en climas tropicales. Corno et al. (2014), indica que la especie de *Arundo donax* puede aportar 37,7 Mg ha⁻¹ por cosecha de biomasa seca y alcanza en promedio 338 GJ ha⁻¹ de energía producida en climas templados. En tanto que especies del género *Pennisetum* también son considerados muy atractivos para establecer plantaciones energéticas en climas tropicales (Gurrola et al., 2016). Videira et al. (2013) en una investigación en Brasil, menciona que los géneros *Pennisetum* al ser plantas C₄, tienen alta eficiencia para convertir la luz en energía conservada en la biomasa y en el uso de

nitrógeno; estas pueden acumular más de 40 Mg ha⁻¹ de materia seca por año en suelos con poca fertilidad. Anderson et al. (2008), explica que el *Pennisetum purpureum*, es un cultivo muy importante en zonas tropicales húmedas y subtropicales, que tiene un potencial de producir biomasa seca de 70 y 85 Mg ha⁻¹ por año y que puede llegar a crecer hasta a 7 m de altura en condiciones óptimas y con fertilización.

En Centroamérica, en los últimos años, ha tomado atención las especies perennes para la producción de biomasa agrícola, como *Arundo donax*, *Saccharum spontaneum*, y forestal como *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* principalmente, enfocados a cultivos energéticos enfocados a la generación de electricidad y la caña que funciona para electricidad y producción de etanol (Cutz et al., 2013). Por otro lado, Costa Rica actualmente ha desarrollado estudios para especies forestales de reforestación (Moya y Tenorio, 2013), y para residuos de especies perennes con fines energéticos entre ellas *Gynerium sagittatum*, *Phyllostachys aurea*, *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Sorghum bicolor* (Tenorio et al., 2015 a - b).

Actualmente en Costa Rica, existen la empresa azucarera El Viejo que está plantando especies agrícolas y forestales para producir energía de consumo propio como *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum*, *Leucaena sp*, *Cassia sp* y *Gliricidia sepium* con rendimiento de 50 Mg ha⁻¹ a los 19 meses de materia fresca (Ingenio El Viejo S.A, 2011). Otra empresa que adoptó esta misma estrategia es Hacienda el Pelón de la Bajura que trabaja con plantaciones de *Pennisetum purpureum* con un rendimiento anual de aproximadamente 200 Mg ha⁻¹ (Guevara, 2015). Los resultados en la producción de estos cultivos muestran que pueden tener más producción que los que se obtienen con plantaciones energéticas con madera pero extraen más elementos del suelo haciendo que se deba poner más atención a la sustentabilidad del sitio.

No obstante, los anteriores estudios están basados en evaluaciones puntuales de la biomasa y no ensayos establecidos para conocer el verdadero potencial y caracterización energética completa de las especies agroenergéticas en diferentes periodos de cosecha. Por lo que el presente proyecto tiene como objetivo evaluar la producción en biomasa, el contenido de humedad, las propiedades energéticas y químicas del primer, segundo y tercer ciclo de corta para tres especies de pastos (*Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y

Pennisetum purpureum x Pennisetum glaucum) de una plantación agroenergética en condiciones de clima tropical húmedo en Costa Rica. Esto con el fin de brindar una o varias especies de pastos con alto potencial energético para la producción a gran escala de combustibles más sostenibles.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del ensayo experimental de plantación bioenergética

Los ensayos bioenergéticos se establecieron en un área de 0,125 hectáreas (Figura 2) en la empresa Agrep Forestal S.A., San Carlos, Alajuela, Costa Rica (10° 27' 27,0" N, 84° 25' 35,2"O). La descripción de precipitaciones acumuladas y temperatura promedio anual del sitio donde crece la plantación energética durante la época que estuvieron plantadas fue de 753 mm y 26 °C en el 2014, 3125 mm y 25 °C en el 2015 y 933 mm y 24 °C en el 2016. Los ensayos consistieron de tres especies, específicamente pastos-agrícolas (*Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum x Pennisetum glaucum*).

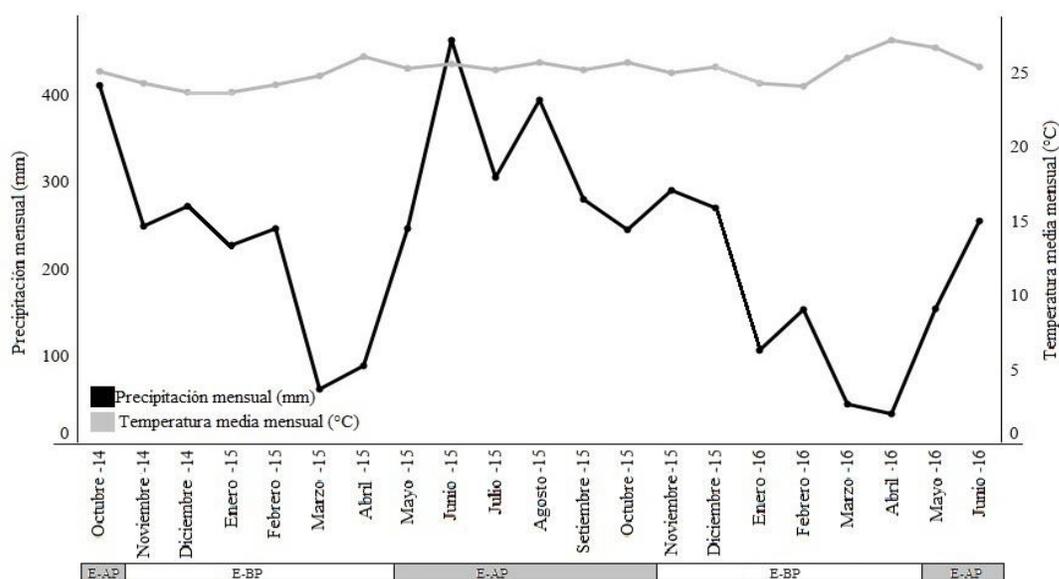


Figura 1. Valores y variación de la precipitaciones y temperatura promedio mensual de octubre de 2014 a junio de 2016 en la estación Finca Tiburcia próxima a 16 km plantación agroenergética de pastos.

Legenda: E-AP: época de alta precipitación y E-BP: época de baja precipitación.

Para la elección de estos cultivos, se tomó en cuenta su adaptabilidad al clima, condiciones edáficas y la disponibilidad del material. En el cuadro 1 se detalló la procedencia, espaciamentos utilizados y tipo de propagación para cada especie. Es importante mencionar que todos los cultivos fueron plantados a una densidad de 10 mil plantas por hectárea, cada parcela contó con un área de 50 m², por lo que los ensayos establecidos con plantas contaron con 5 m ancho por 10 m de largo.

Cuadro 1. Descripción de ensayo experimental agroenergético para tres especies de pastos en Costa Rica.

Especie	Nombre común	Procedencia	Espaciamiento	Reproducción	Propagación
<i>Arundo donax</i>	Arundo	AgriBio	1m x 1m	Sexual	Plántula
<i>Pennisetum purpureum</i>	King grass	Río San Carlos	1m x Fila	Asexual	Tallo
<i>Pennisetum purpureum</i>	King grass	Río San Carlos	1m x 1m	Sexual	Plántula
<i>Pennisetum purpureum x Pennisetum glaucum.</i>	Maralfalfa	Finca San Pedro	1m x Fila	Asexual	Tallo

2.2. Descripción del suelo

El ensayo experimental fue establecido en un área de 0,125 ha, con topografía plana y donde anteriormente se presentaba un cultivo de *Saccharum officinarum*. El suelo presenta una textura arcillosa y el análisis químico-nutricional estableció una acidez de 0,63 cmol (+) L⁻¹, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de 5,77 cmol (+) L⁻¹, un pH de 4,8 y una Saturación de Acidez (SA) de 11%.

2.3. Diseño experimental

Se realizó un diseño completamente aleatorio, con diferente número de repeticiones, ubicadas dentro del sitio (Figura 2), donde se evaluaron tres tratamientos que consistieron en el tipo de propagación por tallo y plántula (cuadro 1), la distribución por tres tipos de especie de pasto (cuadro 2) y tres tiempos de cosecha cada seis meses (dos en época de baja precipitación y una en época de alta precipitación). Donde la especie *Arundo donax* contó

con 9 parcelas de estudio, *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* tuvo 4 parcelas y el *Pennisetum purpureum* contó con 8 parcelas en su propagación por plántula y 4 parcelas en su propagación por tallo; para un total de 25 parcelas.

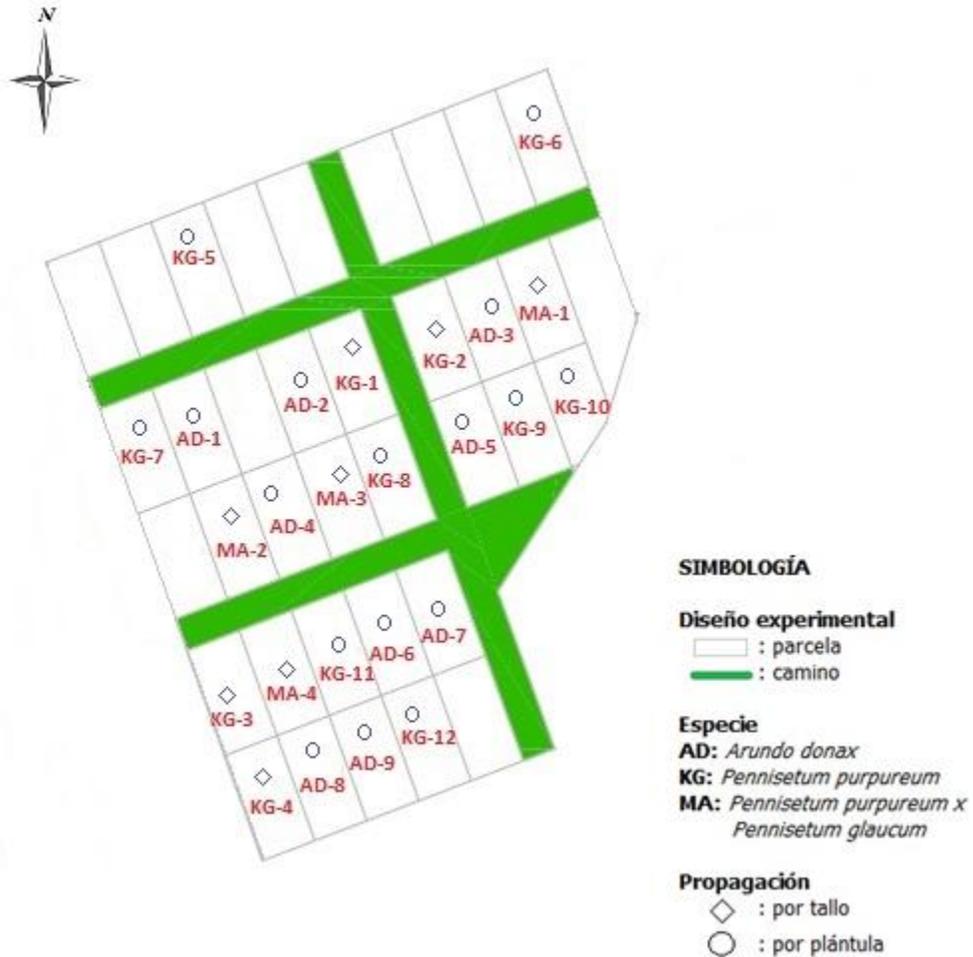


Figura 2. Diseño experimental de plantación agroenergética para tres especies de pastos en Alajuela, Costa Rica.

2.4. Muestreo y cosecha de las plantaciones energéticas

Al finalizar el mes de octubre (época de alta precipitación) del año 2014, se establecieron las parcelas agroenergéticas (Figura 3). Dentro de cada una de las parcelas, se marcaron con estacas subparcelas permanentes de medición; donde *A. donax* presentaba 15 plántulas, *P. purpureum* propagada sexualmente con 12 plántulas, *P. purpureum* propagada asexualmente con 3 filas y *P. purpureum* x *P. glaucum* con 3 filas, para recolectar información cada tres meses del crecimiento; específicamente se tomaron datos de altura total (m) y número de rebrotes por especie.

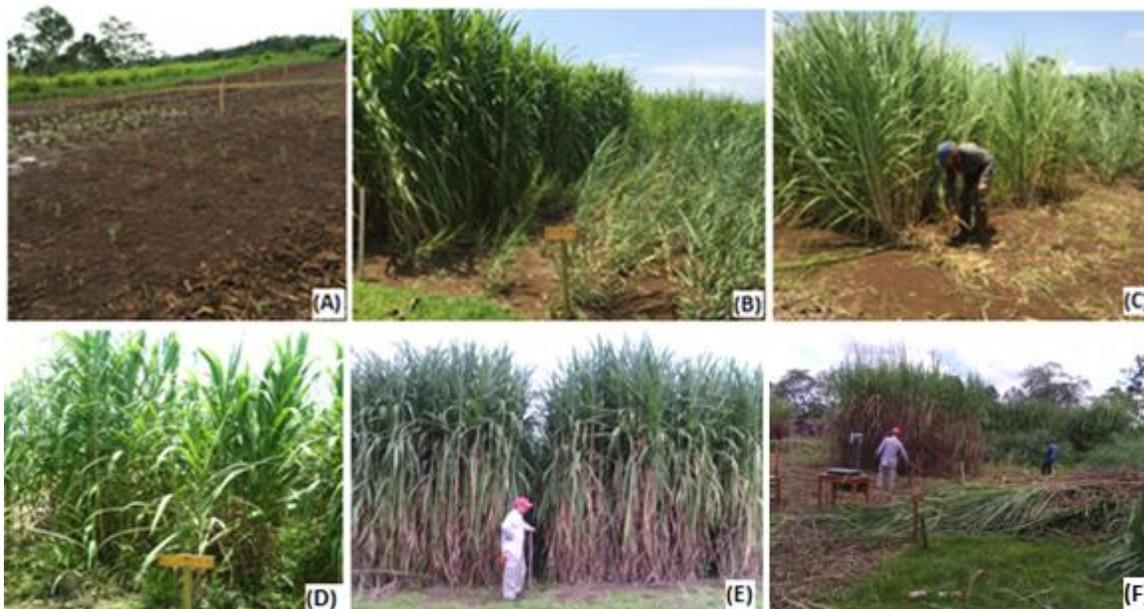


Figura 3. Ensayo de cultivos agroenergéticos a partir de tres especies de pastos en San Carlos, Costa Rica. Establecimiento inicial del ensayo (A), estado de la plantación al tiempo de I cosecha de *Pennisetum purpureum* y *Arundo donax* (B), I cosecha manual de *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* (C), estado de plantación a los 3 meses de edad para II cosecha *Pennisetum purpureum* (D), estado de plantación al tiempo de II cosecha de *Pennisetum purpureum* (E) y II cosecha manual de *Pennisetum purpureum* (F).

