

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA**

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

**CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE
Leucaena leucocephala (LAM.) DE WIT DE
DISTINTAS PROCEDENCIAS
AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO**

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**



DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

CLAUDIO VITE CRISTÓBAL

Bajo la supervisión de: PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, Ph. D.



Chapingo, Estado de México, junio de 2020.

**CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE *Leucaena leucocephala* (LAM.) DE
WIT DE DISTINTAS PROCEDENCIAS AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO**

Tesis realizada por **CLAUDIO VITE CRISTÓBAL**, bajo la supervisión del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:

Ph.D. Pedro Arturo Martínez Hernández

ASESOR:

Dr. Enrique Cortés Díaz

ASESOR:

Dr. Ponciano Pérez Hernández

LECTOR EXTERNO:

Dr. José Manuel Palma García

Contenido

Lista de cuadros.....	li
Lista de figuras.....	v
Dedicatorias.....	viii
Agradecimientos.....	ix
Datos biográficos.....	x
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
Capítulo 1. Introducción general.....	1
Capítulo 2. <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit especie clave para una ganadería tropical sostenible con bovinos.....	8
Chapter 3. Seed and pod morphological diversity in the native mexican leucaena germplasm.....	35
Capítulo 4. Modelos cuantitativos desarrollados con variables no destructivas para la estimación del área foliar en <i>Leucaena leucocephala</i> ((Lam.) de Wit).....	48
Chapter 5. Environmental factors variation in fodder production and feed value of Mexican native <i>Leucaena leucocephala</i>	65

Lista de cuadros

Cuadro	Título	Pág.
2.1	Concentraciones ($\bar{x} \pm s$) de componentes nutrimentales (%) presentes en follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y forraje de gramíneas tropicales utilizadas en la alimentación de bovinos en sistemas silvopastoriles.....	13
2.2	Concentraciones de macro y microelementos ($\bar{x} \pm s$) del follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y forraje de gramíneas tropicales utilizadas en la alimentación de bovinos en sistemas silvopastoriles.....	16
2.3	Digestibilidad de componentes nutrimentales ($\bar{x} \pm s$) del follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y forraje de gramíneas tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles.....	17
2.4	Valores de selectividad de follaje y consumo de materia seca, nutrientes y agua ($\bar{x} \pm s$) de bovinos alimentados en sistemas silvopastoriles.....	18
2.5	Parámetros de productividad ($\bar{x} \pm s$) de bovinos para engorda alimentados con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y forraje de pastos tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles.....	20

Cuadro	Título	Pág.
2.6	Parámetros de productividad y calidad de leche ($\bar{x} \pm s$) de vacas alimentadas con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y forraje de pastos tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles.....	21
2.7	Parámetros reproductivos ($\bar{x} \pm s$) de vacas lecheras alimentadas con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Cynodon nlemfuensis</i> en sistemas silvopastoriles.....	22
2.8	Producción de metano ($\bar{x} \pm s$) por bovinos alimentados con diferentes niveles de inclusión de follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena</i> en la dieta.....	25
3.1	Geographic location, soil types and climatic conditions from sites where native mexican leucaena provenances were collected.....	38
3.2	Descriptive statistics including mean and standard deviation for pod and seed morphological traits in <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico.....	40
4.1	Significancia estadística de las áreas foliares calculadas con factor de ajuste y medidas con integrador, altura de planta y la radiación interceptada.....	54
5.1	Agronomic performance of <i>Leucaena leucocephala</i> plantation in response to different environmental factors.....	70
5.2	<i>In vitro</i> methane production and digestibility during 24 h of fermentation of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples in response to different environmental factors.....	72
5.3	Fermentative quality and <i>in vitro</i> digestibility during 72 h of fermentation of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples in response to different environmental factors.....	75

Cuadro	Título	Pág.
5.4	Chemical composition (%) and metabolizable energy content (Mcal kg ⁻¹ DM) of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples in response to different environmental factors.....	79
5.5	Macro (%) and trace (ppm) elements content of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples in response to different environmental factors.....	81

Lista de figuras

Figura	Título	Pág.
2.1	Follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena</i> a diferente densidad de población (A) y edad del rebrote de plantas establecidas (B).....	11
2.2	Follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de <i>Leucaena</i> a diferente altura de corte en plantas establecidas.....	11
3.1	Dendogram obtained from the cluster analysis for 149 collection sites of <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico.....	41
3.2	Orthogonal rotation for pod and seed morphological traits in <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico, angle selected with the "varimax" criterion, $\beta = -59.6^\circ$	42
3.3	Relationships between (correlation matrices) pod (X variables, upper-left) and seed (Y variables, upper-right) traits, and cross-correlation $X \times Y$ (bottom) in <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico.....	43
3.4	Cross-validation escore (CV, on the left) and barplot of canonical correlations (on the right) for pod and seed traits in <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico.....	44
3.5	Traits (on the left) and units (on the right) representations on the plane defined by the first two canonical variates for pod and seed traits in <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico.....	45

Figura	Título	Pág.
4.1	Temperatura media mensual máxima (T _{máx}) y mínima (T _{mín}) y precipitación (PP) mensual en Tepalcingo, Morelos, México, marzo-diciembre 2018, enero-febrero 2019 (a); y Tantoyuca, Veracruz, México, abril-diciembre 2018, enero-marzo 2019 (b)...	54
4.2	Dispersión del área foliar observada por planta (a) y residuales (b) con respecto de la estimada mediante el producto de longitud x ancho de hoja en plantaciones de Morelos y Veracruz. Modelo significativo (P < 0.0001).....	55
4.3	Modelos descriptivos de la cantidad de radiación interceptada (RI) medida como $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por procedencia en una plantación de Leucaena en las estaciones lluviosa (a) y de sequía (b). R ² = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Modelos significativos (P < 0.0001).....	56
4.4	Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar calculada mediante un factor de ajuste, en plantaciones de Leucaena en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R ² = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos (P < 0.0001).....	57
4.5	Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar medida con integrador, en plantaciones de Leucaena en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R ² = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos (P < 0.0001).	58

Figura	Título	Pág.
4.6	Modelos descriptivos de cambios en altura de planta en una plantación de <i>Leucaena</i> en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R^2 = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Ambos modelos fueron significativos ($P < 0.0001$).....	60
5.1	Methane produced during 24 h of fermented dry matter of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples in response to different growing season [(a): Drought and (b): Rainy], and growing site [(c): Morelos and (d): Veracruz].....	73
5.2	Effect of Growing season x Growing site (a), Growing season (b, rainy; c, drought) x Provenance, and Growing site (d, Morelos; e, Veracruz) x Provenance interactions on patterned curves of the <i>in vitro</i> total volume of gas produced of <i>Leucaena leucocephala</i> edible foliage samples during 72 h of fermentation.	77

Dedicatorias

A mi esposa, Juana Cruz Hernández. Porque el esfuerzo fue compartido, su paciencia, ánimo, comprensión y amabilidad fueron fundamentales para la meta lograda. No me queda más que agradecerle con unas líneas tomadas de P. Coelho: “No estoy casado con la misma persona desde hace más de una década. Es mentira. Ni ella ni yo somos los mismos, por eso nuestra relación continúa más viva que nunca. Yo no espero que ella se comporte como cuando nos conocimos. Ella tampoco desea que yo sea la misma persona que cuando nos encontramos. El amor está más allá del tiempo. Mejor dicho, el amor es el tiempo y el espacio en un solo punto, siempre transformándose”.

A Yessy Aymé, Carlos Augusto, Arturo y Mariela, mis hijos. Mi labor y la dedicación espero sean cultivados en sus personas y siempre sirvan de motivación para cumplir sus objetivos.

A mis padres: Beatriz y Zócimo †; a mis hermanos: Miriam, Alejandro, Carlos, Sixto, Raymundo, Benedicto, Gerardo y Obdulia. Gracias por guiarme, inspirarme y mostrarme el camino correcto.

A mis amigos, porque la amistad es uno de los valores más importantes que se puede tener en la vida. Los buenos amigos están para divertirnos, pero también para ayudarnos en momentos difíciles.

The perfect is the enemy of the good (Voltaire).

Agradecimientos

A la **Universidad Autónoma Chapingo** y al **Posgrado en Producción Animal**, por la oportunidad que me brindaron para tener una formación doctoral excelente y de alta calidad.

Al **Tecnológico Nacional de México** a través del **Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca**, por las facilidades otorgadas durante mis estudios para obtener el grado.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por el apoyo económico otorgado durante mis estudios, indispensable para culminar con éxito.

A los **Sres. Claudio y Cleotilde Benítez Cardozo**, por el espacio facilitado para el desarrollo del trabajo de campo en el ejido Limón, Tepalcingo, Morelos.

Mi más sincero agradecimiento a mis asesores y amigos, **Pedro Arturo Martínez Hernández, Ph. D.; Enrique Cortés Díaz, Dr. y Ponciano Pérez Hernández, Dr.**, por sus aportaciones para el desarrollo y finalización de esta investigación, y por las enseñanzas brindadas durante mi formación en la UACH.

A **José Manuel Palma García, Dr.**, quien fungió como lector externo y ayudó para afinar con detalle y atinadamente la presente investigación.

A **Danilo Pezo Quezada, Ph. D. y Cristóbal Villanueva Najarro, Ms. C.**, por su apoyo durante mi estancia en la Escuela de Posgrado y al Programa de Ganadería y Medio Ambiente (GAMMA) del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Datos biográficos



Datos personales

Nombre	Claudio Vite Cristóbal
Fecha de nacimiento	3 de junio de 1981
Lugar de nacimiento	Chicontepec, Veracruz
Matrícula cartilla militar	C-5232967
CURP	VICC810603HVZTRL07
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	4193531

Desarrollo académico

Doctorado en Ciencias (2016-2019)	DEIS en Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Maestría en Ciencias (2004-2005)	DEIS en Zootecnia Posgrado en Producción Animal Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura (1999–2003)	DEIS en Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo

Resumen

CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE *Leucaena leucocephala* (LAM.) DE WIT DE DISTINTAS PROCEDENCIAS AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO

Leucaena leucocephala (Leucaena) es una planta arbustiva, leguminosa y forrajera nativa de México distribuida en diferentes regiones agroclimáticas de este país, por lo que conviene analizar el estado del conocimiento en esta especie y caracterizar sus atributos agronómicos al variar la región agroclimatológica de procedencia; lo cual fue motivo de estudio de esta disertación doctoral. A partir del análisis de artículos científicos sobre los atributos agronómicos, ambientales y forrajeros se generó un banco de información que justifica la incorporación de esta especie en sistemas silovpastoriles tropicales encaminados a lograr la sostenibilidad ambiental y económica de empresas ganaderas, resaltando que existen oportunidades de investigación para superar limitantes agronómicas y nutricionales de la Leucaena. El estudio de la caracterización del fruto y la semilla mediante estadística multivariada determinó la relación de dependencia entre las características morfológicas de estas a partir de una colecta de 149 accesiones de diferentes regiones agroclimáticas de México, resaltando la importancia del recurso nativo mexicano para emprender programas de mejoramiento de Leucaena con fines comerciales. En plantación se determinaron modelos matemáticos que describen la dinámica del área foliar del cultivo para definir criterios de cosecha, permitiendo el desarrollo de herramientas prácticas que ayudan a la toma de decisiones en la cosecha del forraje. En campo se caracterizaron individuos de diferente origen agroclimatológico con base al rendimiento de biomasa comestible, atributos morfo-fisiológicos y calidad del forraje, sugiriendo opciones de germoplasma útiles en programas de selección de Leucaena para mejorar el rendimiento y la calidad del forraje comestible de empresas ganaderas en ambientes tropicales. En esta disertación doctoral se presenta una caracterización agronómica de gemoplasma nativo mexicano de Leucaena, generando información que permite diferenciar cualidades y limitaciones agronómicas entre individuos de diferente origen agroclimatológico.

Palabras clave: Germoplasma nativo, análisis de crecimiento, variación ambiental.

Abstract

AGRONOMIC CHARACTERIZATION OF *Leucaena leucocephala* (LAM.) DE WIT FROM DIFFERENT MEXICAN AGROCLIMATIC REGIONS

Leucaena leucocephala (Leucaena) is a shrub plant, Mexican native fodder legume, distributed across different agroclimatic regions of Mexico; thus, the analysis of the state of art on the management of this species and definition of agronomic attributes of individuals from different agroclimatological regions would provide information to design better cultural practices and to identify superior plant material; which was reason for study of this doctoral dissertation. From the analysis of scientific information on agronomic, environmental and forage attributes of Leucaena, it was concluded that Leucaena incorporation to tropical silovpastoral systems provides environmental and economic sustainability to livestock farms, highlighting that there are research opportunities to overcome some Leucaena agronomic and nutritional limitations. Fruit and pod analysis by multivariate statistics showed that some traits were related to the place of origin of the 149 accessions collected from different Mexican agroclimatic regions, highlighting the importance of the Mexican native resource to undertake programs of Leucaena improvement for commercial purposes. Mathematical models were developed to describe the dynamics of the leaf area accumulation, which could allow for decisions on when harvest. Differences were detected in browse biomass accumulation, morpho-physiological attributes and forage quality among individuals from different agroclimatological region, these differences suggest that there are germplasm options for selection programs to improve browse yield and quality of livestock in tropical environments. In this doctoral dissertation an agronomic characterization is presented of Mexican native gemoplasm of Leucaena which allows detection of agronomic qualities and limitations among individuals of different agroclimatological origin.

Key words: Native germplasm, growth analysis, environmental variation.

Doctoral Thesis in Livestock Innovation, Graduate Program in Animal Production,
Universidad Autónoma Chapingo
Author: Claudio Vite Cristóbal
Advisor: Pedro Arturo Martínez Hernández, Ph.D.

Capítulo 1. Introducción general

En México, las áreas tropicales secas y húmedas ocupan 24 y 32 millones de ha, de las cuales se utilizan para pastoreo más de 23 millones que producen 80% del forraje de temporal para pastoreo y representan un excelente recurso para aumentar la producción de alimentos para herbívoros (González-Rebeles, Gómez, & Galindo, 2015). Estos autores, también evidencian que la ganadería pastoril es la actividad económica más extendida y que depende de la producción de forraje, misma que se obtiene de las áreas de agostaderos naturales e inducidos (29.3%), praderas introducidas (41.3%), cultivos forrajeros (4.9%) y esquilmos o residuos de cosechas (23.9%).

El uso de sistemas silvopastoriles (SSP) eficientes, con alta biodiversidad y bienestar para los animales es promovido recientemente en la ganadería tropical (Broom, Galindo, & Murgueitio, 2013; González-Rebeles et al., 2015; Murgueitio, Barahona, Flores, Chará, & Rivera, 2016), basados en los sistemas agroforestales tradicionales como la etnoagroforestería (Moreno-Calles et al., 2014). Los SSP se caracterizan por la presencia de leñosas forrajeras como *Leucaena leucocephala* (leucaena o guaje), la especie más estudiada y promovida en distintos arreglos con los mayores resultados a nivel productivo en sistemas de producción pecuarios (Bacab, Madera, Solorio, Vera, & Marrufo, 2013; López-Vigoa et al., 2019), en los cuales destacó como alimento de buena aceptación por el ganado, con crecimiento acelerado en condiciones tropicales y tolerante a la sequía (Estrada, Esparza, Albarrán, Yong, & Rayas, 2018; González, 2013; González-García, Cáceres, Archimède, & Santana, 2009). El guaje, familia Fabaceae, subfamilia Mimosoideae, es de rápido crecimiento, de uno a cuatro metros de alto con hojas bipinadas (Zárate, 1994), crece en regiones secas o húmedas de clima cálido a templado (Broom et al., 2013; Cuartas et al., 2014), cultivada desde el centro y sur de México (Zárate, 1994; Zarate, 1999). La especie brinda múltiples

servicios ambientales (Bacab et al., 2013; Panhwar, 2005) y etnobotánicos (Zarate, 1999), aunque en ocasiones se convierte en maleza en terrenos cultivados (Panhwar, 2005).

Estudiar el comportamiento de *Leucaena leucocephala* nativa Mexicana en su etapa inicial de crecimiento resulta importante para establecer estrategias viables de propagación y establecimiento en el marco de los sistemas de producción animal (González-García et al., 2009; Medina, García, Moratinos, & Cova, 2011). En este sentido, ante la elevada presencia de leucaena nativa en el país y la lentitud con la que se logra el establecimiento después de la siembra como una limitante para la propagación masiva en los sistemas silvopastoriles es preciso evaluar el comportamiento agronómico sobre la base de algunos indicadores morfológicos y del rendimiento en condiciones de vivero y campo. Lo anterior es un tema de interés actual que da pauta para que el potencial forrajero de la leucaena nativa sea validado comparativamente con genotipos cultivados de la misma especie, lo que no ha sido suficientemente estudiado y fundamentado (Bacab et al., 2013; González, 2013). También es importante zonificar su presencia en el país, debido a que el estudio de la distribución de la especie es limitado para algunas regiones de la República Mexicana (Ahmed, Solorio, Ramírez & Al-Zyoud, 2016; Zarate, 1999).

Con base en lo anterior, el objetivo de este proyecto es determinar la caracterización agronómica de *Leucaena leucocephala* procedente de los estados de Morelos, Veracruz, Nuevo León y Colima, considerando características morfológicas, atributos de calidad de semilla y aportes del componente aéreo, para generar información que permita diferenciar cualidades y limitaciones agronómicas entre individuos de diferente origen agroclimatológico.

Hipótesis

Existe suficiente variabilidad entre características morfológicas, atributos de calidad de semilla y aportes del componente aéreo de accesiones de *L. leucocephala* nativas de México que empresas ganaderas podrían aprovechar como recurso forrajero local de calidad disponible para el ganado durante el año.

Objetivos

- Analizar la información científica sobre los atributos agronómicos, ambientales y forrajeros de la *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit para generar un banco de información que sirva de base para justificar la incorporación de esta planta en SSP tropicales encaminados a lograr la sostenibilidad ambiental y económica de empresas ganaderas con bovinos asentadas en ambientes tropicales.
- Determinar la relación entre ocho características morfológicas de la vaina y la semilla de 149 accesiones de *L. leucocephala* de diferentes regiones agroclimáticas de México, usando métodos de análisis multivariado.
- Validar modelos cuantitativos desarrollados a partir de variables no destructivas para describir la dinámica de acumulación del área foliar, interceptación de radiación y cambios en altura de planta en plantaciones de *L. leucocephala*.
- Evaluar la variación estacional, procedencia de la semilla y sitio de plantación en la producción y calidad nutricional del forraje de *L. leucocephala* nativa de México.

Estructura de la tesis

El **Capítulo 1** comprende la parte introductoria del proyecto de Disertación Doctoral, aporta la pertinencia y la justificación del objeto de estudio, que en este caso corresponde a la caracterización de *L. leucocephala* como recurso nativo de México con potencial forrajero para la ganadería en SSP.

En el **Capítulo 2** se presenta una revisión de literatura, donde se resumen la incorporación de leñosas en áreas forrajeras tropicales, la acumulación de follaje en *Leucaena*, la composición química del follaje de *L. leucocephala* (aporte nutrimental, alimentación, respuesta productiva y respuesta en calidad de leche y carne), la emisión de gases de efecto invernadero y los compuestos secundarios (efectos en consumo de materia seca y nutrientes, en la salud, en la reproducción y en la emisión de metano).

Con la finalidad de caracterizar el germoplasma de *L. leucocephala* nativo mexicano, en el **Capítulo 3** se estudiaron atributos relacionados con la morfología de la vaina y la semilla de cuatro procedencias de México (Colima, Morelos, Nuevo León y Veracruz) integradas por 149 sitios de colecta, lo cual fue posible usando métodos multivariados, en este caso: análisis de varianza multivariado, análisis de conglomerados, análisis de factor principal y análisis de correlación canónica regularizada.

En el **Capítulo 4** se presentan modelos cuantitativos desarrollados con variables no destructivas para la estimación del área foliar en *L. leucocephala*, esto ante la necesidad de validar la medición de área foliar directa en campo a partir de las variables no destructivas y de fácil medición, para luego asociar el desarrollo del área foliar con intercepción de radiación solar, altura de planta y

acumulación de follaje que a su vez permitan definir momentos de cosecha oportunos asociados a una mayor productividad de las plantaciones.

Finalmente, como un trabajo colateral relacionado con el objetivo central de la tesis, en el **Capítulo 5** se estudió la variación estacional (estaciones de crecimiento lluviosa y sequía), procedencia (Colima, Morelos, Nuevo León y Veracruz) y sitio de crecimiento (Morelos y Veracruz) en la producción y calidad nutricional del forraje comestible de *L. leucocephala* en comparación con la variedad comercial Cunningham también de distinta procedencia. Mediante este estudio fue posible la caracterización agronómica del gemoplasma nativo mexicano de *Leucaena*, generando información que permitió diferenciar cualidades y limitaciones agronómicas entre individuos de diferente origen agroclimatológico de México.

Literatura citada

- Ahmed, A. M. M., Solorio, F. J. S., Ramírez, L. A. & Al-Zyoud, F. (2016). Evaluar los enemigos naturales de *Leucaena Psyllid* y *Onion Thrips* en los procesos de cosecha en diferentes genotipos de *Leucaena*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 133-145.
- Bacab, H., Madera, N., Solorio, F., Vera, F., & Marrufo, D. (2013). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 67-81.
- Broom, D., Galindo, F., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceeding Research of Social B*, 280, 2013-2025.
- Cuartas, C. C., Naranjo, R. J., Tarazona, M. A., Murgueitio, R. E., Chará, O. J., Ku Vera, J., . . . Barahona, R. R. (2014). Contribution of intensive silvopastoral

- systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 27, 76-94.
- Estrada, L. I., Esparza, J. S., Albarrán, P. B., Yong, A. G., & Rayas, A. A. (2018). Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. *Ciencia Ergo-Sum*, 25(3), 1-13.
- González, J. (2013). Costos y beneficios de un sistema silvopastoril intensivo (SSPi), con base en *Leucaena leucocephala* (Estudio de caso en el municipio de Tepalcatepec, Michoacán, México). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 35-50.
- González-García, E., Cáceres, O., Archimède, H., & Santana, H. (2009). Nutritive value of edible forage from two *Leucaena leucocephala* cultivars with different habit and morphology. *Agroforestry Systems*, 77, 131-141.
- González-Rebeles, C., Gómez, F., & Galindo, F. (2015). Recursos naturales y uso de las tierras ganaderas en el trópico. En R. Rodríguez, Estado del arte sobre investigación e innovación tecnológica en ganadería bovina tropical (págs. 38-47). Ciudad de México: REDGATRO-CONACyT.
- López-Vigoa, O., Lamela-López, L., Sánchez-Santana, T., Olivera-Castro, Y., García-López, R., Herrera-Villafranca, M., & González-Ronquillo, M. (2019). Evaluación del valor nutricional de los forrajes en un sistema silvopastoril. *Pastos y Forrajes*, 42(1), 57-67.
- Medina, M. G., García, D. E., Moratinos, P., & Cova, L. J. (2011). Comparación de tres leguminosas arbóreas sembradas en un sustrato alcalino durante el período de aviveramiento. II. Patrón de crecimiento y distribución de la biomasa. *Pastos y Forrajes*, 34(2), 167-178.
- Moreno-Calles, A. I., Galicia-Luna, V. J., Casas, A., Toledo, V. M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D. & Camou-Guerrero, A. (2014). La etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*, 12(3), 1-16.

- Murgueitio, R., Barahona, R., Flores, E., Chará, O., & Rivera, H. (2016). Es posible enfrentar el cambio climático y producir más leche y carne con sistemas silvopastoriles intensivos. *Ceiba*, 54, 23-30.
- Panhwar, F. (2005). *Leucaena* - Adaptation, quality and cultural practices in Pakistan. ChemLin. Digitalverlang GmbH, Germany: Virtual Library Chemistry.
- Zárate, P. S. (1994). Revisión del género *Leucaena* en México. *Instituto de Biología, Universidad Autónoma de México, Serie Botánica*, 65(2), 83-162.
- Zarate, P. S. (1999). Ethnobotany and domestication process of *Leucaena* in Mexico. *Journal of Ethnobiology*, 19(1), 1-26.



Revisión [Review]

Leucaena leucocephala* (LAM.) DE WIT ESPECIE CLAVE PARA UNA PRODUCCIÓN BOVINA SOSTENIBLE EN EL TRÓPICO†*[*Leucaena leucocephala* (LAM.) DE WIT A KEY SPECIES FOR A SUSTAINABLE BOVINE PRODUCTION IN TROPIC]**

P. A. Martínez-Hernández¹, E. Cortés-Díaz¹, R. Purroy-Vásquez², J. M. Palma-García³; P. P. Del Pozo-Rodríguez⁴ and C. Vite-Cristóbal^{1,2,*}

¹Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 carretera México-Texcoco, C.P. 56230, Texcoco, Estado de México. Email: cvitec81@hotmail.com, pedroarturo@correo.chapingo.mx, ecodia@yahoo.com.mx

²Posgrado en Producción Pecuaria Tropical, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca. Desv. Lindero-Tamete S/N, Col. La Morita, C.P. 92100, Tantoyuca, Veracruz. Email: rubenpurroy2000@gmail.com

³Colegio Mexicano de Agroforestería Pecuaria A. C., Centro Universitario de Investigación y Desarrollo Agropecuario, Universidad de Colima. Colima, Colima. Email: palma@ucol.mx

⁴Depto. Producción Animal. Facultad de Medicina Veterinaria. Universidad Agraria de la Habana "Fructuoso Rodríguez". Apartado 18. San José de las Lajas, La Habana, Cuba. Email: delpozo@unah.edu.cu

*Corresponding author

RESUMEN

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit (Leucaena) es una leguminosa leñosa de uso amplio como forraje en la ganadería bovina tropical por su adaptación y productividad en este ambiente. La revisión discute beneficios de incorporar Leucaena en la alimentación de bovinos en comparación con gramíneas tropicales en monocultivo, entre los beneficios están: menor emisión de metano (CH₄); mayor consumo de proteína, ácidos grasos Ω_3 y minerales; incorporación de N atmosférico al complejo suelo-planta-animal; y, mayor eficiencia de uso del N por el bovino. La mimosina y una concentración mayor al 5% de taninos condensados pueden generar trastornos digestivos en el bovino, por lo que se debe ejercer control en el nivel de consumo del follaje y desarrollar genotipos de Leucaena con niveles bajos de estos compuestos. Los sistemas silvopastoriles son una opción para incorporar Leucaena a la dieta de bovinos pastoreando, el arreglo silvopastoril de pastura en callejones ha mostrado una mayor producción animal que los arreglos de árboles dispersos y banco forrajero. La oferta de forraje para el bovino puede incrementarse hasta en 8.7 t de MS ha⁻¹ año⁻¹ al incorporar Leucaena en un sistema silvopastoril en arreglo de pastura en callejones, este forraje adicional puede tener de 22 a 25% y de 55 a 61%, de proteína cruda y digestibilidad *in vitro* de la materia seca, respectivamente. La incorporación planificada de Leucaena en áreas de pastoreo ha demostrado mantener niveles de 9.1 a 9.8 kg de leche vaca⁻¹ día⁻¹ o 11957 a 14403 kg de leche ha⁻¹ año⁻¹; y, de 693 a 851 g de ganancia de peso animal⁻¹ día⁻¹ o 788 a 1337 kg de ganancia de peso ha⁻¹ año⁻¹. La incorporación planificada de Leucaena mejora la productividad de empresas ganaderas de bovinos asentadas en ambiente tropical con un menor impacto ambiental en comparación con empresas basadas en el aprovechamiento de praderas de gramíneas tropicales; sin embargo, existen oportunidades de investigación para superar limitantes agronómicas y nutricionales de la Leucaena.

Palabras clave: Fabaceae; silvopastoril; leñosas forrajeras.

SUMMARY

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit (Leucaena) is a woody fodder legume with extensive use as livestock feed in the tropics because of its adaptation and productivity in tropical environments. This review discusses benefits of Leucaena as feed for bovines in relation to tropical grasses, among these benefits are: lower methane (CH₄) emission; higher intake of protein, Ω_3 fatty acids and minerals; incorporation of atmospheric nitrogen (N₂) to the soil-plant-animal chain; and, higher N efficiency by the bovine. Mimosine and concentration of condensed tannins above 5% might cause digestive disorders in bovines, then Leucaena intake has to be controlled and use of Leucaena populations with lower mimosine and condensed tannins concentrations. Silvopastoral systems are an option to have Leucaena available for grazing cattle, row tree planting has shown higher animal production than scattered trees and cluster.

† Submitted October 11, 2018 – Accepted April 30, 2019. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462

Silvopastoral system with *Leucaena* can increase total available forage by 8.7 t of DM ha⁻¹ yr⁻¹, this additional forage can have 22 to 25% and 55 to 61% crude protein and *in vitro* dry matter digestibility, respectively. Planned incorporation of *Leucaena* to the grazing areas has shown to yield 9.1 to 9.8 kg of milk cow⁻¹ day⁻¹ or 11957 to 14403 kg milk ha⁻¹ yr⁻¹; and, 693 to 851 g of live-weight gain animal⁻¹ day⁻¹ or 788 to 1337 kg of live-weight ha⁻¹ yr⁻¹. *Leucaena* inclusion on grazing areas improves livestock productivity in tropical areas with lower environmental impact than tropical grasses alone; however, more research is needed to overcome some *Leucaena* agronomic and nutritional limitations.

Keywords: Fabaceae; silvopastoral; fodder shrub.