La altura y la cantidad de rebrotes fueron diferentes para el tipo de propagación. En el caso de la propagación asexual (Figura 4a) el conteo de rebrotes se tomaba por fila como si fuera una sola planta y en el caso de la altura total, de esa fila muestreada, se sacaba la altura total de la hoja más alta presente en toda la fila. Por otra parte, la propagación sexual (Figura

4b), donde se tomaba cada una de las plántulas y se contaba cada uno de los rebrotes que salían de la base de ellas y se medía la altura total donde estuviera la hoja más alta. Además, para llevar el control de la ubicación de las plantas o tallos, las mediciones se comenzaban al final de cada subparcela y los datos se tomaban de derecha a izquierda siempre (por cada fila), hasta llegar al inicio de la subparcela donde estaba rotulada.

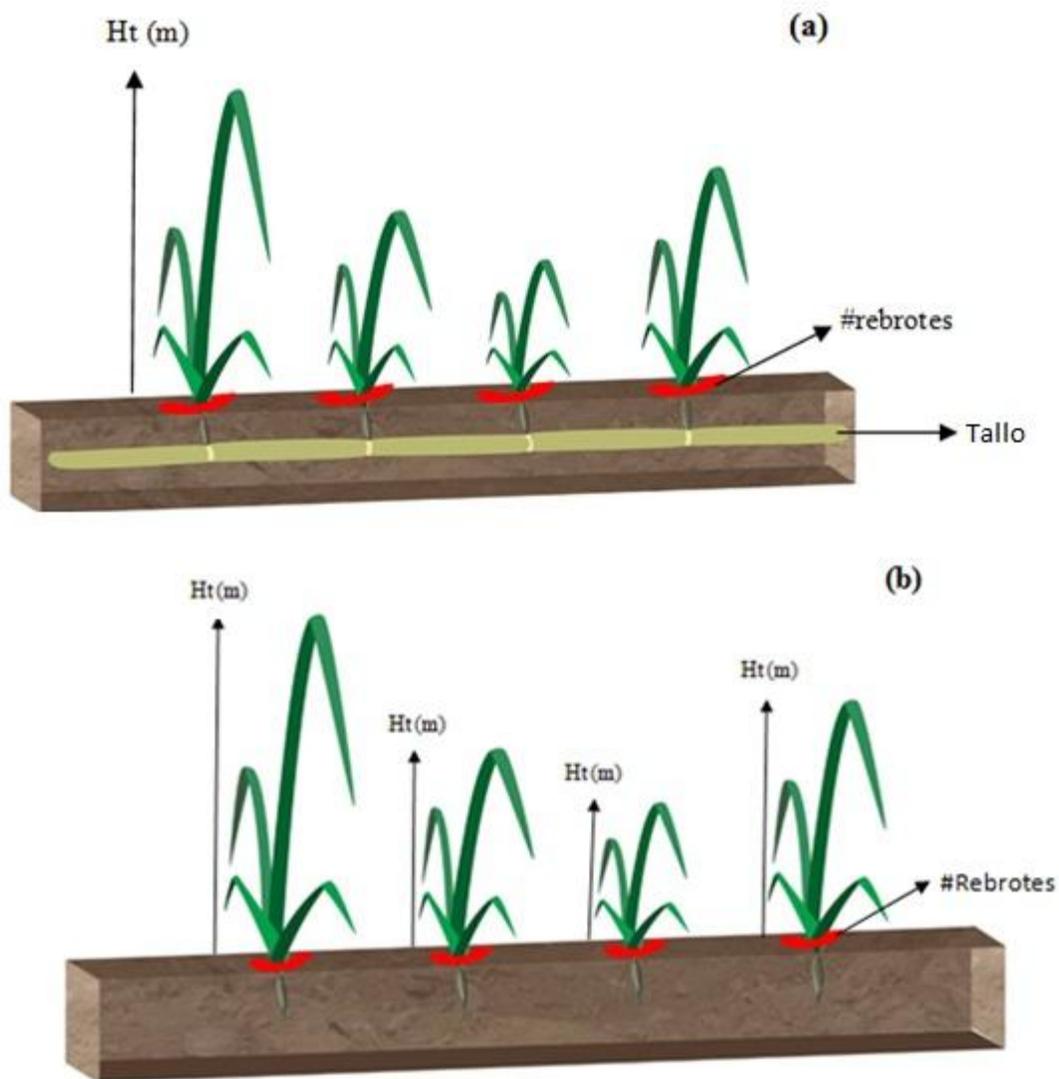


Figura 4. Descripción de muestreo de crecimiento en altura total (Ht) en metros y cantidad de rebrotes (# rebrotes) para las tres especies de pasto por tipo de propagación. Propagación por tallo (a) y propagación por plántula (b).

A parte del monitoreo en el crecimiento por especie realizado cada 3 meses, se realizaron cada seis meses las cosechas; la primer cosecha fue en el mes de abril del 2015, la segunda cosecha en octubre del 2015 y la tercer cosecha en abril del 2016, los cuales corresponden a la edad de 6, 12 y 18 meses. En cada una de los cultivos se cortó el material alrededor de la subparcela y el material contenido en la subparcela; el mismo fue pesado en una balanza digital y de este se tomó aleatoriamente siete muestras o rebrotes de aproximadamente 2 kg cada uno, que han sido debidamente etiquetados con el código de la subparcela y guardados en bolsas plásticas para mantener la humedad.

2.5. Procesamiento del material a cosechar

Las muestras fueron astilladas en una picadora de pasto, para obtener una partícula más pequeña (Figura 5a); de este se tomaron cinco repeticiones por muestra de 44 ± 1 g para determinar el peso verde de cada especie de pasto analizada, para luego determinar el contenido de humedad como se detalla más adelante. Extraídas estas repeticiones, el material se colocó en bandejas para ser secado en el horno solar por una semana hasta peso constante, para evitar que el material se descomponga. Después, el material fue molido y empacado en bolsas de papel para mantener el contenido de humedad seco. Este material molido se tamizó en mallas de 60 mesh hasta obtener partículas de 0,25 mm y luego se realizaron análisis energéticos y químicos que se explican posteriormente al cero por ciento en contenido de humedad.



Figura 5. Procesado del material cosechado para pruebas energéticas y químicas. Astillado del pasto (a), material secado en horno solar (b), material molido (c) y material tamizado a 40-60 mesh (d).

2.6. Cálculo de la producción de biomasa seca aérea

A partir del peso de la biomasa total húmeda (kg) en cada parcela de medición, su respectiva área efectiva (m^2) y el contenido de humedad (%) por especie, se calculó la producción de biomasa total seca ($kg\ m^{-2}$) por cosecha; luego, ésta se proyectó en toneladas y a una superficie de una hectárea como se observa en la ecuación 1:

$$\text{Producción (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\left(\text{Peso biomasa verde} * \left(1 - \frac{\text{Contenido de humedad}}{100}\right)\right)}{\text{área de la parcela}} * 10 \quad (1)$$

10= factor de conversión de kg m⁻² a Mg ha⁻¹ para la producción de biomasa seca.

2.7. Cantidad de rebrotes por hectárea

Como se indicó cada tres meses se hizo un conteo de rebrotes por plántula y por tallo, entonces se calculó el promedio de rebrotes por área efectiva de la parcela (m²) en cada momento de medición (cada tres meses) para cada una tipo de cultivo, valor que se proyectó a una hectárea (Ecuación 2).

$$\text{Cantidad de rebrotes por hectárea} = \frac{\text{promedio de rebrotes}}{\text{área de la parcela (m}^2\text{)}} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} \quad (2)$$

2.8. Determinación de propiedades energéticas

Contenido de Humedad (CH%): se realizó a partir de la norma ASTM D 1762-84 (ASTM, 2013b), donde se tomaron cinco repeticiones (cada una de 44 ± 1 g) por muestra del material astillado de cada parcela de tipo de especie y tipo de propagación. Se pesaron con una balanza con precisión de ± 0,01 g y se colocaron a 105°C de temperatura en el horno por 24 horas para volver a pesar la muestra en estado seco. Dicha humedad se calculó con la ecuación 3:

$$\text{CH (\%)} = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} * 100 \quad (3)$$

Contenido de Cenizas (C%): Las muestras fueron molidas para obtener un material granulado (menor a 2 mm) y se tamizó en una malla 40-60 mesh. El material entre 40 y 60 mesh se secó a un contenido de humedad al 0 %; se colocó 1,5 g en crisoles de porcelana con 3 repeticiones por muestra y se llevó a cabo el procedimiento que indica la norma ASTM D 1102-84 (ASTM, 2013 a). El contenido de cenizas se determinó con la ecuación 4:

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{\text{Peso cenizas}}{\text{Peso muestra secada al horno a } 105^{\circ}\text{C}} * 100 \quad (4)$$

Poder calorífico máximo (PC): a las muestras tamizadas y con un contenido de humedad al 0 %, se extrajeron tres repeticiones por muestra con un peso de 0,5 g que se colocó en cápsulas de hierro. Seguidamente, las cápsulas de hierro fueron sometidas a una serie de pruebas en la bomba calorimétrica de Parr's, que consistió en estimar el poder calorífico de acuerdo a la norma ASTM D-5865. Cada repetición se comparó con un patrón de ácido benzoico (C₆H₅COOH), y con los datos registrados por la bomba calorimétrica se procedió a calcular el poder calorífico con la ecuación 5:

$$\text{PC} = \left(\text{PCAB} * \frac{\text{Ti} - \text{Tf}}{\text{masa muestra}} \right) * 4,184 \quad (5)$$

Donde,

PC= Poder calorífico máximo kJ kg⁻¹

PCAB= Poder Calorífico Ácido Benzoico en Kcal kg⁻¹

Ti= Temperatura inicial (°C)

Tf= Temperatura final (°C)

4,184= Factor de conversión de Kcal a KJ

Materia Volátil (%): al igual que el porcentaje de cenizas, el material secado, molido, tamizado y secado a un contenido de humedad aproximado al 0 %; se colocó con una proporción de 1 g en crisoles de porcelana con 3 repeticiones por muestra y se determinó el contenido de materia volátil con la norma ASTM D 1762-84 (ASTM, 2013 c). La materia volátil se calculará con la ecuación 6:

$$\text{Materia Volátil (\%)} = \frac{\text{Peso muestra seca al horno } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso Cenizas}}{\text{Peso muestra secada al horno } 105^{\circ}\text{C}} * 100 \quad (6)$$

2.9. Determinación de propiedades químicas

Extractivos solubles en Etanol-Tolueno

Con las muestras tamizadas, se extrajeron tres repeticiones por muestra con un peso de $1,5 \pm 0,1$ g que fueron colocadas sobre filtros; los cuales se pusieron en imanes ubicados en el equipo Soxhlet para determinar el extractivo, este procedimiento se basó con la norma ASTM D-1107. El porcentaje de extractivos se calculó con la ecuación 7:

$$\text{Extractivos (\%)} = \frac{\text{Peso muestra tamizada} - \text{Peso después de la extracción}}{\text{Peso muestra tamizada}} * 100 \quad (7)$$

Extractivos solubles en agua fría y agua caliente

Se tomaron tres repeticiones por muestra tamizada de $2 \pm 0,1$ g cada una y se determinaron con la norma ASTM D-1110, posterior a esto se calcularon los extractivos con la ecuación 7.

2.10. Determinación de macro y micro elementos, contenido de carbono (C), nitrógeno (N) y la relación C:N de cada muestra tamizada, se tomaron 3 repeticiones de $3 \pm 0,1$ g cada una por muestra; estas fueron sometidas a un análisis elemental, donde se determinaron cantidades y porcentajes de micro y macro nutrimentos (Fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Azufre (S), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn)) presentes en el material, así como el porcentaje de carbono, nitrógeno y su relación respecto al peso. Este es un método automático, donde las repeticiones han sido sometidas en un Elementar Analysen System, Vario Macro Cube Model y se basa en la oxidación de los elementos por medio de una combustión seca total del material a una temperatura de 950°C en atmósfera de oxígeno puro que convierte los elementos en gases simples.

2.11. Análisis Estadístico

Se realizó un análisis descriptivo donde se calculó la media y coeficiente de variación (desviación estándar * 100 / promedio) para la producción de biomasa aérea, propiedades energéticas y propiedades químicas para cada especie, propagación y cosecha.

Luego, se aplicó un análisis de varianzas (ANDEVA) con una significancia estadística de $p < 0,05$ para determinar la variabilidad en la producción de biomasa y las propiedades antes mencionadas; antes se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homocedasticidad de varianzas. Dicho análisis se desarrolló con el modelo que se presenta en la ecuación 9 y se utilizaron los programas estadísticos Infostat y Minitab 17. Además, se aplicó una prueba de Tukey para determinar si existen diferencias significativas entre medias de estos parámetros entre las tres especies, propagación y cosechas con 95% de confianza.

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (9)$$

donde: Y_{ij} es la variable de respuesta, μ es la media de los valores, A_i es el efecto de la propagación por plántula y tallo por especie, B_j es la especie AB_{ij} las interacciones entre propagación y especie y ε_{ij} el error experimental.

Como se va a generar información a través del tiempo, que corresponde al efecto de las cosechas y el crecimiento de las especies en meses, se realizó un análisis multivariado por series de tiempo, para estudiar los patrones o cambios que se puedan dar con las distintas variables; para ello se utilizó el software Minitab17.

También, se realizó un análisis multivariado específicamente de componentes principales, para obtener las relaciones y proporción de explicación entre las variables dependientes las propiedades químicas y energéticas, producción de biomasa y las variables independientes que corresponden al tipo de propagación.

3. RESULTADOS

3.1. Variación de rebrotes, altura total y producción de biomasa seca de tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía.

La altura total varió de 0,49 m a 1,64 m a los 3 meses, de 1,82 m a 3,16 m a los 6 meses, 2,21 m a 3,48 m a los 9 meses, 2,63 m a 4,48 m a los 12 meses, 1,24 m a 2,80 m a los 15 meses y 2,76 m a 2,82 m a los 18 meses. La cantidad de rebrotes por hectárea varió de 77 756 N ha⁻¹ a 269 061 N ha⁻¹ a los 3 meses, 136 769 N ha⁻¹ a 295 543 N ha⁻¹ a los 6 meses, 131 387 N ha⁻¹ a 291 791 N ha⁻¹ a los 9 meses, 111 523 N ha⁻¹ a 253 699 N ha⁻¹ a los 12 meses, 131 848 N ha⁻¹ a 255 337 N ha⁻¹ a los 15 meses y 90 138 N ha⁻¹ a 238 151 N ha⁻¹ a los 18 meses (Figura 6).

En la figura 6, se observa que para las tres especies agrícolas en un sistema de plantación energética, la altura total (m) fue creciente, exceptuando en *P. purpureum* x *P. glaucum* propagada por tallo, pues de los 15 meses a 18 meses, muestra una distribución constante (Figura 6 d). Por otro lado, *A. donax* fue la especie con menor crecimiento en todas las mediciones (Figura 6 a). Por el contrario, la especie con mayor crecimiento fue *P. purpureum* propagado por plántula a los 3 meses y 6 meses, luego en las edades de 9, 12, 15 y 18 meses *P. purpureum* x *P. glaucum* alcanza las mayores alturas (Figura 6 d). Es importante destacar que a pesar de lo explicado anteriormente, sí se nota un crecimiento de la cosecha I a la cosecha II, y vuelve a decrecer en la cosecha III para todas las especies.

Con respecto a la cantidad de rebrotes por hectárea (Figura 6), *A. donax* y *P. purpureum* x *P. glaucum* aumentan de los 3 meses a los 6 meses, no así para *P. purpureum* que muestra una disminución entre estos dos periodos. La especie con mayor cantidad de rebrotes por hectárea se presentó en *P. purpureum* x *P. glaucum* en todas las edades evaluadas (Figura 6 d). La menor cantidad de rebrotes por hectárea para la primer cosecha a los 3 meses de edad la obtuvo *A. donax* (Figura 6 a); luego de los 6 meses de edad en adelante es *P. purpureum* propagada por plántula presentaron las densidades más bajas (Figura 6 b). Un aspecto importante de destacar, en relación a la cantidad de rebrotes, es que en la especie *P.*

purpureum propagada por plántula y por tallo se observa un descenso en la cantidad de rebrotes con la edad (Figura 6 b y Figura 6 c), a diferencia de *A. donax* que la cantidad de rebrotes aumenta con la edad (Figura 6 a).

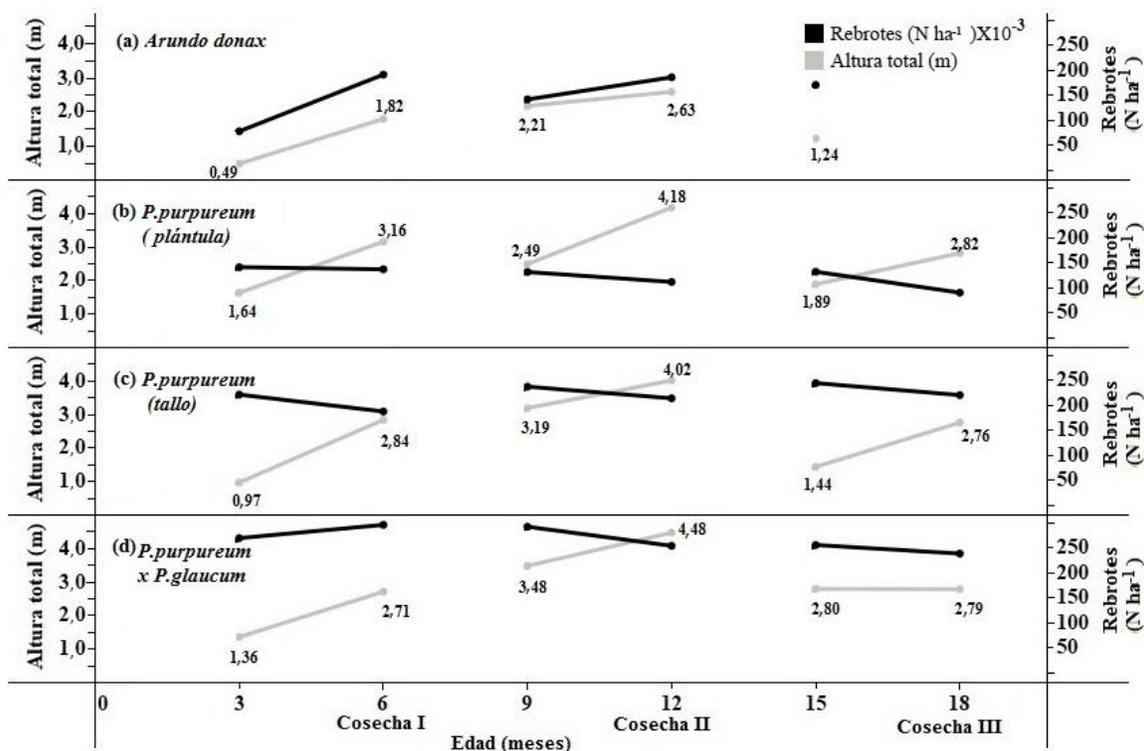


Figura 6. Crecimiento de altura total y cantidad de rebrotes por hectárea cada 3 meses de edad para 3 especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía, con diferente propagación y diferentes edades en Costa Rica.

En la evaluación de la mortalidad para las distintas especies agrícolas en plantación energética, hubo una variación de 5,56 % a 8,33 % en la cosecha I, 8,33 % a 11,11 % en la cosecha II y 5,95 % a 8,33 % en la cosecha III (Cuadro 2).

P. purpureum x *P. glaucum* tuvo la mayor mortalidad en las tres cosechas; *A. donax* mostró los valores más bajos en la I y II cosecha; *P. purpureum* propagado por tallo no presentó mortalidad en ninguna de las tres cosechas y *P. purpureum* por plántula tampoco mostró mortalidad en la segunda cosecha.

Con respecto al tipo de propagación sexual y asexual por hectárea en el momento de la cosecha, se obtuvo que la cantidad de plántulas variaron poco entre las diferentes cosechas realizadas (Cuadro 2). *A. donax* fue la especie con mayor número de plantas por hectárea en la cosecha I, pero después *P. purpureum* propagada por plántula presentó la mayor cantidad de plántulas en la cosecha I y III. En la propagación por tallo, las menores cantidades de tallos por hectárea se presentaron en *P. purpureum* x *P. glaucum* en las 3 cosechas. Finalmente *P. purpureum* presentó en todas las cosechas la misma cantidad de plántulas por hectárea (Cuadro 2).

Cuadro 2. Crecimiento y mortalidad para tres especies de pastos en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

Especie	Cosecha	Propagación	Mortalidad de plantas y tallos (%)	Cantidad de plantas.ha ⁻¹ y tallos.ha ⁻¹
<i>Arundo donax</i>	I	Plántula	5,56	9 665
	II	Plántula	8,33	9 585
	III		-	-
<i>P.purpureum</i>	I	Plántula	5,95	9 646
	II	Plántula	0,00	10 844
	III	Plántula	5,95	9 641
<i>P.purpureum</i>	I	Tallo	0,00	4 929
	II	Tallo	0,00	4 929
	III	Tallo	0,00	4 929
<i>P.purpureum</i> x <i>P.glaucum</i>	I	Tallo	8,33	4 359
	II	Tallo	11,11	4 122
	III	Tallo	8,33	4 359

Los datos de producción de biomasa variaron de 2,52 Mg ha⁻¹ a 24,44 Mg ha⁻¹ en la cosecha I, 6,40 Mg ha⁻¹ a 39,25 Mg ha⁻¹ en la cosecha II y 11,39 Mg ha⁻¹ a 24,97 Mg ha⁻¹ en la cosecha III (Figura 7 a - d). Fue observado que la mayor producción de biomasa se presentó en la cosecha II con producción superior a 35 Mg ha⁻¹ y que estas cifras corresponden a las especies propagadas por tallo (Figura 7 c - d). *A. donax* en las 3 cosechas obtuvo las producciones más bajas (Figura 7 a). Las mayores producciones fueron obtenidas por los géneros *Pennisetum* propagados por tallo (Figura 7 c y d) para las 3

cosechas con producciones sobre 20 Mg ha⁻¹. Además, se observó que *A. donax* aumenta la producción de la cosecha I a la cosecha III (Figura 7 a). *P. purpureum* propagada por plántula disminuyó la producción de la cosecha I a la cosecha III (Figura 7 b) y *P. purpureum* propagada por tallo (Figura 7 c) junto a *P. purpureum x P. glaucum* (Figura 7 d) aumentaron de la cosecha I a la cosecha II, pero decrecieron para la cosecha III.

No obstante, en el análisis de varianza ANDEVA realizado para establecer las diferencias significativas en la producción de las tres cosechas, especies y tipo de propagación (Cuadro 3) fue encontrado que no hubo diferencia significativa entre las cosechas, esto para las 3 especies; pero sí hubo diferencias significativas entre especies, donde *A. donax* (Figura 7 a), con relación a las especies del género *Pennisetum* (Figura 7 b - d), que fue estadísticamente diferente.

Por otra parte, en las figuras 7e - h, también se puede observar el comportamiento del contenido de humedad (CH). La variación del CH presentó rangos de 51,08 % a 66,94 % en la cosecha I, 55,21 % a 58,77 % cosecha II y 52,78 % a 67,59 % cosecha III (Figura 7 e - h). *P. purpureum x P. glaucum* (Figura 7h) y *P. purpureum* (Figura 7g) propagadas por tallo en la cosecha I y II presentaron el mayor CH. En el caso de *A. donax* (Figura 7 e) fue la especie que presentó el CH más bajo con respecto a las otras especies y para todas las cosechas, así mismo esta especie fue la única especie que presentó incremento el CH de la cosecha I a la cosecha II, pero luego decreció en la cosecha III. El resto de los cultivos energéticos tuvieron un crecimiento inverso al mencionado, aumentaron el valor de la propiedad con la II cosecha (Figura 7 e - h). Al igual que la producción de biomasa seca, en el CH no se encontraron diferencias significativas entre tipos de propagación y las diferentes cosechas (Cuadro 3), solamente hubo diferencia entre especies, donde *A. donax* fue diferente estadísticamente a las especies del género *Pennisetum* (Cuadro 3).

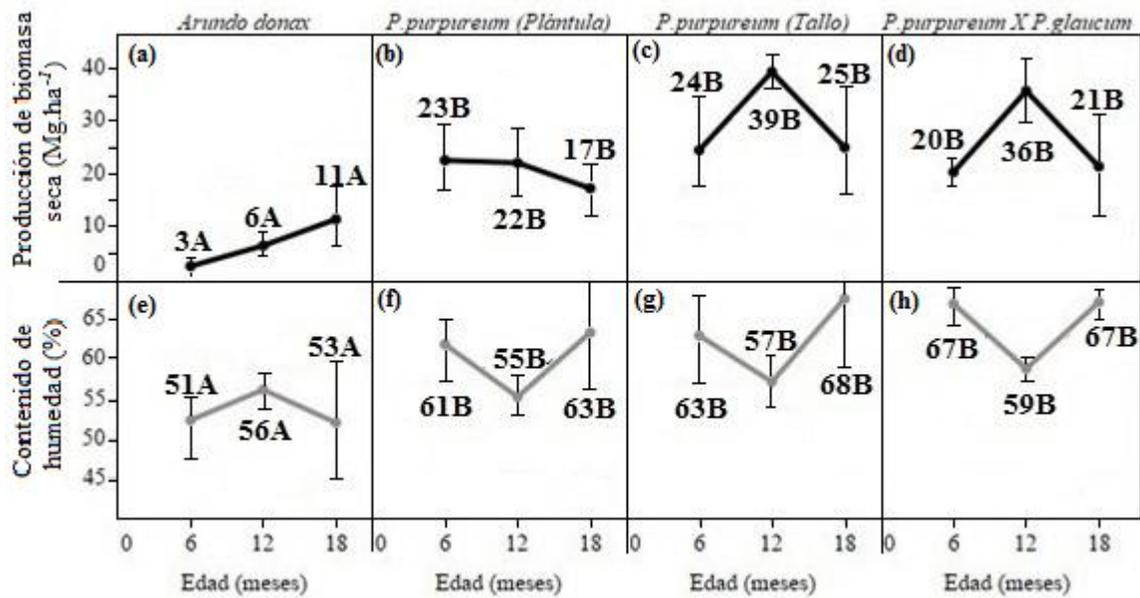


Figura 7. Relación entre producción de biomasa seca y contenido de humedad para tres especies de pasto en condiciones de corta rotación para uso energético con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

* Letras diferentes para cada parámetro representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Barras dentro del gráfico corresponden a la desviación estándar.