INTRODUCCIÓN

La ganadería tropical sostenible con bovinos es el reto de producir de forma rentable satisfactores pecuarios en un ambiente de conservación de los recursos naturales y coexistencia con organismos diversos para lograr ecosistemas saludables (Clavero, 2011; Broom *et al.*, 2013; Cortez *et al.*, 2016; Murgueitio *et al.*, 2016). Debido a los beneficios que ésta ganadería ofrece al ecosistema, incluido el aprovechamiento de recursos forrajeros autóctonos e introducidos, se le ha señalado como una alternativa a los sistemas convencionales de producción tropical con bovinos con uso exclusivo de praderas de gramíneas tropicales C₄, que liberan al ambiente grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI), en específico CH₄ originado en la fermentación ruminal de la fibra digestible (Bunglavan, 2014; Molina *et al.*, 2016; Morales-Velasco *et al.*, 2016) además de que estas gramíneas son muy exigentes en nitrógeno externo para mantener sus niveles de producción de forraje (Clavero, 2011; Osechas *et al.*, 2008).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son arreglos planificados de áreas forrajeras con leñosas, herbáceas y herbívoros domésticos; las leñosas son arbustos y árboles forrajeros y no forrajeros, las herbáceas son de diferentes familias botánicas destacando gramíneas y leguminosas; son una alternativa a las praderas de gramíneas tropicales para lograr una ganadería tropical sostenible con bovinos, debido a que su diseño responde a principios agro-ecológicos como: dosel vegetal estratificado para la máxima conversión de energía solar a biomasa vegetal, captura e introducción del N₂ atmosférico al conjunto suelo-planta-animal, menor erosión hídrica y máxima retención y uso del agua en suelo, mejoramiento de las condiciones físicas y biológicas del suelo, reciclaje de nutrientes, mayor biodiversidad al proveer hábitat a organismos diversos (Murgueitio *et al.*, 2015b); menor uso de insumos externos a la empresa ganadera para la alimentación y bienestar del ganado y producción de forraje (González, 2013; Ávila y Revollo, 2014; Soca *et al.*, 2007; López-Vigosa *et al.*, 2017); y, contrarrestar el impacto ambiental negativo que genera la emisión de CH₄ y N₂O por la ganadería (Shelton y Dalzell, 2007; Barahona *et al.*, 2014; Molina *et al.*, 2013; 2016).

Centroamérica aporta 1.12% de la superficie mundial con SSP de diferente conformación que implica una superficie de 9.2 millones de ha (Kumar *et al.*, 2014), en México organizaciones interesadas se han fijado la meta de establecer SSP en no menos de 12 mil ha en quince estados (Murgueitio *et al.*, 2015b). Estas estadísticas permiten señalar la importancia en el avance e interés por los SSP como una opción hacia una ganadería tropical sostenible.

Para diseñar un SSP tropical es amplia la información científica sobre gramíneas y leguminosas herbáceas tropicales; sin embargo, en comparación, es escasa y dispersa la información sobre los atributos ambientales, agronómicos y forrajeros de especies leñosas que se puedan incorporar en algún arreglo de un SSP. En la revisión presente se reúne y analiza información sobre *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit una de las especies leñosas que ha mostrado entre otros atributos una gran versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trópico, alta incorporación de N₂ atmosférico al conjunto suelo-planta-animal y proveer de forraje abundante y de calidad al bovino.

El objetivo de la revisión es el análisis de la información científica sobre los atributos agronómicos, ambientales y forrajeros de la *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit para generar un banco de información que sirva de base para justificar la incorporación de esta planta en SSP tropicales encaminados a lograr la sostenibilidad ambiental y económica de empresas ganaderas con bovinos asentadas en ambientes tropicales.

INCORPORACIÓN DE LEÑOSAS EN ÁREAS FORRAJERAS TROPICALES

A partir de resultados de investigaciones en que se identificó y evaluó la ingesta de bovinos y otras especies domésticas y silvestres pastoreando en diferentes tipos de vegetación, se concluyó que el follaje de diferentes leñosas (árboles y arbustos) era usado como forraje y en varios casos la calidad de lo ingerido era igual o superior al forraje consumido a partir de gramíneas tropicales por lo que convendría integrar estas leñosas a las áreas forrajeras con el propósito de proveer de forraje complementario en cantidad y calidad además, de ejercer otras funciones ambientales como la de dar protección a los animales en pastoreo (Murgueitio *et al.*, 2011).

Entre las leñosas con potencial forrajero han destacado como grupo las leguminosas debido a su distribución cosmopolita, de media a alta concentración de proteína cruda y de materia seca digestible en follaje, rendimiento de forraje de medio a alto en comparación a otros grupos taxonómicos, promueven mayor producción del animal que consume el follaje y una tasa alta de rebrote (Aguirre, 2013). Las leñosas leguminosas son una vía de entrada al ecosistema del N₂ atmosférico en una forma aprovechable tanto para la leguminosa como para otros componentes vegetales del SSP y del animal que consume el follaje de estas especies (Ørskov, 2005; Sierra y Nygren, 2006; Sánchez *et al.*, 2010), además este aporte de nitrógeno al sistema promueve la recuperación y enriquecimiento de suelos degradados por sobre uso agrícola o ganadero (Ibrahim *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2010).

En algunos sitios las leñosas leguminosas forrajeras son un recurso autóctono por lo que su propagación es una forma de restaurar paisajes originales y la biodiversidad original del ecosistema (Palma, 2006; García *et al.*, 2008b; Cortez *et al.*, 2016). En condiciones tanto naturales como inducidas por la intervención humana, los bovinos procuran consumir follaje de leñosas leguminosas que estén a su alcance, esta apetencia por el follaje también implica el consumo de un forraje de mayor calidad al que podrían obtener a partir de gramíneas tropicales (Toral e Iglesias, 2008; Pinto *et al.*, 2014).

La selección y consumo del follaje de algunas leñosas leguminosas forrajeras por bovinos en preferencia al follaje de otras leñosas forrajeras ha servido como guía para la identificación y seguimiento de leñosas leguminosas forrajeras con mayor potencial de mejorar la producción animal a partir de SSP (Toral e Iglesias, 2008; García *et al.*, 2008b; Aguirre, 2013). Varias son las especies leñosas leguminosas forrajeras evaluadas agrónomicamente como en términos de producción animal, con amplia variabilidad en las respuestas a los manejos específicos aplicados. Entre las especies pueden mencionarse: *Acacia angustissima*, *A. cochliacantha*, *A. pennatula*, *Albizia lebbbeck*, *Bauhinia purpurea*, *Caesalpinia cocalaco*, *Cajanus cajan*, *Calliandra calothyrsus*, *C. houstoniana*, *Chloroleucon mangense*, *Cratylia argentea*, *Diphyssa carthagenensis*, *Erythrina berteroana*, *E. americana*, *E. mexicana*, *E. poeppigiana*, *E. tinifolia*, *Gliricidia sepium*, *Leucaena brachycarpa*, *L. esculenta*, *L. leucocephala*, *L. lanceolata*, *L. macrophylla*, *Lysiloma acapulcense*, *L. auritum*, *L. divaricatum*, *Mimosa nigra*, *Pithecellobium pedicellare*, *Samanea saman* y *Senna atomaria* (Palma, 2006; Ibrahim *et al.*, 2007; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2007, 2008b; Ramírez *et al.*, 2007; Toral e Iglesias, 2008; García *et al.*, 2008b; Bautista-Tolentino *et al.*, 2011; Cortez *et al.*, 2016).

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit. referida con diferentes nombres comunes uno de ellos el de Leucaena, que será usado a lo largo del texto de este artículo, ha destacado entre las leñosas leguminosas forrajeras y leñosas de otras familias y especies, por sus mayores atributos agronómicos y de fomento a la producción animal (Shelton, 2001) algunos de estos atributos son mayor rendimiento de biomasa aérea, concentración de nutrimentos en hojas, flexibilidad de las ramas, cantidad de N₂ atmosférico incorporado al sistema suelo-planta-animal, tolerancia a la sequía, rebrote vigoroso, aceptación por los bovinos, persistencia en campo y accesibilidad para el ramoneo (Toral e Iglesias, 2008; Bacab *et al.*, 2013; Murgueitio *et al.*, 2015a; 2016). Las bondades agronómicas y de producción animal de la Leucaena la hacen una de las especies de amplio uso para la conformación de SSP y a la par ha tenido una historia desde 1960 de desarrollo de variedades para superar condiciones ambientales específicas (ataque de insectos, tolerancia a bajas temperaturas, etc.) como ejemplo las variedades siguientes: Cunningham, K8, K28, K67, K636, y los híbridos KX2 y KX3; para mejorar el rendimiento y la tolerancia a insectos y al frío (Brewbaker, 1995).

ACUMULACIÓN DE FOLLAJE EN LEUCAENA

Uno de los atributos agronómicos para calificar la conveniencia forrajera de uso de alguna especie vegetal es la cantidad de forraje que dicha especie es capaz de producir, por lo que es uno de los indicadores que se ha estudiado en Leucaena distinguiendo factores que influyen sobre esta capacidad. En la América tropical se ha demostrado que la cantidad de follaje (forraje conformado por hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) producido por Leucaena depende de la densidad de plantación entre las 3 y 80 mil plantas ha⁻¹ (Figura 1A) y la edad del rebrote en plantas ya establecidas (Figura 1B). La cantidad de follaje incrementa de forma logarítmica al aumentar la densidad de población hasta las 60 mil plantas ha⁻¹, por arriba de esta densidad la cantidad de follaje muestra pequeñas mejoras; la relación con edad del rebrote es de tipo cuadrática con un máximo a los 74 días de rebrote en que alcanza una cantidad de follaje acumulada de 6.8 t MS ha⁻¹. Los rendimientos de follaje de Leucaena pueden mantener las relaciones ya descritas, sin embargo, la magnitud exacta puede variar en respuesta a otros factores como la edad de la planta, tamaño de copa, diámetro del fuste y otras medidas dasométricas (Aleixo *et al.*, 2008; Nívar-Cháidez *et al.*, 2013).

La altura de corte con respecto del nivel del suelo tiene poco efecto sobre la supervivencia de las plantas establecidas de Leucaena, mientras que esta altura esté entre los 20 a 60 cm del nivel suelo (Bacab *et al.*, 2012);

sin embargo, la altura de corte influye bajo una relación cuadrática sobre la cantidad de follaje cosechada en cada momento y a través de cosechas sucesivas (Figura 2). Cortar por arriba de 66 cm del suelo reduce la cantidad total de follaje cosechado, por permitir una alta proporción de tallos maduros. La altura de corte está estrechamente relacionada con la frecuencia de corte, ya que la *Leucaena* logra una cantidad de follaje cosechable a partir de los 45 días de rebrote. Los rendimientos de follaje pueden mantenerse entre 6 a 8 t MS ha⁻¹ corte⁻¹ cuando la altura de corte se mantiene entre 50 a 70 cm de altura (López-Vigoa *et al.*, 2017).

La frecuencia de cosecha de follaje para lograr altos rendimientos y persistencia de plantas puede variar con respecto de la estrategia de cosecha aplicada, por ejemplo, en cosecha directa por ramoneo del animal, si la presencia del ganado en el área donde están las plantas se controla para que no sea mayor a cuatro días consecutivos, la *Leucaena* puede soportar una frecuencia de cosecha de 30 a 40 días (Osechas *et al.*, 2008); sin embargo, con cosecha por corte total de la planta, la frecuencia de cosecha es de 180 días o mayor para mantener el rendimiento por corte y supervivencia de las plantas (Casanova-Lugo *et al.*, 2010).

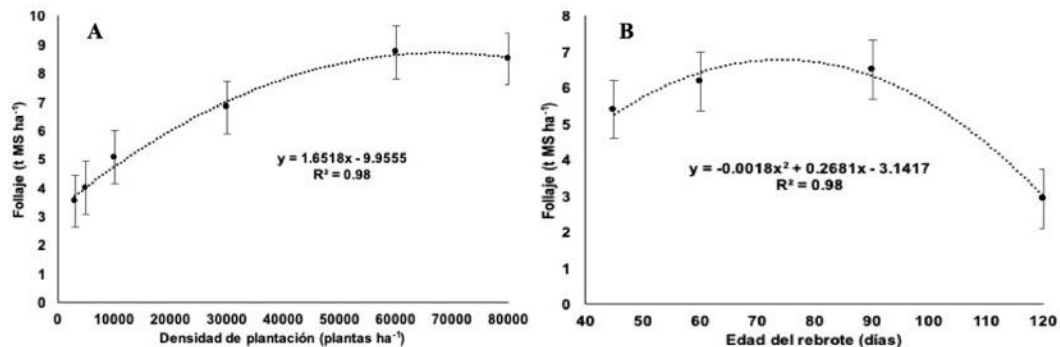


Figura 1. Follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena* a diferente densidad de población (A) y edad del rebrote de plantas establecidas (B). Regresiones a partir de datos publicados por: Lamela *et al.* (2009), Ortega *et al.* (2009), Rivas *et al.* (2009), Sánchez *et al.* (2008, 2010), Benítez-Bahena *et al.* (2010), Casanova-Lugo *et al.* (2010, 2014), Petit *et al.* (2010), Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez (2011), Bacab *et al.* (2012), Naranjo *et al.* (2012), Anguiano *et al.* (2013), Valarezo y Ochoa (2014), López *et al.* (2015), Reyes *et al.* (2015) y Román-Miranda *et al.* (2016).

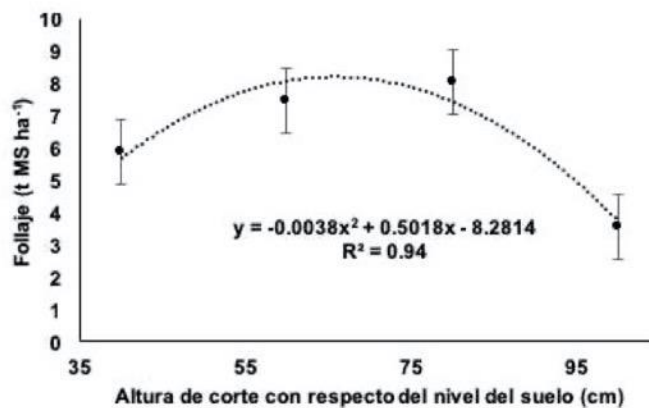


Figura 2. Follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena* a diferente altura de corte en plantas establecidas. Regresión a partir de datos publicados por: Lamela *et al.* (2009), Rivas *et al.* (2009), Sánchez *et al.* (2008), Casanova-Lugo *et al.* (2010, 2014), Petit *et al.* (2010), Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez (2011), Bacab *et al.* (2012) y Román-Miranda *et al.* (2016).

LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FOLLAJE DE *L. leucocephala*

APORTE NUTRIMENTAL

El arreglo de las plantas de *Leucaena* dentro del área forrajera determina la concentración nutricional del follaje producido. El arreglo en callejón (PC) mostró follaje con mayores contenidos de proteína (PB) y energía (EB) brutas y menores de alcaloides (ALC), lignina (LIG) y fibras detergentes ácido (FDA) y neutro (FDN) que los arreglos de árboles dispersos en los potreros (ADP) y banco forrajero (BF) (Cuadro 1). El arreglo en PC permite que los bovinos cosechen homogéneamente las plantas de *Leucaena* y con ello el rebrote también lo será, en los arreglos ADP y BF la cosecha y por tanto el rebrote son heterogéneos ocasionando que la calidad del follaje sea variable, en un mismo momento habrá hojas con madurez avanzada y otras muy jóvenes. La cosecha homogénea de las *Leucaenas* en PC se explica por el espaciado constante entre y dentro de hileras de *Leucaena*, al mismo tiempo que da espacio para que el bovino pueda cosechar fácilmente el follaje.

En el arreglo PC además de la mayor calidad del follaje de *Leucaena*, la gramínea acompañante puede incrementar hasta en 7 y 36% los contenidos de proteína y grasa brutas, respectivamente, con respecto de los otros arreglos y de la pradera monófitas de gramíneas (Cuadro 1). La mejora en la gramínea podría originarse, entre otros factores, a una distribución más homogénea sobre todo el terreno del nitrógeno capturado por la *Leucaena* y de condiciones microclimáticas como menores radiación solar directa y velocidad del viento que podría implicar hojas con menor carga de elementos estructurales (Ørskov, 2005; Sierra y Nygren, 2006; Sánchez et al., 2010).

La *Leucaena* en PC registra hasta 2.7 más PB que gramíneas tropicales (Cuadro 1), por tanto, el bovino puede consumir una dieta hasta con tres veces más proteína al pastorear en praderas con *Leucaena* en comparación a praderas monófitas de gramíneas tropicales. El consumo de *Leucaena* puede asegurar que el bovino en pastoreo ingiera una dieta con al menos 7% de PB, concentración mínima necesaria para el funcionamiento ruminal (Minson, 1990; Piñeiro-Vázquez et al., 2017; Sierra et al., 2017). Los bovinos pastoreando en SSP con *Leucaena* tuvieron acceso a un forraje con mayor PB que pastoreando praderas monófitas de diferentes especies de gramíneas tropicales (Gómez et al., 2006; Chakaredza et al., 2007; García et al., 2008a; Martínez et al., 2016).

El follaje de *Leucaena* en SSP muestra menores FDN y FDA que las gramíneas tropicales (Cuadro 1) por lo que el bovino pastoreando un SSP con *Leucaena*

consumirá menor cantidad de carbohidratos estructurales pero suficiente fibra para mantener la funcionalidad del rumen; los contenidos de FDN y FDA en *Leucaena* han sido de 21 a 55% y de 30 a 50% menores, respectivamente, que en gramíneas tropicales (Gómez et al., 2006; Petit et al., 2011; Sierra et al., 2017); la dieta de bovinos con ramoneo de *Leucaena* mostró menor fibra que la de bovinos pastoreando gramíneas tropicales (Rossi et al., 2008). Para condiciones tropicales diferentes los animales con posibilidad de ramonear lograron dietas menores en fibra que aquellos pastoreando únicamente gramíneas (López-Vigora et al., 2017). Piñeiro-Vázquez et al. (2017) encontraron que con follaje de *Leucaena* de edad avanzada la lignina fue muy alta y la dieta consumida era similar en fibra que la obtenida de gramíneas tropicales como *Cenchrus purpureum*; sin embargo, la digestibilidad y el consumo voluntario fueron mayores en la dieta con *Leucaena* (Tarazona et al., 2013; Piñeiro-Vázquez et al., 2017; Sierra et al., 2017).

Además del contenido de PB al evaluar la calidad de un forraje, se debe determinar la proporción de la PB que es o no degradada en rumen, la proteína de sobrepaso es la proporción no degradada en rumen y es importante porque promueve una absorción más eficiente de aminoácidos (AA) en intestino delgado (Church et al., 2002) sobre todo si es de mayor valor biológico que la proteína microbiana (Galindo et al., 2009). Soltan et al. (2012) encontraron que *Leucaena* registró 4.2 veces menos y 1.3 veces más PB degradable en rumen (PBDR) y no degradable en rumen (PBNDR) respectivamente que la gramínea tropical Tifton-85 (*Cynodon spp.*), señalando que el impacto positivo de incorporar *Leucaena* en la dieta del bovino no solo depende del contenido total de PB sino también del aporte de proteína de sobrepaso.

La proporción relativamente alta de PBNDR en *Leucaena* se ha explicado por la presencia en las hojas de taninos que son compuestos orgánicos polifenólicos de peso molecular y complejidad variables capaces de ligarse a las proteínas, evitando que sean desdobladas por las exoenzimas bacterianas del rumen (González et al., 2006a; Galindo et al., 2009; Goel y Makkar, 2012; Saminathan et al., 2014). Los taninos se clasifican en: hidrolizables o precipitantes (TH) y condensados (TC), concentraciones de TC en dieta de 5% o mayores pueden provocar efectos adversos en la producción y estado de salud del animal que los ingiere al inhibir las actividades de algunas enzimas y funciones del epitelio intestinal (Otero e Hidalgo, 2004; González et al., 2006a; Goel y Makkar, 2012; Barros-Rodríguez et al., 2014) y por reducir la disponibilidad en rumen de nitrógeno amoniacal necesario en la síntesis de proteína microbiana (Clavero, 2011).

Cuadro 1. Concentraciones ($\bar{x} \pm s$) de componentes nutrimentales (%) presentes en follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y forraje de gramíneas tropicales utilizadas en la alimentación de bovinos en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	Componente nutrimental ²																Fuente
	MS	MO	CEN	PB	GB	FDN	FDA	ELN	TH	TC	M	ALC	LIG	CEL	HEM	EB	
Leucaena en SSP																	
ADP	28.4±9.1 (2)	91.5±3.3 (10)	8.5±3.3 (10)	22.3±4.3 (13)	5.4±4.3 (3)	42.9±14.7 (13)	26.5±11.2 (11)	32.0 (1)		4.8±4.0 (7)		0.65 (1)	13.8±8.3 (5)	23.9 (1)	19.1±6.4 (2)	4.2 (1)	México (66), Colombia (13), Nicaragua (7), Brasil (7) y Egipto (7)
BF	24.2±2.0 (9)	92.0±1.7 (14)	8.0±1.7 (14)	24.6±3.8 (22)	2.3±1.4 (2)	44.1±9.8 (16)	27.2±9.1 (15)	36.3±0.1 (2)	2.4±1.1 (6)	3.3±1.2 (9)	2.1±1.2 (8)	0.29 (1)	10.9±2.9 (11)	11.1±1.1 (6)	23.2±0.0 (2)	4.3±0.3 (3)	Cuba (35), México (17), Venezuela (17), Brasil (9), Malasia (9), Australia (4), Ecuador (4) y EEUU (4)
PC	28.2±5.1 (10)	91.3±2.1 (13)	8.4±1.3 (13)	24.9±2.4 (22)	2.9±1.4 (11)	36.0±7.6 (15)	24.5±6.9 (16)		1.9 (1)		5.4 (1)	0.09 (1)	9.1±3.8 (5)	11.0±5.8 (3)	21.4±6.5 (4)	4.6±0.1 (7)	Colombia (45), México (23), Cuba (14), Venezuela (14) y Costa Rica (4)
Gramíneas en SSP																	
ADP	21.1±1.7 (2)	90.2±0.4 (3)	9.8±0.4 (3)	8.8±1.2 (3)	1.2±0.0 (2)	66.4±3.0 (3)	35.8±0.8 (3)	11.9±0.1 (2)					5.1±1.3 (3)			3.7±0.1 (2)	Colombia (50) y EEUU (50)
PC	28.2±5.6 (10)	88.1±2.5 (14)	11.7±2.2 (14)	9.6±1.7 (23)	1.5±0.6 (13)	70.0±4.6 (16)	41.5±6.5 (17)						5.8±0.4 (5)	29.1±0.7 (3)	30.5±4.8 (4)	4.1±0.1 (10)	Colombia (55), México (25), Cuba (15), Venezuela (10) y Costa Rica (5)
Convencional																	
GM	22.7±9.6 (5)	90.5±2.2 (3)	9.8±1.5 (3)	9.0±1.9 (29)	1.1±0.3 (3)	69.7±3.5 (24)	40.3±5.7 (24)						7.2±0.9 (16)	30.2 (1)	31.1 (1)	4.0±0.1 (2)	México (38), Colombia (25), Venezuela (13), Australia (6), Brasil (6), Costa Rica (6) y Cuba (6)

¹SSP= Sistemas silvopastoriles, ADP= Árboles dispersos en potreros, BF= Banco forrajero, PC= Pautura en callejones y GM= Gramíneas en monocultivo

²MS= Materia seca, MO= Materia orgánica, CEN= Cenizas, PB= Proteína bruta, GB= Grasa bruta, FDN= Fibra detergente neutro, FDA= Fibra detergente ácido, ELN= Extracto libre de nitrógeno, TH= Taninos hidrolizables, TC= Taninos condensados, M= Mimosina, ALC= Alcanos o alélicos, LIG= Lignina, CEL= Celulosa, HEM= Hemicelulosa y EB= Energía bruta

*Ayala-Burgos et al. (2006), Gómez et al. (2006), González et al. (2006a), Bobadilla-Hernández et al. (2007), Ramírez et al. (2007), Jiménez-Ferrer et al. (2008a), Zapata et al. (2009), Vivas et al. (2011), Soltan et al. (2012, 2013), Pérez et al. (2013), Tarazona et al. (2013), Cortez et al. (2016) y Naranjo et al. (2016)

[†]Kanani et al. (2006), Vergara et al. (2006), Razz y Clavero (2007), García et al. (2008a,b,c,d; 2009), Galindo et al. (2008), Sánchez y Faria (2008), Petit et al. (2011), Verdecia et al. (2012; 2014), Timoco-Magaña et al. (2012), Casanova-Lugo et al. (2014), Valarezo y Ochoa (2014), Zaky et al. (2014), Harrison et al. (2015), Ilham et al. (2015), Piñero-Vázquez et al. (2016) y Soltan et al. (2016)

[‡]Faria y Sánchez (2007), Jiménez (2007), Sánchez et al. (2007; 2010), Bugarín et al. (2009), Lamela et al. (2009), Benítez-Bahena et al. (2010), Sánchez et al. (2010), Cuartas et al. (2013; 2015), Molina et al. (2013; 2015), Barahona et al. (2014), Peniche-González et al. (2014), Gaviria et al. (2015), Gaviria-Urbe et al. (2015), López et al. (2015), Martínez et al. (2016), Santiago et al. (2016) y Sierra et al. (2017)

[§]Vergara et al. (2006), Jiménez (2007), Razz y Clavero (2007), Jarillo-Rodríguez et al. (2011), Ortega-Gómez et al. (2011), Paculillo et al. (2011), Timoco-Magaña et al. (2012), Cuartas et al. (2013; 2015), Molina et al. (2013; 2015), Muñoz-González et al. (2016), Harrison et al. (2015), Reyes et al. (2015), Naranjo et al. (2016) y Piñero-Vázquez et al. (2016)

Dietas con no más de 2.0% de TC promueven en bovinos una mayor o más eficiente producción de leche (PL) o ganancia de peso debido a un incremento en el aporte de PBNDR al intestino lo que aumenta la tasa de absorción de AA esenciales (Otero e Hidalgo, 2004; Clavero, 2011), reducción en la incidencia de timpanismos subclínicos y clínicos (Min *et al.*, 2006; Barros-Rodríguez *et al.*, 2014; Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017) y aumento de la eficiencia del reciclaje de urea en rumen por menores concentraciones de amonio ruminal y ácidos grasos volátiles (Otero e Hidalgo, 2004).

Bobadilla-Hernández *et al.* (2007) señalaron que la mayor PL en vacas consumiendo follaje de *Leucaena* respondió entre otros factores a las concentraciones de 4% o menores de TC en el follaje, en vaquillas estos niveles de TC no afectaron negativamente el metabolismo del N (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2016) por lo que se descartó que los TC a un nivel no mayor al 4% en el follaje de *Leucaena* pudiese perturbar la actividad reproductiva de la vaca. Esta mejora en PL se atribuye a que los TC forman complejos con la proteína y los carbohidratos que provoca incremento en el tiempo de retención de las fracciones de fibra (Silanikove *et al.*, 1996; Huang *et al.*, 2011; Saminathan *et al.*, 2014), con ello mayor producción de acetato (Bodas *et al.*, 2008) destinado a la formación de leche. En tanto, la actividad reproductiva fue observada a través de una reducción en la tasa de gestación asociada con la ingesta de AA no proteínicos de la mimosina y el efecto tóxico de sus metabolitos 3,4-DHP y 2,3-DHP, cuando las vacas consumieron más del 30% de *Leucaena* en la dieta en base seca (Jones *et al.*, 1989). Esta reducción de la fertilidad se asoció con la producción en exceso de NH_3^+ durante la fase luteal del ciclo estral derivado del metabolismo de los AA, lo que genera una reducción del pH uterino, baja concentración de progesterona e incremento de la secreción de $\text{PGF}_2\alpha$, complicando los primeros estadios del desarrollo embrionario (Butler, 1998). Sánchez *et al.* (2007; 2008) y Sánchez y Faria (2008; 2013) mencionan que la concentración de TC en el follaje de *Leucaena* dependen del estado de desarrollo de la planta y de las condiciones ambientales; Clavero (2011) encontró mayor concentración de TC en hojas recién formadas que en las totalmente expandidas, situación que podría explicar la preferencia de bovinos por consumir estas hojas que las recién formadas.

Las hojas de *Leucaena* muestran niveles de entre 9.1 a 11.3% de lignina (Hove *et al.*, 2003; Talukder, 2006) y a su vez estas concentraciones relativamente altas se han asociado en bovinos a una menor liberación de CH_4 ruminal por kg de forraje consumido ya que la lignina no es fermentable en el rumen, mientras que la fibra rica en celulosa y hemicelulosa sí puede ser fermentada y a partir de esta fermentación se libera

CH_4 (Talukder, 2006). Además de la concentración alta de lignina y baja en celulosa la presencia de flavonoides hasta en 6.2% en hoja se ha asociado a menor liberación de CH_4 ruminal y estimulación de la fermentación ruminal (Verdecia *et al.*, 2012) a la par de mayor liberación de acetato y propionato que son ácidos grasos volátiles (AGV) que usa el rumiante como fuente de energía (Bodas *et al.*, 2008).