Cuadro 3. Análisis de ANDEVA para las variables rendimiento, físicas, energéticas, químicas y de extractivos para pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

Propiedades	Variable	F-valor		
		Especie	Propagación	Cosecha
Rendimiento	Producción biomasa seca (Mg ha ⁻¹)	12,81*	3,98 ^{ns}	2,7 ^{ns}
Físicas	Contenido de humedad (%)	7,61*	0,88 ^{ns}	2,75 ^{ns}
Energéticas	Poder calórico (kJ kg ⁻¹)	0,53 ^{ns}	1,17 ^{ns}	13,92*
	Cenizas (%)	0,5 ^{ns}	0,03 ^{ns}	1,42 ^{ns}
	Materia volátil (%)	3,06 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,19 ^{ns}
Químicas	Azufre (S) (%)	22,03*	0,11 ^{ns}	0,67 ^{ns}
	Calcio (Ca) (%)	51,39*	0,04 ^{ns}	14,25*
	Carbono (C) (%)	0,88 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,04 ^{ns}
	Fósforo (P) (%)	6,41*	0,13 ^{ns}	5,17*
	Magnesio (Mg) (%)	26,70*	0,98 ^{ns}	1,96 ^{ns}
	Nitrógeno (N) (%)	18,84*	0,01 ^{ns}	1,22 ^{ns}
	Potasio (K) (%)	1,94 ^{ns}	0,01 ^{ns}	6,68*
	Carbono/Nitrógeno (C/N) (%)	49,91*	0,91 ^{ns}	6,83 ^{ns}
	Cobre (Cu) (mg kg ⁻¹)	1,41 ^{ns}	0,03 ^{ns}	4,65 ^{ns}
	Hierro (Fe) (mg kg ⁻¹)	2,15 ^{ns}	0,81 ^{ns}	26,09*
	Manganeso (Mn) (mg kg ⁻¹)	11,90*	0,06 ^{ns}	3,65 ^{ns}
Extraíbles	Zinc (Zn) (mg kg ⁻¹)	1,35 ^{ns}	0,00 ^{ns}	2,63 ^{ns}
	Agua fría (%)	0,19 ^{ns}	0,13 ^{ns}	12,50*
	Agua caliente (%)	0,85 ^{ns}	0,09 ^{ns}	24,48*
	Etanol-Tolueno (%)	0,40 ^{ns}	0,07 ^{ns}	2,32 ^{ns}

*:Diferencias estadísticamente significativas, ns: No existen diferencias estadísticamente significativas; todo con un 95% de confianza.

3.2. Caracterización energética para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

En la figura 8 se muestra el comportamiento del poder calórico para las 3 cosechas, por tipo de propagación y por especie: la variabilidad fue de 16 517 kJ kg⁻¹ a 16 871 kJ kg⁻¹ en la cosecha I, de 17 363 kJ kg⁻¹ a 17 855 kJ kg⁻¹ en la cosecha II y 15 860 kJ kg⁻¹ a 16 956 kJ kg⁻¹ en la cosecha III. Los valores más altos en poder calórico, los obtuvieron las especies

propagadas por tallo: *P. purpureum* en la I y II cosecha (Figura 8c) y en *P. purpureum* x *P. glaucum* en la II cosecha (Figura 8d). Por otro lado, los valores más bajos se presentaron para la cosecha I y II en *P. purpureum* propagado por plántula (Figura 8b) y en el caso de la tercera cosecha fue *P. purpureum* x *P. glaucum* (Figura 8d). Otro aspecto importante de destacar es que en todas las especies en la cosecha II se alcanzan los datos significativamente más altos de poder calórico respecto a las cosechas I y III (Figura 8). Así mismo ANDEVA demostró que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos especie y tipo de propagación (Cuadro 3).

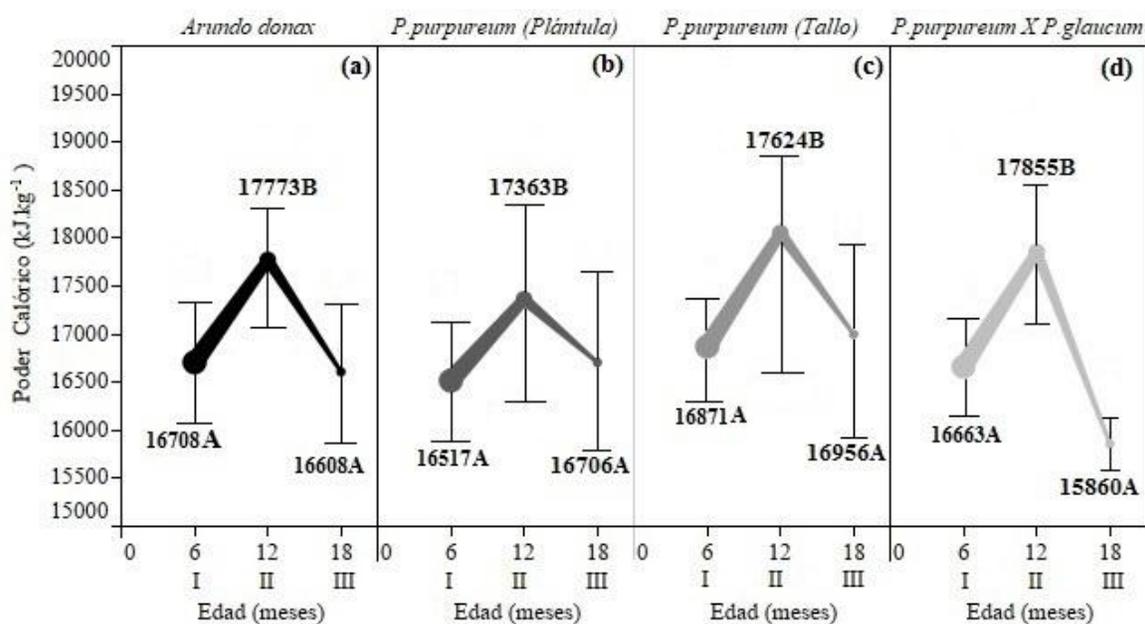


Figura 8. Comportamiento del poder calórico para tres especies de pastos en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

* Las letras diferentes en mayúscula representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Barras dentro del gráfico corresponden a la desviación estándar.

En relación al porcentaje de cenizas, fue encontrado que este componente varió de 6,31 % a 9,71 % en la I cosecha, de 5,99 % a 7,89 % en II cosecha y de 6,74 % a 8,43 % en la III cosecha (Cuadro 4). Además, se observó que los valores más altos se dieron para la especie *A. donax* en la cosecha III y para las especies del género *Pennisetum* en la cosecha I. Otro aspecto que se observa es que en todas las especies en la cosecha II se presentó el

porcentaje de cenizas más bajo (Cuadro 4). En tanto ANDEVA mostró que no existen diferencias significativas entre las especies o tipo de propagación (Cuadro 3).

Por otro lado, el porcentaje de materia volátil varió de 76,38 % a 80,54 % en I cosecha, de 78,54 % a 81,48 % en la II cosecha y de 76,21 % a 81,86 % en la III cosecha (Cuadro 4). *A. donax* mostró los datos más bajos para las tres cosechas y los valores más altos, por otra parte, se distribuyeron en las especies pertenecientes al género *Pennisetum*, *P. purpureum* propagado por tallo en la cosecha I, *P. purpureum* propagado por plántula en la cosecha II y *P. purpureum* x *P. glaucum* en la cosecha III fueron los más altos (Cuadro 4). Además, se obtuvo que en la cosecha II se tuvieron los valores máximos y en la cosecha III los valores mínimos se presentaron en *A. donax*, *P. purpureum* por plántula y por tallo. La especie *P. purpureum* x *P. glaucum* mostró el valor más alta en la cosecha III y la más baja en la cosecha I (Cuadro 4). No obstante, el porcentaje de material volátil tampoco presentó diferencias estadísticamente significativas los tratamientos de especie, propagación y cosecha (Cuadro 3).

Cuadro 4. Caracterización energética para tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

Especie	Cosecha	Cenizas (%)	Volátiles (%)
<i>Arundo donax</i>	I	6,31 ^A (21,35)	76,38 ^A (0,37)
	II	7,89 ^A (10,17)	78,54 ^A (0,41)
	III	8,05 ^A (11,31)	76,21 ^A (1,73)
<i>Pennisetum purpureum</i> (Plántula)	I	8,12 ^A (24,99)	80,02 ^A (4,62)
	II	6,14 ^A (12,25)	81,48 ^A (1,81)
	III	7,67 ^A (15,42)	77,22 ^A (1,45)
<i>Pennisetum purpureum</i> (Tallo)	I	9,71 ^A (20,80)	80,54 ^A (1,48)
	II	5,99 ^A (5,72)	81,31 ^A (1,86)
	III	6,74 ^A (15,53)	78,68 ^A (2,53)
<i>P. purpureum</i> x <i>P. glaucum</i>	I	8,93 ^A (13,64)	78,40 ^A (5,51)
	II	7,29 ^A (16,45)	79,36 ^A (1,80)
	III	8,43 ^A (25,78)	81,86 ^A (2,11)

*Valores entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación. * Las letras diferentes en letra mayúscula representan diferencias estadísticamente significativas (p<0,05)

3.3. Caracterización química de elementos para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

Como se observa en el cuadro 5, el S varió de 0,05 % a 0,31 % entre las diferentes cosechas; el Ca de 0,12 % a 0,35 %; el C de 43,46 % a 45,28 %; el P de 0,05 % a 0,12 %; el Mg de 0,15 % a 0,33 %; el N varió de 0,43 % a 1,59 %; el K de 0,29 % a 2,23 %; y el C/N de 28,68 a 118,86. Por otra parte, el Cu varió de 4,00 mg kg⁻¹ a 21,75 mg kg⁻¹ igualmente entre las diferentes cosechas; el Fe obtuvo variaciones de 92,75 mg kg⁻¹ a 663,50 mg kg⁻¹; el Mn de 69,00 mg kg⁻¹ a 242,83 mg kg⁻¹ y el Zn de 24,00 mg kg⁻¹ a 185,00 mg kg⁻¹ (Cuadro 5).

En el análisis químico por especie, el ANDEVA mostró que los elementos C (%), Cu (mg kg⁻¹) y Zn (mg kg⁻¹) no presentaron diferencias significativas; al contrario de S (%), Mg (%), N (%), C/N, Mn (mg kg⁻¹) que mostraron diferencias entre especie, K (%) y Fe (mg kg⁻¹) con diferencias entre cosecha y Ca (%) y P (%) con diferencias entre especie y cosecha (Cuadro 3).

A. donax fue diferente significativamente con las especies del género *Pennisetum* (cuadro 3) y presentó los valores máximos de S, Mg, N y Mn en comparación con los géneros *Pennisetum* en las tres cosechas y en la relación C/N las especies del género *Pennisetum* fueron las que mostraron los valores máximos para las tres cosechas (Cuadro 5).

Se observaron diferencias significativas entre cosechas para los elementos de K y Fe (Cuadro 3). *A. donax* de la cosecha I a la cosecha II aumentaron estos elementos y luego disminuyó para la cosecha III; caso contrario con las especies del género *Pennisetum*, donde para las tres cosechas se notó un decrecimiento en dicho elemento (Cuadro 5). Para el Fe, en las tres especies se mostró que de la cosecha I a la cosecha II hay un decrecimiento en los valores y luego aumenta a los valores máximos en la cosecha III (Cuadro 5).

Por otra parte, para los elementos químicos Ca y P se obtuvieron diferencias significativas para los tratamientos cosecha y especie (Cuadro 3). En todas las especies el Ca presentó los

valores máximos en las cosechas I y III y *A. donax* fue la especie con los mayores porcentajes (Cuadro 5). El P en la especie *P. purpureum* x *P. glaucum* disminuyó de la cosecha I a la cosecha III, en el resto de especies del género *Pennisetum* el comportamiento del P creció de la cosecha I a la cosecha II y luego disminuyó en la cosecha III; *A. donax* nuevamente tuvo los mayores porcentajes de P (Cuadro 5).