Además de compuestos orgánicos con efectos positivos sobre el comportamiento animal, el follaje y semilla de *Leucaena* registran la presencia de Mimosina, compuesto con potencial tóxico que ocasiona en bovinos desde trastornos leves de la salud y hasta la muerte de estos. La Mimosina es un AA libre alcaloide estructuralmente análogo a la tirosina (Harith *et al.*, 1987; Halliday *et al.*, 2013; Barros-Rodríguez *et al.*, 2014). El nombre de la Mimosina es: β -[N-3-hidroxi-4-oxopiridil]- α -amino ácido propiónico (Harith *et al.*, 1987) que al ser fermentado en rumen origina dos compuestos que son los responsables de la toxicidad, éstos son: 2,3-dihidroxipiridina o 2-hidroxi-3 [1H]-piridona (2,3-DHP) y 3,4-dihidroxipiridina o 3-hidroxi-4 [1H]-piridona (3,4-DHP) (Ruz-Ruiz *et al.*, 2013; Ilham *et al.*, 2015; Sierra-Montoya *et al.*, 2017). Ambas formas de DHP tienen una actividad goitrogénica lo que reduce la disponibilidad de yodo y provoca bajos niveles de las hormonas tiroideas: tiroxina (T_4) y triyodotironina (T_3) alterando negativamente el metabolismo, consumo y crecimiento de los animales, el impacto sobre el metabolismo promueve la manifestación de los signos clínicos de toxicidad por Mimosina (Halliday *et al.*, 2013; Barros-Rodríguez *et al.*, 2014). El quelatado de iones metálicos como Zn, Cu y Fe en compuestos complejos se ha señalado como una de las rutas del efecto tóxico de los DHP derivados de la fermentación ruminal de la Mimosina (Ghosh y Samiran, 2007).

Para evitar el impacto negativo en bovinos de la Mimosina además de controlar el consumo de *Leucaena* y promover una población bacteriana en rumen que degrade ambos DHP's, se ha sugerido la selección y desarrollo de variedades de *Leucaena* con un menor contenido de Mimosina (García *et al.*, 2008c; Razz, 2013) este acercamiento al problema se justifica por los intervalos en concentración encontrados en plantas de *Leucaena* de diferente procedencia, entre estos intervalos están: 2.3 a 6.9% (García *et al.*, 2008a; 2009); 0.5 a 4.0% (Ilham *et al.*, 2015); y, 2.1 a 5.4% (Cuadro 1).

La superioridad de la *Leucaena* sobre gramíneas tropicales en la concentración de algunos minerales es otra ventaja de la incorporación de esta especie en SSP para el pastoreo de bovinos; Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Co y Mo son los minerales con mayor concentración en *Leucaena* que en gramíneas

tropicales (Cuadro 2). Las concentraciones de P y Zn en *Leucaena* pueden superar a las registradas en gramíneas tropicales, sin embargo, no son suficientes para asegurar un adecuado desempeño productivo de los bovinos, además el forraje puede presentar un desbalance en la razón Ca:P y un aporte de Se en exceso a lo recomendado para un desempeño óptimo (McDowell y Arthington, 2005; NRC, 2016). La *Leucaena* registra concentraciones de minerales necesarios en la alimentación de bovinos superiores al follaje de otras especies arbustivas (Godoy *et al.*, 2007; Clavero, 2011; Vieyra-Alberto *et al.*, 2013) por lo que la *Leucaena* es una de las especies leñosas preferidas para conformación de SSP en trópico.

Además de la concentración del P en el tejido vegetal consumido por bovinos debe considerarse la disponibilidad de este, ya que el P en ácido fítico es de disponibilidad baja y reduce la disponibilidad de otros minerales por la capacidad quelatizante del ácido fítico (Zhou y Erdman, 1995). García *et al.* (2008c, d; 2009) concluyeron que en *Leucaena* la proporción de P en ácido fítico es baja por lo que no hay riesgo en la disponibilidad del P ni de otros minerales que pudieran quelatizarse.

Las gramíneas tropicales registran una fuerte reducción en la calidad del forraje conforme la madurez es mayor, la menor calidad del forraje ofrecido es la causa principal del pobre desempeño de bovinos pastoreando únicamente gramíneas tropicales. El follaje de *Leucaena* mantiene su calidad en términos de las concentraciones de proteína, digestibilidad de la materia seca y de minerales a edades avanzadas, por lo que puede disminuir el impacto negativo sobre el comportamiento productivo de bovinos pastoreando gramíneas tropicales de madurez avanzada (Faria y Sánchez, 2007; Sánchez y Faria, 2008, 2013) y se le ha señalado como sustituto parcial o total de concentrados comerciales dirigidos a mitigar el impacto negativo en bovinos consumiendo forrajes de pobre calidad (Clavero, 2011). Sánchez y Faria (2013) advierten que una de las principales limitantes a la calidad del follaje de *Leucaena* de madurez avanzada es que la razón Ca:P puede ser de hasta 7:1, para evitar esta situación los autores recomiendan que el follaje de *Leucaena* no exceda una edad de 126 días.

Bovinos con acceso a follaje de *Leucaena* muestran una liberación menor de CH₄ por kilogramo de producto animal y una mayor digestibilidad del forraje consumido en comparación a bovinos pastoreando gramíneas tropicales, esto debido a que las hojas de *Leucaena* presentan mayor contenido celular y menor de pared celular en comparación a gramíneas tropicales (Shelton y Dalzell, 2007). La digestibilidad de los componentes nutrimentales en el follaje de *Leucaena* es de alta a muy alta en comparación con gramíneas tropicales (Cuadro 3). García *et al.* (2009)

indican que la importancia del follaje de *Leucaena* como fuente de forraje es que además de mayores concentraciones de nutrimentos éstos muestran una mayor digestibilidad.

Las concentraciones de compuestos nutrimentales y su mantenimiento a edades avanzadas permiten indicar que *L. leucocephala* es un componente importante en la alimentación de bovinos pastoreando SSP; el principal riesgo en el uso de *Leucaena* como forraje para bovinos es la toxicidad de la Mimosina y en segundo plano una relación Ca:P poco favorable a un desempeño productivo máximo.

ALIMENTACIÓN

El comportamiento productivo de los bovinos depende de los consumos voluntarios total y por nutrimento, bovinos pastoreando en SSP con *Leucaena* mostraron consumos totales y nutrimentales de 2.3 a 80.6% mayores a los registrados en los bovinos pastoreando gramíneas tropicales y menores de FDN y agua (Cuadro 4) por lo que podría señalarse que los SSP con *Leucaena* son una opción para mejorar la productividad de la ganadería bovina tropical en pastoreo, mientras que mantener como fuente única para el pastoreo de bovinos a las gramíneas tropicales limita la expansión de la productividad de la ganadería tropical.

Consumos de follaje de *Leucaena* entre 1.5 y 2.3 kg de MS animal⁻¹ día⁻¹ promueven la productividad de bovinos sin riesgo de efectos negativos (Mahecha *et al.*, 2007; López *et al.*, 2015); Ortega *et al.* (2009) y López-Vigora *et al.* (2017) señalan que en SSP con *Leucaena* el consumo de esta especie puede ser de hasta 2.6 kg de MS animal⁻¹ día⁻¹ sin efectos detrimentales siempre que haya alta disponibilidad de forraje de las gramíneas asociadas, Mahecha *et al.* (2007) coinciden en señalar la importancia de abundante oferta de forraje de gramíneas para reducir el riesgo de intoxicación en bovinos por el consumo de *Leucaena*.

Pinto *et al.* (2014) registraron que los bovinos pastoreando en SSP con *Leucaena* y en praderas de gramíneas dedicaron el mismo tiempo a las siete actividades registradas y dentro del tiempo dedicado a la cosecha de forraje 25% fue dedicado al ramoneo de *Leucaena*. Ortega *et al.* (2009) encontraron en bovinos que la tasa de ingesta, número y tamaño de bocados dependieron de la altura de las plantas de *Leucaena* dentro del intervalo de 90 a 120 cm con respecto del nivel del suelo, en promedio los valores fueron: 16.3 g de follaje min⁻¹, 35.8 bocados min⁻¹ y 0.46 g bocado⁻¹, con base en estos resultados se enfatiza el manejo del dosel de *Leucaena* para fomentar el máximo consumo posible.

Cuadro 2. Concentraciones de macro y microelementos ($\bar{x} \pm s$) del follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y forraje de gramíneas tropicales utilizadas en la alimentación de bovinos en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	Macroelementos (%)					Microelementos (ppm)								Contribución por país (%)	Fuente
	Ca	P	Mg	K	Na	Ca:P	Cu	Fe	Mn	Zn	Se	Co	Mo		
Leucaena en SSP															
ADP	1.09±0.30 (2)	0.22 (1)		0.51 (1)		5.91 (1)	18 (1)	267 (1)		26 (1)				México (50) y Nicaragua (50)	*
BF	1.72±0.30 (7)	0.22±0.04 (6)	0.31±0.06 (2)	2.19±0.15 (5)	0.09 (1)	8.26±2.08 (5)	76 (1)		76 (1)	28 (1)	2.6 (1)	1.6 (1)	3.3 (1)	Cuba (86) y Venezuela (14)	†
PC	1.13±0.37 (13)	0.22±0.05 (13)	0.30±0.02 (4)	2.14±0.06 (4)	0.10±0.09 (4)	5.40±2.48 (12)	16±7 (2)	109±45 (2)	48 (1)	23±1 (2)				Colombia (62), Cuba (15), Venezuela (15) y México (8)	‡
Gramíneas en SSP															
PC	0.42±0.26 (15)	0.48±0.99 (15)	0.12±0.04 (4)	2.81±0.96 (4)	0.09±0.09 (4)	1.85±1.71 (15)	6±4 (2)	146±54 (2)	28 (1)	35±19 (2)				Colombia (54), México (20), Cuba (13) y Venezuela (13)	±
Convencional															
GM	0.37±0.17 (24)	0.35±0.82 (17)	0.13±0.13 (14)	1.37±0.69 (21)	0.16±0.15 (14)	2.18±1.15 (17)	8±5 (21)	242±64 (21)	59±55 (10)	29±13 (21)		0.02 (1)		Colombia (38), México (38), India (12) y Venezuela (12)	‡
Requerimiento y límites tolerables															
NM ⁽¹⁾	0.19 a 0.73	0.12 a 0.34	0.1	0.6	0.06 a 0.08	0.56	10	50	20	30	0.1	0.1			
NOBC ⁽²⁾	0.53 a 0.67	0.32 a 0.44	0.2 a 0.25	0.7	0.1	1.6	10	50	40	30	0.1	0.1			
NOVL ⁽³⁾	0.3	0.25	0.2	0.8	0.06	1.2	10	50	40	30	0.1	0.1			
MT ⁽⁴⁾	2	1	0.4	3		2	100	1000	1000	500	2	10	5		

¹ SSP= Sistemas silvopastoriles, ADP= Árboles dispersos en potreros, BF= Banco forrajero, PC= Pastura en callejones y GM= Gramínea en monocultivo

* Vivas et al. (2011) y Pérez et al. (2013)

† Galindo et al. (2008), García et al. (2008 a,c,d; 2009), Sánchez y Faria (2008) y Verdecia et al. (2014)

‡ Faria y Sánchez (2007), Sánchez et al. (2010), Cuatras et al. (2013; 2015; 2016), Molina et al. (2013; 2015; 2016), Sánchez y Faria (2013), Gaviria et al. (2015), Gaviria-Uribe et al. (2015), López et al. (2015), Santiago et al. (2016) y Sierra-Montoya et al. (2017)

± Faria y Sánchez (2007), Benítez-Bahena et al. (2010), Sánchez et al. (2010), Cuatras et al. (2013; 2015), Molina et al. (2013; 2015; 2016), Sánchez y Faria (2013), Peniche-González et al. (2014), Gaviria et al. (2015), Gaviria-Uribe et al. (2015), López et al. (2015), Santiago et al. (2016) y Sierra-Montoya et al. (2017)

‡ Cabrera et al. (2009), Depablos et al. (2009), Kumaresan et al. (2010), Vivas et al. (2011), Cuatras et al. (2013; 2015), Molina et al. (2013; 2015; 2016), Muñoz-González et al. (2014)

(¹) Nivel mínimo en base a los requerimientos del ganado bovino (McDowell y Arthington, 2005).

(²) Nivel óptimo recomendado en la dieta de bovinos en crecimiento y finalización (NRC, 2016)

(³) Nivel óptimo recomendado en la dieta de bovinos en lactación (NRC, 2016) con base a niveles críticos de concentraciones minerales en los forrajes tropicales (McDowell y Arthington, 2005)

(⁴) Niveles máximos tolerables de minerales en la dieta de bovinos (NRC, 2016)

Cuadro 3. Digestibilidad de componentes nutrimentales ($\bar{x} \pm s$) del follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y forraje de gramíneas tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.									
Sistema ¹	Componente nutrimental ²						Contribución por país (%)	Contribución por especie (%)	Fuente
	MS (%)	MO (%)	PB (%)	FDN (%)	FDA (%)	PBD (g kg MS ⁻¹)			
Leucaena en SSP									
ADP	54.6±10.4 (4)	57.8±5.4 (3)	64.6±5.7 (2)			139.4±44.5 (2)	México (75) y Nicaragua (25)		*
BF	61.2±8.7 (9)	54.6±10.1 (4)	54.0±9.9 (6)	42.5±5.4 (6)	40.0±2.2 (2)		Cuba (50), México (20), Venezuela (20) y Australia (10)		†
PC	55.6±9.4 (5)	61.8±13.9 (4)	69.2 (1)	57.9 (1)	57.4 (1)	181.0 (1)	Colombia (37.5), Venezuela (37.5), Costa Rica (12.5) y México (12.5)		‡
Gramíneas en SSP									
PC	53.5±4.9 (9)	41.4±0.9 (3)	64.9 (1)	55.9 (1)	55.8 (1)		Colombia (60), Venezuela (20), Costa Rica (10) y México (10)	<i>Megathyrsus maximus</i> (45.4), <i>Cenchrus ciliaris</i> (18.2), <i>Cynodon plectostachyus</i> (18.2), <i>Brachiaria brizantha</i> (9.1) y <i>C. nlemfuensis</i> (9.1)	*
Convencional									
GM	58.8±11.1 (17)						México (82), Australia (6), Brasil (6) y Costa Rica (6)	<i>C. plectostachyus</i> (16.7), <i>B. brizantha</i> (11), <i>B. decumbens</i> (11), <i>C. purpureum</i> x <i>C. glaucum</i> (11), <i>C. purpureum</i> cv Taiwan (5.6), <i>Axonopus compressus</i> (5.6), <i>B. humidicola</i> (5.6), <i>B. brizantha</i> x <i>B. ruziziensis</i> (5.6), <i>Chloris gayana</i> (5.6), <i>M. maximus</i> (5.6), <i>M. maximus</i> cv Mombaza (5.6), <i>M. maximus</i> cv Tanzania (5.6)	‡

¹SSP=Sistemas silvopastoriles, ADP=Árboles dispersos en potreros, BF=Banco forrajero, PC=Pastura en callejones y GM=Gramínea en monocultivo

²DMS=Digestibilidad de la materia seca, DMO=Digestibilidad de la materia orgánica, DPB= Digestibilidad de la proteína bruta, DFB= Digestibilidad de la fibra bruta, DFDN= Digestibilidad de la fibra detergente neutro, DFDA= Digestibilidad de la fibra detergente ácido y PBD=Proteína bruta digestible

*Ayala-Burgos et al. (2006), Bobadilla-Hernández et al. (2007), Jiménez-Ferrer et al. (2008a), Milera (2013) y Pérez et al. (2013)

†García et al. (2008a,b,c,d; 2009), Sánchez y Faria (2008), Casanova-Lugo et al. (2014), Verdecia et al. (2014), Harrison et al. (2015) y Piñero-Vázquez et al. (2016)

‡Faria y Sánchez (2007), Jiménez (2007), Sánchez et al. (2007), Sánchez y Faria (2013), Barahona et al. (2014), Molina et al. (2015), Naranjo et al. (2016) y Sandoval et al. (2016)

*Faria y Sánchez (2007), Jiménez (2007), Sánchez y Faria (2013), Molina et al. (2013), Barahona et al. (2014), Cuartas et al. (2015), Gaviria et al. (2015), Naranjo et al. (2016) y Sandoval et al. (2016)

‡Jiménez (2007), Jarillo-Rodríguez et al. (2011), Ortega-Gómez et al. (2011), Paciullo et al. (2011), Mijares et al. (2012) y Harrison et al. (2015)

RESPUESTA PRODUCTIVA

Los bovinos pastoreando SSP con *Leucaena* en callejones superan en PL y ganancia de peso a los que pastorean gramíneas tropicales, debido a que estos SSP, en comparación a las praderas de gramíneas, proveen a los bovinos una oferta mayor de forraje con más proteína y digestibilidad, lo que permite mayor carga animal y reduce la necesidad de incorporar insumos alimenticios externos (González, 2013; Ávila y Revollo, 2014); los SSP con *Leucaena* en relación a praderas de gramíneas tropicales pueden incrementar de 1.5 a 2 veces más la PL o ganancia de peso por animal o por unidad de superficie (Cuadros 5 y 6), Murgueitio et al. (2016) señalan mejoras de hasta 4 veces según sea la calidad y rendimiento de la gramínea tropical en comparación. Los SSP con *Leucaena* para ambientes tropicales de América Latina y el Caribe pueden sostener cargas de 2 a 5 UA ha⁻¹, este intervalo es una mejora con respecto a praderas de gramíneas tropicales (Calle et al., 2012; González, 2013; López-Vigora et al., 2017).

La ganancia diaria de peso (GDP) registrada en bovinos pastoreando SSP con *Leucaena* origina que el periodo de engorda sea de 29 a 149 días más corto o animales de mayor peso al final de la engorda en comparación a praderas de gramíneas tropicales, el diseño de incorporación de la *Leucaena* en el SSP influye sobre la magnitud de estas mejoras en tiempo y peso final de la engorda (Cuadro 5). Peralta et al. (2012) encontraron que con *Leucaena* en un SSP de banco de proteína con acceso de 3 h por día, los novillos mostraron una GDP mayor en 377 g novillo⁻¹ a la registrada en los novillos pastoreando una pradera de *Megathyrsus maximus* (guinea). Terneros de empresas lecheras pastoreando en un SSP con *Leucaena* mostraron una GDP 65% inferior a la de terneros en confinamiento total; sin embargo, la rentabilidad fue mayor en el SSP (Mayo-Eusebio et al., 2013). Razz (2013) concluyó que proveer concentrados energético-proteínicos a novillos pastoreando SSP con *Leucaena* no mejoran la GDP debido a que los concentrados originan una marcada reducción en el consumo de forraje.

Cuadro 4. Valores de selectividad de follaje y consumo de materia seca, nutrientes y agua ($\bar{x} \pm s$) de bovinos alimentados en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	Nutriente ²											Contribución por estado fisiológico (%)	Contribución por especie (%)	Contribución por país (%)	Fuente	
	Selectividad (%) ³															
	CMSD (kg/día)	CMSPV (%)	CMSPM (g/kg de PV ⁷⁵)	CPB (%)	CMO (%)	CFDN (%)	CFDA (%)	CEB (Mcal/kg MS)	CEM (Mcal/kg MS)	CCa (%)	CP (%)	CAPM (mL/kg PV ⁷⁵)	G	L		
Leucaena-gramínea en SSP																
ADP	8.02±2.1 (4)	2.39±0.3 (4)	111.5±13.5 (4)	15.9 (1)					1.04 (1)	0.17 (1)	75.8±6.2 (3)	24.2±6.2 (3)	Torete (100)	<i>Megathyrus maximus</i> (100)	Colombia (100)	*
BF	7.11 (1)	2.36 (1)	99.90 (1)	10.7 (1)	93.67 (1)	61.88 (1)	39.24 (1)				70.0 (1)	30.0 (1)	Vaquilla (100)	<i>Cenchrus purpureum</i> (100)	México (100)	†
PC	10.58±3.2 (9)	2.59±0.3 (9)	117.2±17.4 (10)	13.3±1.8 (7)	89.78 (1)	58.7±8.7 (5)		4.42±0.1 (4)	2.21±0.0 (4)	0.65±0.2 (5)	0.39±0.2 (5)	107.4 (1)	Vaca (55), Torete (27) y Vaquilla (18)	<i>Cynodon nlempfiensis</i> (42), <i>C. plectostachyus</i> (25), <i>M. maximus</i> (25) y <i>M. maximus cv</i> Tanzania (8)	Colombia (50) y México (50)	†
Gramíneas en SSP																
ADP	5.48±0.4 (3)	2.01±0.4 (3)	80.0±14.5 (3)	9.3 (1)					0.67 (1)	0.18 (1)	91.4±0.1 (2)	8.6±0.1 (2)	Torete (100)	<i>M. maximus</i> (50) y <i>M. maximus cv</i> Tanzania (50)	Colombia (100)	*
PC	6.50 (1)	2.39 (1)	96.50 (1)								168.0 (1)		Vaquilla (100)	<i>C. nlempfiensis</i> (50) y <i>M. maximus</i> (50)	Colombia (100)	‡
Convencional																
GM	10.68±4.0 (6)	2.97±0.8 (6)	128.9±36.6 (6)	8.8±1.7 (6)	91.4±2.3 (2)	63.9±2.8 (2)	40.54 (1)	4.32±0.2 (4)	2.16±0.1 (4)	0.36 (1)	0.33 (1)	100±0 (9)	Torete (45), Vaca (35), y Vaquilla (22)	<i>C. plectostachyus</i> (44.4), <i>C. nlempfiensis</i> (44.4) y <i>C. purpureum</i> (11.2)	México (100)	□

¹SSP=Arreglo silvopastoril, ADP=Árboles dispersos en potreros, BF=Banco forrajero, PC=Pastura en callejones y GM=Gramíneas en monocultivo²CMSD=Consumo de materia seca (MS) diaria, CMSPV=Consumo de MS en base al peso vivo, CMSPM=Consumo de MS en base al peso metabólico, CPB=Consumo de proteína bruta, CMO=Consumo de fibra detergente neutro, CFDA=Consumo de fibra detergente ácido, CEB=Consumo de energía bruta, CEM=Consumo de energía metabolizable, CCa=Consumo de calcio, CP=Consumo de fósforo, CAPM=Consumo de agua en base al peso metabólico, G=Gramínea y L=Leucaena

*Calle et al. (2013), Barahona et al. (2014) y Cuatrecasas et al. (2015)

†Piñero-Vázquez et al. (2017)

‡Bacab-Pérez y Solórzano-Sánchez (2011), Milera (2013), Pinto et al. (2014), Bottini-Luzardo et al. (2015), Gaviria-Urbe et al. (2015), Molina et al. (2015, 2016) y Sierra-Montoya et al. (2017)

□Calle et al. (2013), Barahona et al. (2014) y Cuatrecasas et al. (2015)

□Molina et al. (2015)

□Aguiar-Pérez et al. (2009a), Mijares et al. (2012), Pinto et al. (2014), Bottini-Luzardo et al. (2015), Molina et al. (2016) y Piñero-Vázquez et al. (2017)

La carga animal (CA), ganancia de peso y PL por hectárea en SSP con Leucaena en promedio superan en 2 animales ha^{-1} , 768 kg de ganancia de peso $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ y 11189 L de leche $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Cuadros 5 y 6) a los promedios propuestos por FAO (2006) para condiciones tropicales usando como fuente de forraje praderas de gramíneas tropicales. Los novillos pastoreando un SSP con Leucaena rindieron cuatro veces más ganancia de peso por ha que los que pastorearon una pradera de gramínea tropical, debido a que en el SSP el consumo de proteína fue 43% mayor y el de FDN 14.4% menor que en la pradera de gramínea (Cuartas *et al.*, 2014). López-Vigoa *et al.* (2017) calcularon que se requerían de hasta 2.5 veces más superficie de pradera de una gramínea tropical para que los bovinos pudieran alcanzar una GDP similar a la encontrada en un SSP con Leucaena, en algunos estudios revisados por estos autores se registran en SSP con Leucaena hasta 1340 kg de ganancia de peso $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Praderas de gramíneas tropicales pueden registrar rendimientos diarios de leche por vaca y ajustados a 305 días superiores a los obtenidos con SSP con Leucaena si la dieta consumida por las vacas en las praderas tropicales se conforma con 60% o más de un concentrado energético-proteínicos; sin embargo, en rendimientos de leche por ha los SSP con Leucaena superan hasta en 89% a las praderas de gramíneas tropicales complementadas con concentrados energético-proteínicos (Cuadro 7). López-Vigoa *et al.* (2017) indican a partir de varios estudios en Cuba que los SSP pueden rendir de 3000 a 16000 kg de leche $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ mientras que con praderas de gramíneas tropicales este intervalo es mucho menor.

Vacas pastoreando SSP con Leucaena y hasta un máximo de 4.0 kg de concentrado por vaca día^{-1} mostraron de 7.2 a 12.0 kg de leche vaca día^{-1} y una condición corporal no inferior a 2.8 (escala 1 a 5) que permitió mantener una tasa de reproducción adecuada (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez, 2011; Razz, 2013; López-Vigoa *et al.*, 2017); en otros estudios, vacas pastoreando SSP con Leucaena registraron 14 a 17 kg de leche vaca día^{-1} , 3360 a 4080 kg de leche lactancia día^{-1} e intervalo entre partos no mayor a 14 meses (Sierra *et al.*, 2017; Sierra-Montoya *et al.*, 2017) valores altos y pertinentes a mejorar la rentabilidad de empresas ganaderas tropicales. Complementar con concentrados a vacas pastoreando SSP debe justificarse económica y no solo biológicamente (López *et al.*, 2015). Faría *et*

al. (2007) y Peniche-González *et al.* (2014) determinaron que Leucaena ofrecida como banco de proteína con acceso diario por 2 a 4 h podría equivaler hasta a 2 kg de concentrado energético-proteínicos, lo que resalta la importancia de los SSP con Leucaena para mejorar en la rentabilidad de la empresa ganadera tropical.

RESPUESTA EN CALIDAD DE LECHE Y CARNE

Aun con diferencia en la cantidad de leche producida por vaca, la calidad de la leche es similar en vacas pastoreando praderas de gramíneas o SSP con Leucaena (Cuadro 6), debido a que en ambas situaciones el consumo de fibra es similar (Church *et al.*, 2002). Con respecto a la carne de bovino el consumidor demanda carne con la mayor concentración de ácidos grasos polinsaturados (AGPI) porque se asocia a menos trastornos cardiovasculares y cáncer en humanos (Kolanowski y Laufenberg, 2006). Scollan *et al.* (2006) y Rodríguez *et al.* (2013) encontraron que la carne de novillos engordados por pastoreo de un SSP mostró menor cantidad de grasa y mayores concentraciones de C18:3 (α -linolénico u Ω_3) y de AGPI en comparación a la de novillos finalizados con dietas de alta concentración energética. Shingfield *et al.* (2010) proponen que los TC presentes en el follaje de Leucaena evitan la biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados y por eso es mayor la calidad de la carne de novillos finalizados pastoreando SSP con Leucaena.

La razón C18:2/C18:3 ha sido de 4 o menor y de 6 o mayor en carne de bovinos engordados en SSP con Leucaena y praderas de gramíneas, respectivamente, la razón más adecuada es de 2 o menor (Scollan *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2014). Díaz *et al.* (2014) señalaron que la mejor proporción C18:2/C18:3 en la carne de bovinos engordados con SSP permitió un peso de sacrificio mayor, sin detrimento en la calidad de la carne y manteniéndose ésta como un alimento saludable, ya que el mayor peso no ocasionó mayor aporte de grasa en la canal. Los SSP con Leucaena son por tanto una opción económica y rentable para mejorar la PL y ganancia de peso en bovinos con nulo o mínimo uso de concentrados energético-proteínicos en comparación al pastoreo de bovinos en praderas de gramíneas tropicales aun con complementación con concentrados energético-proteínicos (Shelton y Dalzell, 2007; Mijares *et al.*, 2012; Díaz *et al.*, 2014).