Cuadro 5. Caracterización química de elementos para tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

Especie de pasto		<i>Arundo donax</i>			<i>Pennisetum Purpureum</i> (Plántula)			<i>Pennisetum Purpureum</i> (Tallo)			<i>Pennisetum Purpureum x</i> <i>Pennisetum glaucum</i>		
Tiempo de cosecha		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Elementos químicos		Análisis químico											
%	Azufre (S)	0,20 (24,99)	0,31 (15,24)	0,19 (20,18)	0,08 (26,94)	0,07 (20,56)	0,07 (26,15)	0,08 (0,00)	0,06 (13,61)	0,05 (23,97)	0,09 (24,00)	0,05 (9,52)	0,06 (20,13)
	Calcio (Ca)	0,35 (23,07)	0,32 (12,17)	0,33 (11,02)	0,22 (28,30)	0,14 (26,16)	0,20 (11,55)	0,25 (0,00)	0,12 (20,70)	0,20 (6,37)	0,22 (20,66)	0,14 (11,66)	0,20 (29,15)
	Carbono (C)	45,28 (0,62)	43,46 (0,55)	44,43 (2,48)	44,14 (1,21)	45,07 (1,29)	44,56 (1,54)	44,12 (1,21)	44,67 (1,54)	43,95 (1,97)	43,84 (2,48)	43,80 (0,60)	43,93 (2,31)
	Fósforo (P)	0,07 (18,63)	0,12 (6,20)	0,08 (6,20)	0,05 (22,71)	0,08 (11,48)	0,06 (31,44)	0,06 (12,86)	0,07 (11,66)	0,05 (26,49)	0,08 (11,61)	0,08 (23,09)	0,07 (14,18)
	Magnesio (Mg)	0,27 (19,72)	0,33 (19,81)	0,31 (14,77)	0,17 (24,40)	0,15 (24,69)	0,18 (26,19)	0,18 (4,04)	0,15 (10,89)	0,23 (8,87)	0,20 (27,93)	0,19 (24,39)	0,22 (13,38)
	Nitrógeno (N)	1,30 (9,48)	1,59 (14,02)	0,93 (14,11)	0,62 (19,90)	0,49 (22,49)	0,56 (28,32)	0,62 (0,00)	0,49 (18,45)	0,51 (18,79)	0,67 (23,19)	0,43 (15,15)	0,44 (24,22)
	Potasio (K)	0,68 (20,70)	0,78 (26,89)	0,29 (30,01)	1,29 (26,01)	0,73 (19,92)	0,77 (67,13)	1,55 (5,47)	0,76 (35,17)	0,37 (25,83)	2,23 (22,60)	0,72 (38,92)	0,60 (52,88)
	Relación C/N	45,12 (16,06)	28,68 (13,40)	49,50 (9,90)	86,12 (24,27)	99,93 (28,14)	118,86 (34,31)	84,97 (5,72)	90,91 (20,42)	108,93 (26,65)	89,75 (23,55)	114,22 (22,60)	122,56 (15,10)
mg kg ⁻¹	Cobre (Cu)	7,00 (9,04)	8,83 (18,14)	11,50 (32,42)	4,33 (23,83)	5,00 (11,55)	7,57 (31,31)	4,00 (0,00)	4,75 (20,16)	9,75 (64,53)	4,25 (22,55)	4,50 (12,83)	21,75 (108,50)
	Hierro (Fe)	187,50 (34,63)	162,50 (21,12)	553,50 (68,19)	176,67 (75,31)	103,71 (17,12)	472,14 (57,43)	172,50 (25,00)	92,75 (11,39)	310,50 (79,61)	223,75 (36,18)	99,50 (11,68)	663,5 (91,39)
	Manganeso (Mn)	150,00 (19,46)	195,83 (26,08)	242,83 (44,97)	103,67 (34,69)	74,57 (21,63)	123,00 (25,13)	128,50 (0,55)	69,00 (22,98)	119,75 (11,60)	146,75 (29,23)	94,25 (14,56)	154,25 (37,83)
	Zinc (Zn)	57,00 (28,70)	31,50 (12,17)	40,83 (22,94)	53,33 (65,28)	24,00 (23,32)	38,00 (29,34)	50,00 (48,08)	29,50 (59,01)	36,50 (10,13)	185,00 (103,45)	24,25 (2,06)	37,5 (16,94)

3.4. Extraíbles presentes en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

De acuerdo a la figura 9, se observó una variación para los extractivos en agua caliente de 17,71 % a 18,86 % en la cosecha I, 12,44 % a 15,02 % cosecha II y 15,09 % a 16,82% cosecha III; los extractivos en agua fría variaron de 14,47 % a 17,91 % en la cosecha I, 9,34 % a 12,90 % cosecha II y 10,57 % a 11,31 % cosecha III y finalmente en los extractivos etanol-tolueno para la cosecha I se obtuvo de 7,81 % a 12,03 %, cosecha II de 7,52 % a 10,27 % y cosecha III de 6,76 % a 9,74 %.

Los extractivos en agua caliente no tuvieron diferencias significativas entre especie y propagación, pero sí entre las tres cosechas (Cuadro 3); además, se observó una disminución de la cosecha I a la cosecha II, para luego aumentar en la cosecha III en todas las especies (Figura 9). Los datos máximos de este tipo de extractivos están presentes en la cosecha I para todas las especies (Figura 9 a - d).

Igualmente, los extractivos en agua fría no presentaron diferencias significativas entre especie y propagación pero sí entre cosechas (Cuadro 3). Los extraíbles en este tipo de agua para *A. donax* muestran una disminución en las tres cosechas (Figura 9 e); no obstante, en las especies del género *Pennisetum* existe una caída de la cosecha I a la cosecha II y nuevamente crece en la cosecha III (Figura 9 f - h). Los valores más altos se dan en la cosecha I (Figura 9 e - h).

Para los extractivos etanol-tolueno, a pesar que no se obtuvo diferencias significativas para ninguno de los tratamientos (Cuadro 3), se observa en las especies *A. donax* (Figura 9 i) y *P. purpureum* por plántula (Figura 9 j) una disminución de la cosecha I a la cosecha III. En el caso de *P. purpureum* por tallo (Figura 9 k) la distribución de la cosecha I a la cosecha II fue creciente y decrece en la cosecha III. Finalmente, se observa que en la especie *P. purpureum x P. glaucum* (Figura 9 l) la distribución de la cosecha I a la cosecha II fue decreciente y creciente en la cosecha III.

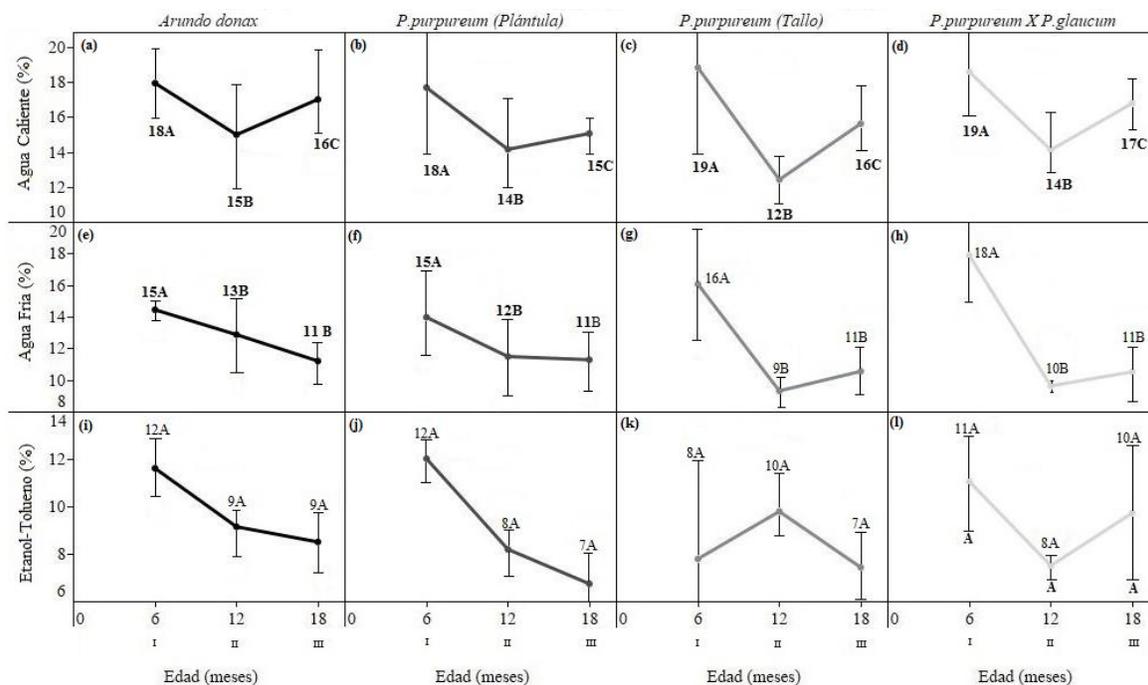


Figura 9. Comportamiento de extractivos presentes en tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para uso energía con distinta propagación y tres cosechas en Costa Rica.

* Las letras diferentes en mayúscula representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Barras dentro del gráfico corresponden a la desviación estándar.

3.5. Análisis multivariado en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

A partir de un análisis multivariado por componentes principales para 3 distintas especies, con 2 tipos de propagación y 3 cosechas, se obtuvo que son 5 componentes principales los que explican el 91 % de la varianza total para las distintas variables evaluadas (Cuadro 6). De estos 5 componentes principales, los componentes 1 y 2 explican la mayoría de la varianza con 36 % y 23 % respectivamente (Cuadro 6). Además, como se observa en el cuadro 6, las variables producción de biomasa seca, volátiles, S, Ca, Mg, N, Mn y la relación C/N están correlacionadas con el componente 1; contenido de humedad, cenizas, extraíbles en agua caliente y fría y Zn con el componente 2; poder calórico con los componentes 2, 3 y 4; P y C con el componente 4 y finalmente volátiles, extraíbles etanol-tolueno y Cu con el componente 5.

Cuadro 6. Matriz de correlación del análisis multivariado a partir de componentes principales para todos los parámetros evaluados de 3 especies de pastos, para 3 distintas cosechas y con 2 tipos de propagación en Costa Rica.

Parámetro	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente 5
Producción biomasa seca	-0,33	0,02	0,05	0,19	0,06
Contenido de humedad	-0,16	-0,31	-0,19	0,24	-0,06
Materia volátil	-0,25	-0,02	0,03	0,17	0,55
Cenizas	0,08	-0,36	-0,08	0,30	-0,10
Poder calórico	-0,05	0,30	0,32	0,31	-0,16
Agua caliente	0,14	-0,39	0,00	-0,16	-0,09
Etanol-Tolueno	0,10	-0,16	0,19	-0,27	0,63
Agua fría	0,14	-0,36	0,26	-0,07	-0,06
Nitrógeno	0,34	0,10	0,13	0,03	0,05
Fósforo	0,22	0,17	0,15	0,33	0,25
Calcio	0,35	-0,05	-0,04	-0,12	-0,12
Magnesio	0,34	0,10	-0,14	0,11	-0,03
Potasio	-0,02	-0,37	0,31	0,11	0,03
Azufre	0,34	0,13	0,08	0,11	0,09
Hierro	0,08	-0,09	-0,50	-0,05	0,02
Cobre	0,07	0,00	-0,48	0,05	0,38
Zinc	0,06	-0,36	0,18	0,01	0,02
Manganeso	0,32	-0,04	-0,20	0,12	-0,07
Carbono	-0,03	0,15	0,07	-0,64	-0,03
Relación Carbono/Nitrógeno	-0,33	-0,07	-0,16	-0,07	-0,12
Varianza	7,27	4,53	3,35	1,88	1,08
Porcentaje de varianza	0,36	0,23	0,17	0,09	0,05
Porcentaje de varianza acumulada	0,36	0,59	0,76	0,85	0,91

Con respecto a la relación de valores eigen del análisis multivariado para los componentes 1 y 2 (Figura 10), se infirió que las especies del género *Pennisetum* estuvieron correlacionadas negativamente con el componente 1 al contrario de *A. donax* que se correlacionó de forma positiva con dicho componente (Figura 10). Así mismo estos dos componentes muestran que las 3 cosechas de *A. donax* forman un conjunto aparte de las especies de *Pennisetum* que también se agrupan (Figura 10). *A. donax* está altamente correlacionada y de forma positiva con el componente 1 y 2 (Figura 10). Las especies *P.*

purpureum propagada por plántula y por tallo, así como la especie *P. purpureum* x *P. glaucum*, están correlacionadas de forma negativa con el componente 1 y positivamente con el componente 2 para la cosecha II (Figura 10). *P. purpureum* con ambos tipos de propagación para la cosecha III está correlacionado positivamente con el componente 2 y negativamente con el componente 1 pero su relación no es alta (Figura 10). *P. purpureum* x *P. glaucum* en la cosecha III junto con *P. purpureum* con ambos tipos de propagación en la cosecha I, están alta y negativamente correlacionadas el componente 2 y con una relación no tan alta y negativa para el componente 1 (Figura 10). En el caso de *P. purpureum* x *P. glaucum* en la cosecha I este se correlaciona altamente con el componente 2 y de forma negativa y positivamente con el componente 1 (Figura 10).

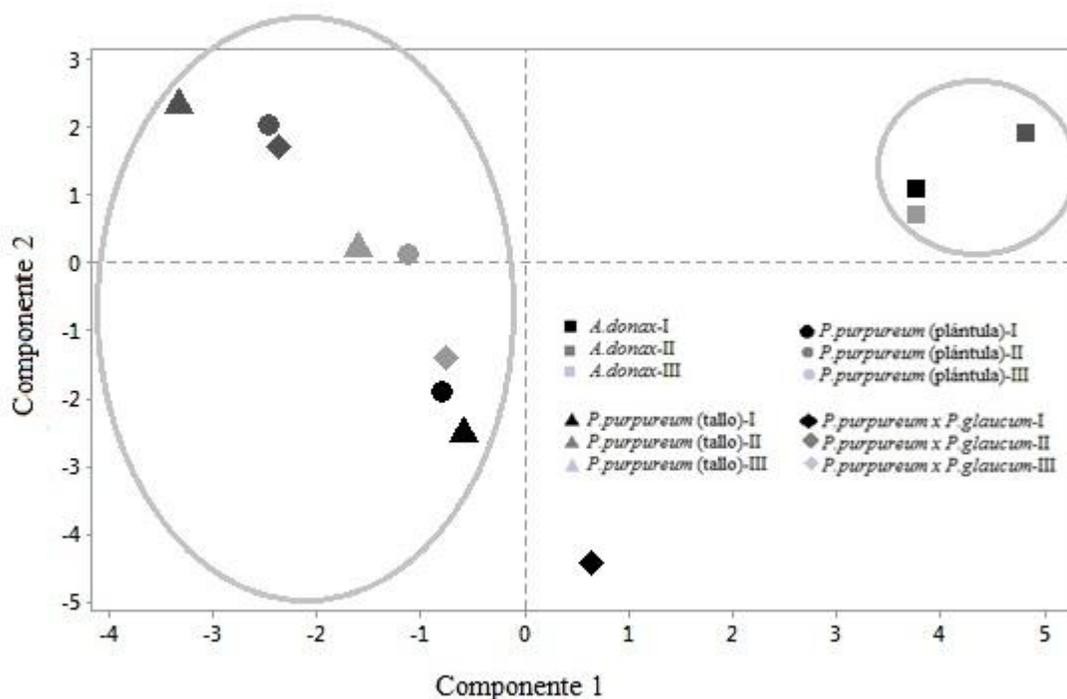


Figura 10. Relación entre varianzas (valores eigen) para los componentes 1 y 2 del análisis multivariado para los componentes principales de 3 distintas cosechas, 2 tipos de propagación y 3 especies de pasto en Costa Rica.

En el análisis de correlación para verificar el efecto en las diferentes variables de producción y características energéticas de las diferentes especies, tipo de propagación y tiempo de cosecha con las distintas variables del componente 1, de mayor explicación, se encontró que las variables más correlacionadas y de forma positiva con el componente 1 son los elementos de Ca, S, Mg y N con valores por arriba del 90 % (Figura 11 c - f, Cuadro 6). En tanto que, la producción de biomasa seca, la relación C/N tuvo una correlación negativa y el Mn una correlación positiva, con coeficiente de correlación superior a 85 % (Figura 11 a, g, h). Los volátiles tuvieron la correlación más baja con 66 % y de forma negativa (Figura 11 b).

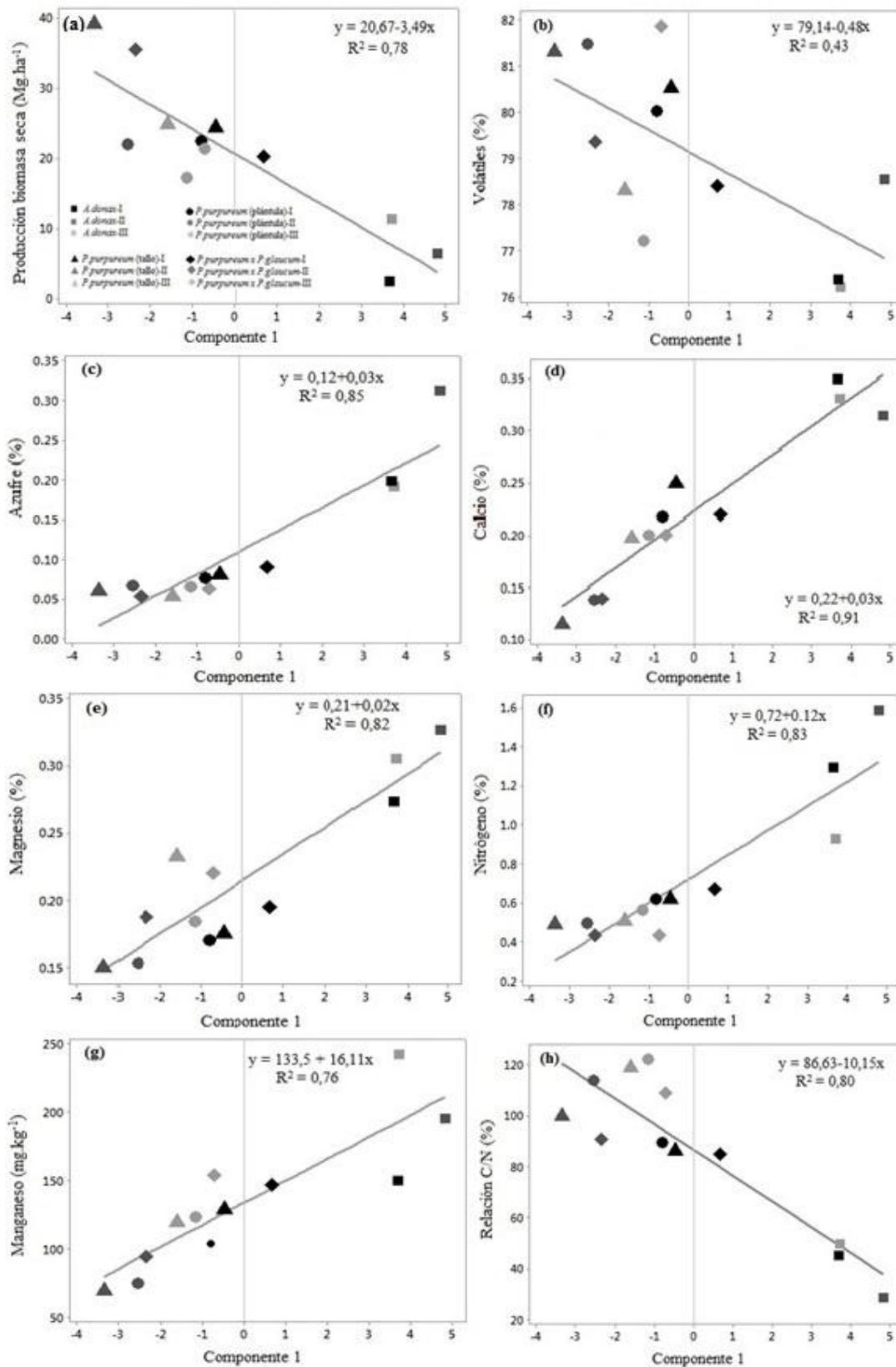


Figura 11. Relación entre puntuaciones del componente principal 1 con las diferentes variables para 3 distintas cosechas, 3 especies de pasto y 2 tipos de propagación.

4. DISCUSIÓN

4.1. Variación de rebrotes, altura total y producción de biomasa seca de tres especies de pasto en condiciones de cultivos de corta rotación para energía.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la especie *A. donax*, se observó que las 3 cosechas evaluadas fueron diferentes y hubo un crecimiento en altura, cantidad de rebrotes y producción de biomasa desde la cosecha I a la III (Figura 6 a y 7 a). Al respecto De Vasconcelos et al. (2007) y Dragoni et al. (2015) indican que, luego de estudiar el rendimiento en producción de biomasa seca en *A. donax*, esta fue creciente durante los tres primeros años, ya que la especie busca desarrollar un sistema radicular vigoroso durante los primeros ciclos.

Por otra parte, los resultados del crecimiento por altura total, cantidad de rebrotes (Figura 6), la producción de biomasa seca y el contenido de humedad (Figura 7) para las especies del género *Pennisetum*, muestran variación en las tres cosechas. Esta variación puede ser explicada por los diferentes períodos climáticos que se presentan en la región (Figura 1). Las cosechas I y III fueron realizadas al final de la época de baja precipitación (Figura 1), mientras que la cosecha II fue realizada luego de la época de alta precipitación de la región (Figura 1).

Basado en lo anterior, las cosechas realizadas en la época de baja precipitación (cosechas I y III) para el género *Pennisetum* presentaron los valores más bajos de altura (Figura 6 b - d) y producción de biomasa seca (Figura 7 c - d), exceptuando la especie *P.purpureum* propagada por plántula con respecto a la producción de biomasa seca (Figura 7 b); y al mismo tiempo obtuvieron los valores más altos en contenido de humedad (Figura 7 f - h) al comparar con la cosechada realizada a finales de la época de alta precipitación (cosecha II). Entonces podemos afirmar que las plantaciones son afectadas durante la época de baja y alta precipitación, pues a mayor cantidad de lluvias se presentó menor contenido de humedad, mayor producción y mayor crecimiento en las especies mencionadas y viceversa (Figura f - h). Esto ocurre, por que hay una reacción de la especie a la escasez de agua, donde para prevenir la pérdida por turgencia, la especie reduce la transpiración e induce a

un menor consumo de agua en la época seca y todo lo contrario para la época lluviosa, por lo que es de esperar un menor producción durante la época seca (Ramos-Trejos y Graniel, 2015; Geren et al., 2014; Calzada-Marín et al., 2014 y Herrera et al., 2014).

En relación al contenido de humedad entre especies (Figura 7), son las especies *Pennisetum* las que tienen los mayores valores (Figura 7 f - h), lo que implica a futuro un mayor gasto energético al momento del secado del material comparando con *A.donax* (Figura 7 e). Takara et al. (2015), explica que el aumento y disminución del contenido de humedad en las especies, se debe a la variación de precipitaciones y la necesidad que tiene el pasto de absorber humedad para mantener el crecimiento.

Las diferencias encontradas en el crecimiento en altura y producción de biomasa seca (Figura 6 y 7) tanto para la especie *A.donax* y las especies del género *Pennisetum* puede ser explicado a disparidad en la composición genética de las especies (Hassan et al., 2014, Agenlini et al., 2009., Ramos-Trejos y Graniel, 2015). Por otro lado, Araya y Bochini (2005); Lima et al. (2014); Rengsirikul et al. (2013) mencionan que la edad de la cosecha, condiciones de sitio, la época de plantación, aplicación de fertilizante y niveles de precipitación producen diferente efectos en las especies y en las variedades de estas, como fue observado en el presente estudio.

Otro aspecto importante a destacar para los resultados obtenidos en la producción de biomasa seca, es que los rendimientos más altos fueron dados por las especies propagadas por tallo (Figura 7), lo que es favorable pues necesita menor cantidad de tallos por hectárea comparado con las especies propagadas por plántula y esto implica un menor costo de establecimiento y mano de obra. Machado et al. (1979), concuerda con los resultados de este estudio y menciona que *P. purpureum* a pesar de tener una reproducción sexual y asexual, cuando se establece una plantación por plántulas, el crecimiento y desarrollo es más lento que en una reproducción asexual (por tallos). Cepeda (2013) explica que en la reproducción por tallo, el rendimiento es mayor, ya que en su desarrollo y crecimiento la especie se concentra en reducir la formación radicular y crear más rebrotes a partir de carbohidratos almacenados en el tallo.

Al comparar los crecimientos y rendimientos con otros estudios se tiene que por ejemplo De Vasconcelos et al. (2007), en plantaciones de *A.donax* en Brasil obtuvo rendimientos en producción de biomasa seca, de forma creciente durante tres años, con promedios de 1,4 Mg ha⁻¹ al primer año, 8 Mg ha⁻¹ al segundo año y finalmente 11,6 Mg ha⁻¹ al tercer año en un clima templado húmedo, que comparado con el presente estudio concuerda en el aumento con la edad, pero con producción de biomasa menor en nuestra condición. En Italia, a partir de 39 clones de *A.donax* se registraron rendimientos medios de 11 Mg ha⁻¹ a 22 Mg ha⁻¹ en el primer y segundo año (Angelini et al., 2009), también producción de biomasa inferior al obtenido en Costa Rica. Falasca et al. (2011), explica que la producción de biomasa seca depende en gran parte de la disponibilidad de agua durante el período de crecimiento activo, entre 400 mm a 550 mm, para obtener aproximadamente 10 Mg ha⁻¹ en el primer año y de 12 a 15 Mg ha⁻¹ al segundo año, independientemente que sea un clima tropical o no.

En el caso de los géneros *Pennisetum*, Anderson et al. (2008), explica que bajo condiciones óptimas y una alta entrada de fertilizante, esta puede producir de 70 - 85 Mg ha⁻¹ al año de biomasa seca; cifra ligeramente mayor al presentado en nuestro estudio. No obstante, ésta diferencia puede ser considerada satisfactoria pues la plantación no fue fertilizada y no se estableció en las condiciones ideales, pero se obtuvieron rendimientos similares. En México, por ejemplo *P.purpureum* se reportan producciones de 21,10 Mg ha⁻¹ al primer año y 38, 60 Mg ha⁻¹ al segundo año (Rueda et al., 2016), cifras mucho menores a las obtenidas en el presente estudio (Figura 7b-d).

4.2. Caracterización energética para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

En la variable poder calórico se presenta el efecto de diferencias significativas entre cosechas, no así para las variables cenizas y volátiles (Cuadro 3). Mantineo et al. (2009); Saikia et al. (2015); Bertel et al. (2013) explican que estas diferencias pudieron deberse indirectamente a la época en que se realizó la cosecha, la cantidad de lluvias, el desarrollo de la caña en cada cosecha o época de crecimiento de crecimiento, como efectivamente se presenta en clima en las diferentes cosechas.

En el caso del poder calórico para las tres especies en sus distintas cosechas y tipo de propagación (Figura 8), los valores obtenidos son muy similares a los reportados por Tenorio et al. (2015), Dos Santos et al. (2015), y Navarro et al. (2013), donde los datos varían de 14 600 kJ kg⁻¹ a 18 400 kJ kg⁻¹ en el caso de la especie *A. donax* y también los reportados por Tenorio et al. (2015) y Ohimain et al. (2014) para la especie *P. purpureum* con datos de 15 700 kJ kg⁻¹ a 17 000 kJ kg⁻¹.