Cuadro 5. Parámetros de productividad ($\bar{x} \pm s$) de bovinos para engorda alimentados con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y forraje de pastos tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	Parámetro ²						Contribución por país (%)	Contribución por especie (%)	Fuente
	PVi (kg)	PVf (kg)	PE (días)	GDP (g día ⁻¹)	CA (UA ha ⁻¹)	GPUS (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)			
Leucaena en SSP									
ADP	250 (1)	440 (1)	238 (1)	710±143 (5)	3.46±0.53 (5)	897±236 (5)	1.17±0.32 (5)	Colombia (100)	<i>Cynodon plectostachyus</i> (50), <i>Megathyrus maximus</i> cv Tanzania (37.5) y <i>M. maximus</i> (12.5)
BF	319±24 (6)	505±80 (6)	204±61 (6)	851±241 (6)	2.79±0.70 (5)	1337±308 (5)	0.77±0.14 (5)	Australia (83) y Paraguay (17)	<i>Chloris gayana</i> (45.5), <i>Digitaria didactyla</i> (45.5), <i>M. maximus</i> (9)
PC	203±46 (13)	423±74 (13)	324±93 (13)	693±159 (13)	2.66±1.19 (14)	788±525 (14)	1.73±0.84 (14)	Cuba (57), Colombia (22), Australia (7), Costa Rica (7) y México (7)	<i>M. maximus</i> cv. Likoni (43), <i>Cenchrus purpureum</i> cv CT-115 (22), <i>M. maximus</i> (14), <i>Brachiaria brizantha</i> (7), <i>C. gayana</i> (7) y <i>C. plectostachyus</i> (7)
Convencional									
GM	240±79 (14)	388±92 (14)	353±320 (14)	437±138 (16)	1.69±0.94 (15)	273±170 (14)	6.06±4.77 (14)	Colombia (42), Australia (27), México (16), Brasil (5), Costa Rica (5) y Paraguay (5)	<i>C. plectostachyus</i> (28), <i>C. gayana</i> (24), <i>D. didactyla</i> (19), <i>M. maximus</i> cv Tanzania (14), <i>Bothriochloa pertusa</i> (5), <i>B. brizantha</i> (5) y <i>B. decumbens</i> (5)

¹SSP=Sistemas silvopastoriles, ADP=Árboles dispersos en potreros, BF=Banco forrajero, PC=Pastura en callejones y GM=Gramínea en monocultivo²PVi=Peso vivo inicial, PVf=Peso vivo final, PE=Periodo de engorda, GDP=Ganancia diaria de peso, CA=Carga animal, GPUS=Ganancia de peso por unidad de superficie y SRPITCA=Superficie requerida para producir una tonelada de carne al año

*Naranjo et al. (2012), Calle et al. (2013) y Tarazona et al. (2013)

†Peralta et al. (2012) y Taylor et al. (2016)

‡Jiménez (2007), Sánchez et al. (2010), Bacab et al. (2013), Mayo-Eusebio et al. (2013), Díaz et al. (2014) y Harrison et al. (2015)

§Jiménez (2007), Paciullo et al. (2011), Mijares et al. (2012), Naranjo et al. (2012), Peralta et al. (2012), Bacab et al. (2013), Calle et al. (2013), Cuatras et al. (2013), Tarazona et al. (2013), Harrison et al. (2015) y Taylor et al. (2016)

Cuadro 6. Parámetros de productividad y calidad de leche ($\bar{x} \pm s$) de vacas alimentadas con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y forraje de pastos tropicales utilizados en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	Productividad ²					Calidad de leche ²										UR (mg 100 mL ⁻¹)	Suplemento		Contribución por genotipo (%)	Contribución por país (%)	Contribución por especie (%)	Fuente
	PV (kg)	PLD (kg día ⁻¹)	PL305 (kg)	CA (UA ha ⁻¹)	PLUS (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	CPV (g animal ⁻¹)	GB (%)	PB (%)	SNG (%)	AC (°D)	LAC (%)	ST (%)	CS (%)	Tipo (%)	Cantidad (kg)							
Leucaena en SSP																						
ADP		9.2±1.2 (2)	3040±14 (2)	3.9±0.6 (2)	14403±1983 (2)	621±182 (2)	3.8 (1)	3.3 (1)							Ninguno (100)	0.0±0.0 (2)	Holstein x Cebú (100)	Colombia (100)	<i>Cynodon plectostachyus</i> (67) y <i>Megathyrsus maximus</i> cv. Tanzania (33)	*		
BF	466±23 (2)	9.1±2.1 (4)		3.0±0.0 (2)		101±397 (2)	3.6±1.0 (7)	3.0±0.2 (7)	8.2±0.1 (3)	18.4±1.2 (4)	4.7±0.2 (5)	11.7±1.6 (4)	2.4±0.1 (3)	26.6 (1)	Concentrado comercial (57), Ninguno (29) y Melaza (14)	1.3±1.0 (4)	Holstein x Cebú (67) y Suizo Americano x Cebú (43)	Venezuela (57) y México (43)	<i>Brachiaria humidicola</i> (12.5) <i>M. maximus</i> cv. <i>niemfuerensis</i> (25) y <i>Brachiaria humidicola</i> (12.5)	†		
PC	475±18 (7)	9.8±2.2 (9)	3010±654 (9)	3.6±1.2 (5)	11957±1851 (3)	230±372 (2)	3.8±0.4 (5)	3.0±0.0 (5)	8.6±0.0 (2)		4.7±0.7 (5)	12.8±0.1 (2)			Holstein x Cebú (40), Holstein Americano (20), Suizo (20), Brahman (10) y Carora (10)	1.9±1.3 (8)	México (50), Cuba (30), Colombia (10) y Venezuela (10)	<i>M. maximus</i> cv. Tanzania (30), <i>niemfuerensis</i> (20), <i>plectostachyus</i> (20), <i>M. maximus</i> cv. Likoni (20) y <i>Brachiaria spp.</i> (10)	†			
Convencional																						
GM	456±27 (6)	10.0±2.2 (10)	3080±626 (10)	1.9±0.2 (4)	6299±2274 (4)	-63±444 (7)	3.7±0.2 (6)	3.1±0.2 (6)	8.5 (1)		4.6±0.3 (6)	12.0 (1)			Concentrado comercial (64), Pulidura de arroz (18), Grasa de sobrepeso (9) y Ninguno (9)	3.2±2.1 (9)	Holstein x Cebú (60), Brahman (10), Carora (10), Holstein (10) y Suizo Americano (10)	México (73), Colombia (18) y Venezuela (9)	<i>C. niemfuerensis</i> (38), <i>C. plectostachyus</i> (23), <i>M. maximus</i> cv. Tanzania (15), <i>B. decumbens</i> (8), <i>B. radicans</i> (8) y <i>Paspalum sp.</i> (8)	*		

¹SSP=Sistemas silvopastoriles, ADP=Árbol(es) dispersos en potreros, BF=Banco farrero, PC=Pastura en callisones y GM=Granifera en monocultivo

²PV=Peo vivo PLD=Producción de leche (PL) diaria, PL305=PL ajustada a 305 días, CA=Carga animal, PLUS=Productividad láctea por unidad de superficie, CPV=Cambio de PV, GB=Grasa bruta, PB=Proteína bruta, SNG=Sólidos no grasos, AC=Acidez, LAC=Lactosa, ST=Sólidos totales, CS=Cacina y Urea

*Toranzo et al. (2013)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

†Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

*Boschillo-Hernández et al. (2007), Fariña et al. (2007), Raza y Clavero (2007) y Tinoco-Magaña et al. (2012)

EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La sostenibilidad de la ganadería pastoril con rumiantes alimentados casi exclusivamente con gramíneas está fuertemente amenazada por señalarse que es emisora de hasta 37% del CH₄, 9% del CO₂, 65% del óxido nitroso (N₂O) y 64% del amoníaco, todos ellos gases de efecto invernadero (Knapp *et al.*, 2014; FAO, 2006; Steinfeld *et al.*, 2006). Los SSP con Leucaena u otras leguminosas arbóreas han demostrado mejorar la producción animal sin aumento y a veces con reducción en la liberación de CH₄ proveniente de la fermentación ruminal (Shelton y Dalzell, 2007; Barahona *et al.*, 2014; Molina *et al.*, 2013; 2016). El follaje de Leucaena u otras leguminosas arbóreas origina una menor liberación de CH₄ por kg de MS consumida y degradada (Cuadro 8), Molina *et al.* (2013) encontraron que la inclusión de Leucaena a dietas con base en gramíneas tropicales redujo hasta en 8% la emisión de CH₄ ruminal con respecto de la dieta conformada únicamente por gramíneas tropicales.

Toretas en engorda mostraron el mismo consumo total de forraje, pero con hasta 61% menor liberación de CH₄ por animal al ingerir una dieta con 80% de follaje de Leucaena en comparación a la dieta testigo conformada únicamente por forraje de una gramínea tropical (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017). Bovinos pastoreando un SSP con hasta 20% de oferta de follaje de Leucaena mostraron 21% menor pérdida calculada de energía bruta en forma de CH₄ ruminal en comparación a los que pastorearon gramíneas tropicales (Cuadro 8); en otros estudios, la reducción en la cantidad de energía bruta

perdida como CH₄ ruminal varió de 2 a 18% dependiendo de la concentración de fibra y otras características de calidad (Eckard *et al.*, 2010; Barros-Rodríguez *et al.*, 2014; Casanova-Lugo *et al.*, 2016). Beauchemin *et al.* (2009) señalaron que la reducción del 25% en la liberación de CH₄ ruminal registrada en vacas pastoreando un SSP con Leucaena se asoció con incrementos de 0.075 a 1.0 kg de leche vaca⁻¹día⁻¹ todo en comparación con vacas pastoreando gramíneas tropicales.

La reducción en el CH₄ ruminal no debe asociarse a una reducción en la disponibilidad en rumen de los AGV's que aportan 70-75% de la energía requerida por bovinos en pastoreo (Bergman, 1990; Ryle y Ørskov, 1990), al respecto Chakeredza *et al.* (2007) encontraron que la fermentación en rumen de leguminosas forrajeras incrementa la concentración de AGV's sin afectar las proporciones relativas ni el pH ruminal por lo que su uso en la alimentación no afectaría el aporte de energía a nivel del rumen. En el balance total, la emisión de gases de efecto invernadero por kg de peso ganado o de leche producida por bovinos en SSP con Leucaena es menor a la de sistemas de alimentación de bovinos con praderas de gramíneas tropicales (Cuartas *et al.*, 2014; Molina *et al.*, 2015; 2016), además en este balance se debe considerar que los SSP con Leucaena pueden soportar una mayor carga animal que los sistemas de praderas con gramíneas tropicales lo que reduce la superficie para la ganadería pastoril con rumiantes, reduciendo con ello la superficie con emisión de gases de efecto invernadero (Naranjo *et al.*, 2012).

Cuadro 7. Producción de metano ($\bar{x} \pm s$) por bovinos alimentados con diferentes niveles de inclusión de follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de Leucaena en la dieta. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Variable*	Nivel de inclusión en la dieta (%)					
	0	20	40	60	80	100
CH ₄ (g animal ⁻¹ día ⁻¹)	128±29 (4)	135±18 (4)	116 (1)	111 (1)	98 (1)	-
CH ₄ (% CMS)	2.2±1.0 (3)	1.9±0.6 (3)	1.3 (1)	1.2 (1)	-	-
CH ₄ (% CMO)	3.3 (1)	2.7 (1)	-	-	-	-
CH ₄ (% MSF)	5.9±0.5 (2)	3.9±0.2 (2)	-	-	-	-
Pérdida de energía como CH ₄ (Mcal día ⁻¹ animal ⁻¹)	1.8±0.5 (3)	1.7±0.7 (3)	0.8 (1)	0.7 (1)	0.5 (1)	-
Pérdida de energía como CH ₄ (% CEB)	7.4±2.5 (6)	6.1±1.9 (6)	3.1 (1)	2.8 (1)	2.0 (1)	-
Producción de gas <i>in vitro</i> (mL en 0.5 g MS fermentado)	242±17 (3)	243±33 (3)	229±68 (2)	211±81 (2)	187±86 (2)	157±59 (3)

*MS=Materia seca, CMS=Consumo de MS, CMO=Consumo de materia orgánica, MSF=MS fermentada y CEB=Consumo de energía bruta

Adaptado de Molina *et al.* (2013, 2015, 2016), Barahona *et al.* (2014), Cuartas *et al.* (2015), Gaviria *et al.* (2015), Naranjo *et al.* (2016) y Piñeiro-Vázquez *et al.* (2016)

LOS COMPUESTOS SECUNDARIOS

Efecto en consumo de materia seca y nutrientes

Vaquillas *Bos taurus* × *B. indicus* no mostraron efectos negativos en la eficiencia de utilización de la energía, consumo de nutrientes, balance de N y síntesis de proteína microbiana ruminal cuando fueron alimentadas con gramíneas tropicales y hasta 3% de TC por kg de MS (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2016; 2017), considerando este nivel y una concentración media de 4% de TC en follaje de Leucaena se podría calcular que la dieta de bovinos tenga hasta 40% de Leucaena, lo que es una proporción menor a la sugerida por O'Reagain *et al.* (2014) como nivel seguro de uso, a su vez Mayo-Eusebio *et al.* (2013) señalan que 40% de Leucaena en dieta implica ahorros importantes en el uso de pastas o harinas de oleaginosas y cereales.

En vacas el consumo voluntario total fue de 78.9 y 92.9 g kg PV^{-0.75} a 0 y 45% de Leucaena en la dieta, respectivamente; sin embargo, la vacas con exposición previa a la Leucaena tuvieron un consumo voluntario total menor, esta situación se explicó a un posible trastorno subclínico por acumulación de DHP's de la fermentación ruminal de la Mimosina (Ruz-Ruiz *et al.*, 2013). El aumento en el consumo voluntario total al proveer forraje de leguminosas como la Leucaena se debe que el animal recibe mayor cantidad de proteína en el intestino delgado por la mayor ingesta de este componente (Pinto *et al.*, 2014), los mayores consumos totales y de proteína pueden reflejarse en un rendimiento de hasta 10 kg de leche vaca⁻¹ día⁻¹ con alimentación exclusiva de forraje (Aguilar-Pérez *et al.*, 2009a; López *et al.*, 2015). Los incrementos en consumo voluntario al proveer Leucaena en la dieta están asociados a mayores tasas de degradación de la materia seca y de pasaje (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017). El aumento en las tasas de degradación de la materia seca, proteína y FDN se registraron siempre que el aporte de la Leucaena en la dieta no fuera mayor al 40% (Barros-Rodríguez *et al.* 2015; Gaviria *et al.*, 2015).

Efecto en la salud

Registrar los máximos consumos voluntarios y tasas de pasaje a cierto nivel de inclusión de Leucaena en la dieta de bovinos se ha explicado con base al perfil de acumulación de 2,3 y 3,4-DHP derivados de la fermentación ruminal de Mimosina (Sierra-Montoya *et al.*, 2017), cuando la Mimosina en la dieta consumida por bovinos pastoreando un SSP con Leucaena no superó 0.64% no se registró ningún síntoma de toxicidad por la baja concentración de este compuesto (Bottini-Luzardo *et al.*, 2015), en alimentación en pesebre de novillos Charolais x Santa Gertrudis (328 kg PV) con una dieta que incluía 60% de follaje de

Leucaena no se registraron síntomas de intoxicación ya que la excreción de Mimosina en orina a las 35 h de alimentados no superó las 1.6 ppm lo que se consideró como indicativo de que la Mimosina fue fermentada hasta productos inocuos para los novillos (O'Reagain *et al.*, 2014).

Concentraciones en la orina de vacas de 1000 mg L⁻¹ de 2,3-DHP o superiores se asociaron con síntomas de toxicidad e imposibilidad de degradación de este compuesto (Phaikaew *et al.*, 2012), mientras que concentraciones en orina no superiores a 100 mg L⁻¹ fueron consideradas como inocuas en novillos de engorda (Halliday *et al.*, 2013). Bottini-Luzardo *et al.* (2015) advierten que además de posibles efectos tóxicos derivados de la fermentación ruminal de Mimosina, dietas con alto contenido de Leucaena pueden promover niveles de N ureico en fluidos corporales de hasta 14.5 mg dL⁻¹ que podrían ocasionar trastornos en el comportamiento reproductivo.