Por otra parte, al comparar los porcentajes de cenizas obtenidos (Cuadro 4) con otros autores, estos resultan similares. Por ejemplo Tenorio et al. (2015) midió en promedio de 10,5 % para *A. donax* y 7,5 % para *P. Purpureum*. Correa (2006) para la especie *P. purpureum* x *P. glaucum* en diferentes épocas de cosecha presentó valores de 10 - 11%. También Chacón-Hernández y Vargas-Rodríguez (2010) y Araya y Bochini (2005) para *P. purpureum* reportan un rango de valores de 13,5 % a 15 % de cenizas e indican que un aumento la edad disminuye el porcentaje de cenizas y esta disminución con la edad se debe a una mayor formación de fibras en los tallo y menor cantidad de hojas. Por otro lado, Martínez y Lora (2015) menciona que altos contenidos de cenizas pueden ser atribuidos a presencia de sales de potasio, lo que tiene relación con los datos obtenidos (Cuadro 4 y Cuadro 5).

Las variaciones encontradas en el porcentaje de ceniza como indica Banka et al. (2015) se deben a la época del año, edad de la cosecha y la variabilidad genética entre especies, como verdaderamente se presenta en este estudio que fueron hechas a diferentes épocas del año, edad y diferentes variedades entre especies.

Un aspecto negativo de la cantidad de cenizas es su relación inversa con el poder calórico de una especie (Rengsirikul et al., 2013; Sánchez et al., 2015). Al respecto Rengsirikul et al. (2011), explican que la concentración de cenizas es crítica para determinar el valor del material vegetal como fuente de combustión pues altos niveles de cenizas reducen el poder calórico de la biomasa. Morais et al. (2009) expresa que el nivel crítico en porcentaje de cenizas para el valor calórico de la biomasa es de 5 %, lo que se vuelve un contraste con los valores obtenidos para las diferentes especies estudiadas, ya que los valores encontrados están sobre ese porcentaje (Cuadro 4). Martínez y Lora (2015) y Flores et al. (2012) mencionan otros efectos en el momento de la combustión directa, y mencionan que altos

niveles de cenizas pueden causar problemas diversos por posible fusión y acumulación en los equipo de quemado de biomasa, causando taponamiento, corrosión y bloqueo de la rejilla en el reactor en usos térmicos de la biomasa. Entonces, a partir de la biomasa generada en este estudio, se deberá tener presente que en la futura combustión diferecta de la misma, es necesario probablemente manejar los efectos de la ceniza como lo indica Melissari (2012), quien explica que para este tipo de especies perennes se debe tener un control de la temperatura de vapor en cuanto al diseño de la caldera, a un nivel en el que el ritmo de corrosión sea aceptable, uso de aditivos que modifiquen la química de los gases de combustión y por lo tanto la deposición de ceniza y una selección de aleaciones más resistentes a la corrosión para sobre calentadores.

Finalmente, los resultados de porcentaje de volátiles para la especie *A. donax* (cuadro 4), concuerdan con los presentados en el estudio de Moya et al. (2015) con valores de 70,5 %, no así para los géneros *Pennisetum*, pues estos variaron de 77 % a 82 % (Cuadro 4), al contrario del estudio mencionado que reportó 69,2 %. No obstante, en otro estudio realizado por Mohammed (2015), para *P. purpureum* para hoja, tallo y total, reportan valores similares al presente estudio (Cuadro 4). Así mismo, Rodríguez (2014) y Onuegbu et al. (2010) reportan materia volátil para *P.purpureum* de 70 % a 73 %, valores también mas bajos que los reportados en este estudio (Cuadro 4). Rodríguez (2014) y Onuegbu et al. (2010), explican que la presencia de altos contenidos de materia volátil es una característica deseable ya que entre más materia volátil más facilmente se enciende y se quema más rápido.

4.3. Caracterización química de elementos para tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

Al comparar los valores obtenidos en el análisis químico de los micro y macro elementos (Cuadro 5) con el estudio realizado por Vargas et al. (1993) de *P.purpureum* en la Zona Huetar Norte de Costa Rica; se observa que en todos los elementos los datos fueron

ligeramente más altos que en el estudio presente. Así mismo en ese estudio fue encontrado diferencia en el contenido de minerales debido a una interacción del estado vegetativo, época del año y la especie (Vargas et al., 1993), como se ve reflejado en el presente estudio.

Al analizar los diferentes micro y macroelementos algunas afirmaciones pueden ser resaltadas:

- Los bajos niveles de Ca obtenidos en este estudio (Cuadro 5) puede ser explicado por el hecho de que este elementos, junto con K y Mg, poseen una relación de $K/(Ca+Mg)$, y que si esta relación es mayor a 2,2 la cantidad de Ca es bajo (Correa, 2006), como fue encontrado en este estudio en la variable de relación de $K/(Ca+Mg)$ (Cuadro 5).
- En relación con C, N y S los valores encontrados en este estudio para *P. purpureum* (Cuadro 5) son concordantes con los realizados por Rengsirikul et al. (2011), quien obtuvo valores para el C, N y S valores de 45,8 %, 1,3 % y 0,06 % respectivamente. Además Rengsirikul et al (2011), hace referencia a los efectos de estos elementos en los procesos de combustión y que también son aplicables a este estudio. El contenido de C tiene un efecto positivo con el contenido de energía, en tanto que N y S tienen efectos negativos ya que con la combustión directa, se pueden formar gases contaminantes para la atmósfera e indica que el nivel crítico de S en la biomasa debe ser menor a 0,3 %. Entonces los valores de S en el presente estudio (Cuadro 5) estuvieron por encima del valor crítico mencionado anteriormente, por lo que se podrán tener negativos durante la combustión de *P. purpureum*.
- En el análisis de los elementos Fe y Zn, en un estudio realizado por Gupta et al. (2009) en la especie *Pennisetum sp.*, encontraron que existen diferencias significativas en el contenido de Zn entre la biomasa cosechada en la época seca y la época lluviosa, disminuyendo en la segunda., resultado contrario a los del presente estudio (Cuadro 5), pero en el caso del contenido de Fe en las dos cosechas del estudio de Gupta et al. (2009), concuerda con el presente estudio.

4.4. Extraíbles presentes en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

Los extraíbles con agua caliente (Figura 9a-d) y agua fría (Figura 9e-h) presentaron diferencias significativas por tiempo de cosecha y los valores son superiores a los obtenidos en un estudio hecho en el Sur de África por Madakadze (2010), donde para la especie de *P. purpureum* se obtuvieron valores de 9,90 % en agua fría y 10,90 % para agua caliente cuando se cosecha al final de la época de crecimiento del pasto con fines de alimento para ganado. Igualmente para los extractivos en etanol-tolueno (Figura 9i-l) son comparables con un estudio realizado en la India por Obi et al. (2014), quién reportó en *A. donax* valores de 4,55 % a 6,34 % y *P. purpureum* 3,1 %, a diferencia del presente estudio (Figura 8).

Las diferencias para los extractivos por agua caliente, fría y etanol-tolueno, pueden ser justificadas por lo afirmado por Na et al. (2016), quien explica que entre más tarde el tiempo de cosecha más acumulativo de extractivos en los tallos van a estar presente y dependiendo de la época en especial la época seca, se tiene menos cantidad de hojas, lo que provoca una menor concentración de extractivos, Na et al. (2016) destaca que existe muy poca información sobre concentración de extractivos en gramíneas C₄.

4.5. Análisis multivariado en tres especies de pasto con distinta propagación en condiciones de cultivos de corta rotación para energía en tres diferentes cosechas.

El análisis multivariado realizado por componentes principales presentó diferencias para las tres distintas especies en primer lugar, tipo de propagación en segundo lugar y tiempo de cosecha en tercer lugar (Figura 10). Dicho análisis explicó que, con respecto al componente 1, hay un mayor valor en poder calórico (kJ kg⁻¹) para la cosecha II y particularmente para las especies propagadas por tallo (Figura 10), por la producción en biomasa seca (Mg ha⁻¹)

(Figura 11 a) y debido a la presencia de volátiles, S, Ca, Mg, N, Mn, la relación C/N (Figura 11 b - h).

Por otra parte, el componente 2, explica el bajo rendimiento de la especie *A. donax* con respecto a las especies del género *Pennisetum* y al mismo tiempo las diferencias entre cosechas, donde nuevamente la cosecha II tuvo los mayores valores y en la propagación por tallo (Figura 10). La producción de biomasa seca (Mg ha^{-1}) disminuye con la aparición de variables como contenido de humedad, cenizas, K, Zn y extractivos como taninos, gomas, azúcares, almidones y colorantes (Cuadro 6). Entonces acorde con este análisis se tiene que la mejor calidad de biomasa se presentó en la segunda cosecha en especial en *P. purpureum* reproducido por tallo y que esta biomasa presenta bajas en contenido de humedad y cenizas. Y la segunda conclusión en importancia y asociado al componente 2 indica el tipo de biomasa, donde muestra que *A. donax* es energéticamente diferente a las especies de *P. purpureum*.

5. CONCLUSIONES

1. Los rendimientos más altos en producción de biomasa seca fueron para las especies del género *Pennisetum*, propagadas por tallo, en la cosecha II; con valores de 36 Mg ha^{-1} en *P. purpureum* x *P. glaucum* y 39 Mg ha^{-1} para *P. purpureum*, comparadas con la especie *A. donax* con valores de 6 Mg ha^{-1} .
2. Los valores más altos de poder calórico, se obtuvieron en la cosecha II, para las tres especies; *P. purpureum* x *P. glaucum* con $17\,855 \text{ kJ kg}^{-1}$, *P. purpureum* propagado por tallo con $17\,624 \text{ kJ kg}^{-1}$, *P. purpureum* propagado por plántula con $17\,363 \text{ kJ kg}^{-1}$ y *A. donax* con $17\,773 \text{ kJ kg}^{-1}$.
3. Los porcentajes de cenizas mostraron que en la cosecha II se presentaron los valores más bajos con 7,29 % en *P. purpureum* x *P. glaucum*, 5,99 % en *P. purpureum* propagado por tallo, 6,14 % *P. purpureum* propagado por plántula y 7,89 % en *A. donax*. Los valores más bajos siempre los obtuvo las especies del género *Pennisetum*.

4. La mayor cantidad de volátiles los presentaron las especies del género *Pennisetum*; *P. purpureum* x *P. glaucum* en la cosecha III con 81,86 %, *P. purpureum* propagado por tallo con 81,31 % y *P. purpureum* propagado por plántula con 81,48 %.
5. *P. purpureum* x *P. glaucum* posee la mayor cantidad de extraíbles en agua fría (17,91 %) y agua caliente (18,62 %), ambos en la cosecha I; y *P. purpureum* propagado por plántula en etanol-tolueno (12,03 %) en la cosecha I.
6. La mejor calidad de biomasa se presentó en la cosecha II para la especie *P. purpureum* propagada por tallo, ya que esta biomasa presenta bajas en contenido de humedad (57 %) y cenizas (5,99 %) y además, la especie *A. donax* es energéticamente diferente a las especies de *P. purpureum*, asociado a la baja producción en sus tres cosechas (3 Mg ha⁻¹, 6 Mg ha⁻¹ y 11 Mg ha⁻¹) y características químicas máximas en S (0,20 %, 0,31 % y 0,19 %), Mg (0,27 %, 0,33 % y 0,31 %), N (1,30 %, 1,59 %, 0,93 %), y Mn (150 mg kg⁻¹, 196 mg kg⁻¹ y 243 mg kg⁻¹).
7. Las variables más correlacionadas negativamente con el componente 1 son Ca, S, Mg y N con 90 %, las variables correlacionadas positivamente son la biomasa seca, la relación C/N y Mn con 85 %. La baja producción de biomasa para las especies de pastos está relacionada a los altos contenidos de S, Mg, Mn, N y Ca
8. Es importante mencionar que las conclusiones aquí obtenidas son únicamente para la Zona Norte del país.

6. RECOMENDACIONES

1. Crear un diseño experimental por bloques completos al azar para las especies propagadas por tallo.
2. Caracterizar el contenido de macro y micronutrientes presentes en el suelo antes del establecimiento y después de cada cosecha.

3. Tener un control previo sobre la genética y variedad de la especie a utilizar en el establecimiento de la plantación.
4. Fertilizar la plantación agroenergética con respecto a los requerimientos nutricionales y la interacción suelo-especie.
5. Estudiar la producción de biomasa seca para las diferentes cosechas pero evaluando el peso foliar y peso de rebrotes individualmente.
6. Evaluar la distancia existente entre la base hasta la zona de corte de los rebrotes para las diferentes cosechas y especies con relación a la producción de biomasa seca.
7. Desarrollar este proyecto con las recomendaciones previas y replicado en diferentes sitios distribuidos dentro del país.

7.REFERENCIAS

- Agostini, F., Gregory, A. S., y Richter, G. M. (2015). Carbon sequestration by perennial energy crops: is the jury still out?. *BioEnergy research*, 1-24.
- Anderson, W. F., Casler, M. D., y Baldwin, B. S. (2008). Improvement of perennial forage species as feedstock for bioenergy. In *genetic improvement of bioenergy crops* (pp. 347-376). Springer New York.
- Angelini, L. G., Ceccarini, L., o Di Nasso, N. 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(4), 635-643.
- Anguiano, J. M., Aguirre, J., y Palma, J. M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en investigación agropecuaria*, 17(1), 149-160.
- Araya-Mora, M., y Boschini-Figueroa, C. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la Meseta Central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 16(1), 37-43.
- Banka, A., Komolwanich, T., y Wongkasemjit, S. (2015). Potential thai grasses for bioethanol production. *Cellulose*, 22(1), 9-29.
- Bertel, Q. R. Q., Lora, E. E. S., y Cobas, V. R. M. (2013). Perspectives of electricity generation from woody and herbaceous crops in Brazil. *International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, 1-10.
- Bonner, I. J., Smith, W. A., Einerson, J. J., y Kenney, K. L. (2014). Impact of harvest equipment on ash variability of baled corn stover biomass for bioenergy. *BioEnergy research*, 7(3), 845-855.

- Calzada-Marín, J. M., Enríquez-Quiroz, J. F., Hernández-Garay, A., Ortega-Jiménez, E., y Mendoza-Pedroza, S. I. (2014). Análisis de crecimiento del pasto maralfalfa (*Pennisetum sp.*) en clima cálido subhúmedo. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 5(2), 247-260.
- Cepeda, T. J. C. (2013). Agronomía del *Pennisetum purpureum* en el trópico. *Manejo de Pastos y Forrajes Tropicales*, 155.
- Chacón-Hernández, P. A., y Vargas-Rodríguez, C. F. (2010). Consumo de *Pennisetum purpureum* cv. king grass a tres edades de cosecha en caprinos. *Agronomía mesoamericana*, 21(2), 267-274.
- Corno, L., Pilu, R., y Adani, F. (2014). *Arundo donax* L.: a non-food crop for bioenergy and bio-compound production. *Biotechnology advances*, 32(8), 1535-1549.
- Correa, H. J. (2006). Calidad nutricional del pasto maralfalfa (*Pennisetum sp*) cosechado a dos edades de rebrote. *Livestock research for rural development*, 18(6), 2006.
- De Vasconcelos, G. C., Gomes, J. C. C., y Corrêa, L. A. V. (2007). Rendimento de biomassa da cana-do-reino (*Arundo donax* L.). *Embrapa Clima Temperado*.
- Dos Santos, R. L., Freire, F. J., da Rocha, A. T., da Silva, J. A. A., Tavares, J. A., de Sousa Ferreira, E. G. B., y de Oliveira, E. C. A. (2015). Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) biomass production as promising alternative source of energy in Brazil's semiarid area using gypsum. *Australian journal of crop science*, 9(11), 1082.
- Dragoni, F., o Di Nasso, N. N., Tozzini, C., Bonari, E., y Ragolini, G. (2015). Aboveground yield and biomass quality of giant reed (*Arundo donax* L.) as affected by harvest time and frequency. *BioEnergy research*, 1-11.
- Ehret, M., Bühle, L., Graß, R., Lamersdorf, N., y Wachendorf, M. (2015). Bioenergy provision by an alley cropping system of grassland and shrub willow hybrids: biomass, fuel characteristics and net energy yields. *Agroforestry systems*, 89(2), 365-381.

- El Kasmioui, O., y Ceulemans, R. (2013). Financial analysis of the cultivation of short rotation woody crops for bioenergy in Belgium: barriers and opportunities. *BioEnergy research*, 6(1), 336-350.
- Falasca, S., Flores M.N., y Galvani G. (2011). ¿Puede usarse una especie invasora como *Arundo donax* (caña común) con fines energéticos en Argentina?. INTA. 1-6.
- Fedenko, J. R., Erickson, J. E., Woodard, K. R., Sollenberger, L. E., Vendramini, J. M., Gilbert, R. A., ... y Peter, G. F. (2013). Biomass production and composition of perennial grasses grown for bioenergy in a subtropical climate across Florida, USA. *Bioenergy research*, 6(3), 1082-1093.
- Feltus, F. A., y Vandenbrink, J. P. (2012). Bioenergy grass feedstock: current options and prospects for trait improvement using emerging genetic, genomic, and systems biology toolkits. *Biotechnol. Biofuels*, 5(80).
- Flores, R. A., Urquiaga, S., Alves, B. J., Collier, L. S., y Boddey, R. M. (2012). Yield and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy. *Engenharia agrícola*, 32(5), 831-839.
- Gamble, J. D., Jungers, J. M., Wyse, D. L., Johnson, G. A., Lamb, J. A., y Sheaffer, C. C. (2015). Harvest date effects on biomass yield, moisture content, mineral concentration, and mineral export in switchgrass and native polycultures managed for bioenergy. *BioEnergy research*, 8(2), 740-749.
- Geren, H., Simić, A., Kvit, y. T., y Avcioglu, R. (2014). Effect of deficit irrigation on the biomass yield and related characteristics of giant king grass (*Pennisetum hybridum*). In presidency of the congress (p. 277).
- Guevara, G. (2015). Factibilidad del cultivo y uso de la biomasa de plantaciones de *Pennisetum purpureum* (king grass) para su transformación en energía eléctrica en el Pelón de la Bajura (tesis de maestría sin publicar). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

- Gupta, S. K., Velu, G., Rai, K. N., y Sumalini, K. (2009). Association of grain iron and zinc content with grain yield and other traits in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Crop improvement*, 36(2), 4-7.
- Guretzky, J. A., Biermacher, J. T., Cook, B. J., Kering, M. K., y Mosali, J. (2011). Switchgrass for forage and bioenergy: harvest and nitrogen rate effects on biomass yields and nutrient composition. *Plant and soil*, 339(1-2), 69-81.
- Gurrola, A. G., Olguin, J. L. L., García, L. S., y Gurrola, J. A. G. (2016). Composición química y producción del pasto *Pennisetum purpureum* en la época de lluvias y diferentes estados de madurez. *Educatconciencia*, 6(7).
- Hassan, M. U., Zamir, S. I., Haq, I., Khalid, F., Rasool, T., y Hussain, A. (2014). Growth, yield and quality performance of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). *American journal of plant sciences*, 2014.
- Herrera, R. S., Martínez, R. O., Martínez, M., Tuero, R., Cruz, A. M., y Romero, A. (2014). Frecuencia de corte en indicadores de calidad de variedades de *Pennisetum* y *Saccharum* durante el período poco lluvioso. *Revista cubana de ciencia agrícola*, 48(2), 159-166.
- Hood, E. E., Teoh, K., Devaiah, S. P., y Vicuna Requesens, D. (2013). Biomass crops for biofuels and bio-based products. *Sustainable food production*, 250-279.
- Ingenio El viejo. (2011).
- Jungers, J. M., Wyse, D. L., y Sheaffer, C. C. (2015). Establishing native perennial bioenergy crops with cereal grain companion crops. *BioEnergy research*, 8(1), 109-118.
- Kim, H. K., Parajuli, P. B., y To, S. F. (2013). Assessing impacts of bioenergy crops and climate change on hydrometeorology in the yazoo river basin, mississippi. *Agricultural and forest meteorology*, 169, 61-73.

- Koponen, K., y Soimakallio, S. (2015). Foregone carbon sequestration due to land occupation—the case of agro-bioenergy in Finland. *The international journal of life cycle assessment*, 20(11), 1544-1556.
- Liu, J., Wu, J., Liu, F., y Han, X. (2012). Quantitative assessment of bioenergy from crop stalk resources in inner mongolia, china. *Applied energy*, 93, 305-318.
- López-Bellido, L., Wery, J., y López-Bellido, R. J. (2014). Energy crops: prospects in the context of sustainable agriculture. *European journal of agronomy*, 60, 1-12.
- Machado, R., Lamela, L., y Gerardo, J. (1979). Hierba elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach). *Pastos y forrajes*, 2(2).
- Madakadze, I. C., Masamvu, T. M., Radiotis, T., Li, J., y Smith, D. L. (2010). Evaluation of pulp and paper making characteristics of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *African journal of environmental science and technology*, 4(7), 465-470.
- Mantineo, M., D'agosta, G. M., Copani, V., Patanè, C., y Cosentino, S. L. (2009). Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field crops research*, 114(2), 204-213.
- Martínez, J. M. R., y Lora, E. E. S. (Eds.). (2015). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad*. José María Rincón Martínez, Electo Eduardo Silva Lora.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (10), 69-82.
- Mohammed, I. Y., Abakr, Y. A., Kazi, F. K., Yusup, S., Alshareef, I., y Chin, S. A. (2015). Comprehensive characterization of napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. *Energies*, 8(5), 3403-3417.
- Mola-Yudego, B., Díaz-Yáñez, O., y Dimitriou, I. (2015). How much yield should we expect from fast-growing plantations for energy? divergences between experiments and commercial willow plantations. *BioEnergy research*, 8(4), 1769-1777.

- Monti, A., y Zegada-Lizarazu, W. (2015). Sixteen-year biomass yield and soil carbon storage of giant reed (*Arundo donax* L.) grown under variable nitrogen fertilization rates. *BioEnergy research*, 1-9.
- Morais, R. F. D., Souza, B. J. D., Leite, J. M., Soares, L. H. D. B., Alves, B. J. R., Boddey, R. M., y Urquiaga, S. (2009). Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 44(2), 133-140.
- Moya-Roque, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Tenorio, C., Valdez, J., y Valaert, J. (2015). Evaluación de la combustión de comprimidos cilíndricos fabricados con cultivos forestales y agrícolas en Costa Rica utilizando un quemador doméstico. *Revista forestal mesoamericana kurú*, 13(30), 33-42.
- Na, C., Sollenberger, L. E., Erickson, J. E., Woodard, K. R., Vendramini, J. M. B., y Silveira, M. L. (2014). Management of perennial warm-season bioenergy grasses. I. biomass harvested, nutrient removal, and persistence responses of elephantgrass and energycane to harvest frequency and timing. *Bioenergy res.* doi, 10, 1007.
- Navarro, P., Iglesias, C., y Català, R. (2013). Potencialidad de uso de *Arundo donax* como biocombustible sólido. En Congreso Forestal, 2-13.
- Obi Reddy, K., Uma Maheswari, C., Shukla, M., y Muzenda, E. (2014). Preparation, chemical composition, characterization, and properties of napier grass paper sheets. *Separation science and technology*, 49(10), 1527-1534.
- Offermann, R., Seidenberger, T., Thrän, D., Kaltschmitt, M., Zinoviev, S., y Miertus, S. (2011). Assessment of global bioenergy potentials. Mitigation and adaptation strategies for global change, 16(1), 103-115.
- Ohimain, E. I., Kendabie, P., y Nwachukwu, R. E. (2014). Bioenergy potentials of elephant grass, *Pennisetum purpureum* Schumach. *Annual research y review in biology*, 4(13), 2215.

- Onuegbu, T. U., Ogbu, I. M., Ilochi, N. O., Okafor, I., Obumselu, O. F., y Ekpunobi, U. E. (2010). Enhancing the efficiency of coal briquette in rural Nigeria using *Pennisetum purpureum*. *Advances in natural and applied sciences*, 4(3), 299-305.
- Pennington, D. (2014). Bioenergy crops. *Bioenergy: biomass to biofuels*, 111.
- Pérez-Cruzado, C., Merino, A., y Rodríguez-Soalleiro, R. (2011). A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2839-2851.
- Ramos-Trejo, O. S., y Graniel, J. (2015). Season, fertilization, and yield of varieties of *Pennisetum purpureum*. *Agrociencia*, 49(8), 837-844.
- Rengsirikul, K., Ishii, Y., Kangvansaichol, K., Sripichitt, P., Punsuvon, V., Vaithanomsat, P. y Tudsri, S. (2013). Biomass yield, chemical composition and potential ethanol yields of 8 cultivars of napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) harvested 3-monthly in central Thailand. *Journal of sustainable bioenergy systems*, 3(02), 107.
- Rengsirikul, K., Ishii, Y., Kangvansaichol, K., Pripanapong, P., Sripichitt, P., Punsuvon, V., ... y Tudsri, S. (2011). Effects of inter-cutting interval on biomass yield, growth components and chemical composition of napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach) cultivars as bioenergy crops in Thailand. *Grassland science*, 57(3), 135-141.
- Rodríguez Riaño, N. (2014). Mejoramiento de aceites maltoides extraídos de bio-crudo obtenido por conversión hidrotérmica de pasto *Pennisetum (Glaucum x Purpureum)* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Saikia, R., Chutia, R. S., Katakai, R., y Pant, K. K. (2015). Perennial grass (*Arundo donax* L.) as a feedstock for thermo-chemical conversion to energy and materials. *Bioresource technology*, 188, 265-272.
- Sánchez, L. M. S., Serna, R. R., Ocampo, R. J., Ríos-Saucedo, J. C., Sigala-Rodríguez, J. Á., Carrillo, A., ... y Fernández, M. M. (2015). Optimización calorífica en especies

vegetales con potencial para la producción de biomasa dendroenergética en durango. *Agrofaz*, 15(1).

Stoof, C. R., Richards, B. K., Woodbury, P. B., Fabio, E. S., Brumbach, A. R., Cherney, J., ... y Steenhuis, T. S. (2015). Untapped potential: opportunities and challenges for sustainable bioenergy production from marginal lands in the northeast USA. *BioEnergy research*, 8(2), 482-501.

Takara, D., y Khanal, S. K. (2015). Characterizing compositional changes of Napier grass at different stages of growth for biofuel and biobased products potential. *Bioresource technology*, 188, 103-108.

Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., y Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rica tropical climates. *BioResources*, 10(1), 482-498.

Vargas, E., Sanchez, J. M., y Campabadal, C. (1993). Contenido proteico y mineral en los forrajes de las regiones Huetar norte y Atlántica de Costa Rica. Efecto de la época climática y el estado vegetativo 1. *Agronomía costarricense*, 17(2), 61-70.

Videira, S. S., e Silva, M. D. C. P., de Souza Galisa, P., Dias, A. C. F., Nissinen, R., Divan, V. L. B., ... y Salles, J. F. (2013). Culture-independent molecular approaches reveal a mostly unknown high diversity of active nitrogen-fixing bacteria associated with *Pennisetum purpureum*—a bioenergy crop. *Plant and soil*, 373(1-2), 737-754.

Wang, X., y Paterson, A. H. (2013). Comparative genomic analysis of C₄ photosynthesis pathway evolution in grasses. In *Genomics of the Saccharinae* (pp. 447-477). Springer New York.

Wang, C., Guo, L., Li, Y., y Wang, Z. (2012). Systematic comparison of C₃ and C₄ plants based on metabolic network analysis. *BMC systems biology*, 6(2), 1-14.