Bovinos ingiriendo Leucaena mostraron hasta 60% menor conteo de huevos de nematodos gastrointestinales en heces que los bovinos pastoreando gramíneas tropicales, la menor carga parasitaria se explicó con base en que los TC de la Leucaena impidieron el desarrollo de los organismos parásitos, señalando que incorporar Leucaena a la dieta de bovinos mejora el comportamiento productivo de los mismos no solo por el mayor consumo de proteína (Soca *et al.*, 2007). *In vitro*, el extracto de hojas de Leucaena varió en el grado para contrarrestar el crecimiento y dispersión de diferentes especies y cepas de parásitos gastrointestinales, según se haya dado o no una exposición previa de estos parásitos a los TC presentes en el follaje consumido por el animal hospedero (Calderón-Quintal *et al.*, 2010). Von Sonde Fernex *et al.* (2015) encontraron en condiciones *in vitro* que el extracto acuoso de Leucaena superó al Levamisol al 1% en reducir la cantidad de huevos eclosionados de *Cooperia spp.*, proponiendo como concentración letal de este extracto 7.93 mg mL⁻¹. González *et al.* (2006a) encontraron que la inhibición *in vitro* del desarrollo y dispersión de parásitos gastrointestinales con TC no implicó ninguna mejora en el comportamiento productivo de bovinos parasitados a los que se les agregó en dieta estos mismos TC. López-Vigora *et al.* (2017) enfatizan que el ataque contra nematodos gastrointestinales dentro del hospedero debe complementarse con generar un ambiente edáfico con coleópteros coprófagos que desintegren las heces para que huevos y larvas presentes en ellas sean aniquiladas por exposición a la radiación solar y deshidratación y con hongos nematófagos que ataquen directamente a los nematodos, este ambiente edáfico puede promoverse bajo SSP que procuren cobertura del suelo, condiciones microclimáticas y materia orgánica.

Para consolidar el impacto del follaje de *Leucaena* en SSP para pastorear bovinos como un medio para contrarrestar cargas parasitarias de nematodos gastrointestinales deberá seguirse investigando sobre los factores que impiden que los resultados obtenidos *in vitro* puedan replicarse *in vivo* y sobre las condiciones microambientales físicas y biológicas de los SSP que favorecen la predación de los estados larvarios de los nematodos gastrointestinales fuera del animal hospedero.

La toxicidad por Mimosina causa alopecia, anorexia, bocio y muerte (Jones *et al.*, 1989; Dalzell *et al.*, 2012; Bindari *et al.*, 2013), la intensidad de los síntomas y la muerte dependen del nivel de consumo de *Leucaena*, cuando *Leucaena* conformó 30% o más de la dieta (Jones y Hegarty, 1984; Jones *et al.*, 1989), se registró la muerte de bovinos en particular aquellos que no tenían en rumen poblaciones de las bacterias *Synergistes jonesii*, *Streptococcus bovis* y *Klebsiella spp.*, señaladas como capaces de degradar ambos DHP's derivados de la fermentación ruminal de la Mimosina (Aung *et al.*, 2011; Dalzell *et al.*, 2012). Sin embargo, bovinos pastoreando gramíneas tropicales y *Leucaena* no presentaron síntomas de toxicidad aun cuando la dieta consumida se conformó de hasta 40% de *Leucaena* (Halliday *et al.*, 2013; Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017; Sierra-Montoya *et al.*, 2017) lo que permite resaltar la importancia de proveer de otro forraje además de la *Leucaena* como un medio para reducir el riesgo de intoxicación.

Las saponinas son otro conjunto de compuestos orgánicos presentes en el follaje de *Leucaena* con concentraciones de alrededor del 1.0% (Verdecia *et al.*, 2012), las saponinas junto con los flavonoides son compuestos con actividad antioxidante y citotóxica específica, lo que ha permitido señalarlos como compuestos con potencial contra carcinomas (Hassan *et al.*, 2014), específicamente los compuestos mas efectivos de actividad antitumoral fueron: ácido cafeico, isorhamnetina-3-O-galactósido y luteolina-7-glucósido, que superaron la actividad de los compuestos tesigos que fueron acetato de etilo, cloroformo y butanol. En bovinos, la presencia de TC, flavonoides y saponinas en el follaje de *Leucaena* reduce el riesgo de timpanismo, la degradación y metanogénesis ruminal (Morales-Velasco *et al.*, 2016).

Efecto en la reproducción

Vacas sin exposición previa a *Leucaena* al consumirla mostraron un nivel alto de Mimosina lo que se asoció a muertes embrionarias (Hammond, 1995), sin embargo, no se encontró información científica que

describa la relación causa-efecto de la Mimosina con la muerte embrionaria. Vacas consumiendo follaje de *Leucaena* registraron alteraciones en la función ovárica, una mayor vida útil del cuerpo lúteo y la expresión del estro, pero manteniendo un desarrollo folicular sin alteraciones (Cuadro 7). Los trastornos mencionados que reducen la fertilidad de las vacas responden al mayor consumo de proteína asociado a la ingesta de follaje de *Leucaena* que a su vez ocasiona niveles altos de N ureico y con ello se disminuye la progesterona circulante y se estimula la síntesis de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (Butler, 1998; Bindari *et al.*, 2013; Bottini-Luzardo *et al.*, 2015).

Peniche-González *et al.* (2014) señalan que, si las vacas consumen forraje de gramíneas y *Leucaena* se mejora la PL sin detrimento del comportamiento reproductivo de las mismas, ya que el consumo de *Leucaena* no llega a niveles que permitan la acumulación en la vaca de algún compuesto con potencial tóxico. Además de controlar el consumo de *Leucaena* con la oferta de forraje de gramínea, a través de mutaciones inducidas con etil metanosulfonato se han logrado variedades de *Leucaena* con reducciones en Mimosina de 50% o más con respecto de variedades testigo, con estas reducciones en Mimosina la *Leucaena* puede conformar 30% o más de la dieta logrando mejoras en el desempeño productivo y sin riesgo de trastornos por intoxicación (Peniche-González *et al.*, 2014; Zaky *et al.*, 2014).

Otro acercamiento para controlar el consumo de *Leucaena* y así la ingesta de Mimosina ha sido ofrecer un complemento energético como sorgo molido a 0.4% del PV de la vaca, lo que junto con reducir el consumo de *Leucaena*, incrementó la tasa de gestación en 42% y la reactivación ovárica posparto (Tinoco-Magaña *et al.*, 2012).

Efecto en la emisión de metano

Galindo *et al.* (2008) concluyeron que la defaunación ruminal de hasta 55% en animales consumiendo follaje de *Leucaena* en comparación con los alimentados con dietas sin *Leucaena* fue lo que originó la menor liberación de CH_4 ruminal, proponiendo que se deben identificar los compuestos específicos del follaje de *Leucaena* y otras leguminosas arbóreas que causan la defaunación ruminal. Clavero (2011) señala que los TC presentes en *Leucaena* y otras leguminosas pueden jugar un papel importante en la reducción del CH_4 ruminal liberado al inhibir directa o indirectamente la actividad enzimática de poblaciones bacterianas metanogénicas.

Cuadro 8. Parámetros reproductivos ($\bar{x} \pm s$) de vacas lecheras alimentadas con follaje (hojas más tallos de diámetro no mayor a 5 mm) de *Leucaena leucocephala* y *Cynodon nlemfuensis* en sistemas silvopastoriles. El número entre paréntesis indica la cantidad de registros reportados en la literatura.

Sistema ¹	PPO (días)	PVO (%)	VUPCL (días)	PVSC (%)	PPE (días)	Folículos (n) ¹			VUPFP (días)	OF (n)	TG (%)
						P (3.0–5.9 mm)	M (6.0–9.9 mm)	D (>10 mm)			
GM	56±19 (5)	56±22 (5)	17 (1)	58±14 (5)	60±6 (5)	5.0±1.5 (4)	2.8±3.5 (7)	1.2±1.2 (7)	3.9 (1)	10 (1)	34±11 (5)
PC	28 (1)	50 (1)	23 (1)	25 (1)	67 (1)	4.8±1.0 (2)	2.1±0.4 (2)	1.0±0.1 (2)	5.4 (1)	11 (1)	33 (1)

¹GM=Gramínea en monocultivo, PC=Pastura en callejones, P=Pequeños, M=Medianos, D=Dominantes, PPO=Parto-primer ovulación, PVO=Proporción de vacas en ovulación, VUPCL=Vida útil del primer cuerpo lúteo, PVSC=Proporción de vacas con signos de celo, PPE=Parto-primer estro, VUPFP=Vida útil del primer folículo preovulatorio, OF=Ondas foliculares y TG=Tasa de gestación. Adaptado de: Aguilar-Pérez *et al.* (2009 a, b), Pinto-Santini *et al.* (2009), Peniche-González *et al.* (2014) y Bottini-Luzardo *et al.* (2015)

Huang *et al.* (2010) encontraron *in vitro* 82% menor liberación de CH₄ cuando el medio de cultivo contenía TC de 2871 Da a una dosis de 40 mg kg⁻¹ MS con respecto al medio sin TC, Tan *et al.* (2011) registraron 1.9 veces menos CH₄ liberado cuando el medio de cultivo contenía 60 mg de TC kg⁻¹ MS. Además de la concentración, el peso molecular de los TC determina la magnitud de la reducción del CH₄ liberado, a mayor peso molecular mayor es la reducción en la emisión de CH₄, Huang *et al.* (2011) registraron 27% y 1.6 veces menos CH₄ con TC de 495 y 1349 Da de peso molecular, respectivamente. Los TC de mayor peso molecular se ligan con proteínas como la prodeifindina y procianidina provocando un patrón de fermentación ruminal con menor producción de CH₄ (Saminathan *et al.*, 2014).

Vaquillas consumiendo una dieta con 3% de TC redujeron 48 y 85% el CH₄ ruminal y la pérdida de energía bruta como CH₄ liberado, en comparación a las vaquillas con una dieta libre de taninos condensados (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2016); en condiciones *in vitro*, medios de cultivo con follaje de *Leucaena* conteniendo 4.4% de TC kg MS⁻¹ emitieron en promedio 8.9 mL de CH₄ g⁻¹ de MS que fue la menor cantidad en comparación a lo obtenido en otros medios de cultivo conteniendo forraje de otras especies (Soltan *et al.*, 2016). Los TC en el rumen pueden tener acciones biocidas o bacteriostáticas contra organismos metanogénicos y contra bacterias celulolíticas lo que disminuye la fermentación de carbohidratos estructurales y con ello la producción de acetato, la formación de CO₂ y poder reductor (H₂) necesarios para la metanogénesis (Jayanegara *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2011; Goel y Makkar, 2012; Saminathan *et al.*, 2015 y 2016), y si el CH₄ pudiera reemplazarse por el acetato esta acetogénesis reductiva implicaría una ganancia energética de hasta 15% (Joblin, 1999). También, la manipulación de la población microbiana en rumen con vacunas de metanógenos reduce la actividad metanogénica y con ello una reducción

superior a 7% de CH₄ en base seca (Wright *et al.*, 2007; McAllister y Newbold, 2008).

CONCLUSIONES

Los sistemas silvopastoriles con *Leucaena* en callejones proveen de un follaje que puede mejorar la productividad y eficiencia de la ganadería bovina pastoril en ambientes tropicales, por contener mayor cantidad de proteína (24.9% PB) y energía (4.6 Mcal EB kg MS⁻¹) y favorecer un consumo voluntario individual (7.11 kg MS día⁻¹) mayor que el follaje de los sistemas con praderas de gramíneas tropicales. La mejora en productividad y eficiencia es sin originar mayor contaminación del ambiente por emisión de metano (21% menor pérdida calculada de energía bruta en forma de CH₄ ruminal) a través del mejoramiento de la calidad de la fibra en la dieta y a un efecto tóxico directo sobre los metanógenos. Los taninos condensados de las hojas de *Leucaena* en niveles inferiores a 4.0% de la dieta en base seca pueden ofrecer a los bovinos que las ingieran proteína de sobrepaso y atenuación del impacto negativo de cargas de parásitos gastrointestinales; sin embargo, a niveles altos de consumo de *Leucaena* (>40% de inclusión en la dieta base seca) o en bovinos no adaptados al consumo de *Leucaena*, se puede presentar toxicidad por compuestos derivados de la fermentación ruminal de la mimosina (3,4-DHP y 2,3-DHP) presente en las hojas de *Leucaena*. La mejora genética de *Leucaena* debe buscar poblaciones con menor contenido de mimosina (<5% base seca) que es el compuesto orgánico con potencial de contrarrestar los impactos positivos sobre la productividad de bovinos consumiendo *Leucaena*.

REFERENCIAS

Aguilar-Pérez, C., Ku-Vera, J., Centurión-Castro, F., Gamsworthy, P.C. 2009a. Energy balance, milk production and reproduction in grazing crossbred cows

- in the tropics with and without cereal supplementation. *Livestock Science*. 122: 227-233. DOI: 10.1016/j.livsci.2008.09.004
- Aguilar-Pérez, C., Ku-Vera, J., Gamsworthy, P.C. 2009b. Effects of bypass fat on energy balance, milk production and reproduction in grazing crossbred cows in the tropics. *Livestock Science*. 121: 64-71. DOI: 10.1016/j.livsci.2008.05.023
- Aguirre, O.J. 2013. Características nutricionales de algunas leñosas forrajeras. *Abanico Veterinario*. 3: 42-51. URL: <http://132.248.9.34/hevila/Abanicoveterinario/2013/vol3/no3/5.pdf>. Acceso noviembre 2017.
- Aleixo, V., Contro Malavasi, U., Calegário, N., de Matos Malavasi, M., Macedo Júnior, E.K. 2008. Allometric relationships in *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Ciência Florestal*. 18: 329-338. DOI: 10.5902/19805098444
- Anguiano, J.M., Aguirre, J., Palma, J.M. 2013. Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocus nucifera*, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Permisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17: 149-160.
- Aung, A., Ter Meulen, U., Gessler, F., Böhnelt, H. 2011. Isolation of mimosine degrading bacteria from rumen juice and mass production by göttingen bioreactor technology. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 1: 764-772.
- Ávila, F.V.S., Revollo, F.D.A. 2014. Análisis financiero y percepción de los servicios ambientales de un sistema silvopastoril: un estudio de caso en los Tuxtlas, México. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 22: 17-33.
- Ayala-Burgos, A., Cetina-Góngora, R., Capitillo-Leal, C., Zapata-Ramos, C., Sandoval-Castro, C. 2006. Composición química-nutricional de árboles forrajeros. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, Mexico. p. 41.
- Bacab-Pérez, H.M., Solorio-Sánchez, F.J. 2011. Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13: 271-278.
- Bacab, H.M., Madera, N.B., Solorio, F.J., Vera, F., Marufo, D.F. 2013. Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17: 67-81.
- Bacab, H.M., Solorio, F.J., Solorio, S.B. 2012. Efecto de la altura de poda en *Leucaena leucocephala* y su influencia en el rebrote y rendimiento de *Panicum maximum*. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 16: 65-77.
- Barahona, R., Sánchez, M.S., Murgueitio, E., Chará, J. 2014. Contribución de la *Leucaena leucocephala* Lam (de Wit) a la oferta y digestibilidad de nutrientes y las emisiones de metano entérico en bovinos pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. *Carta Fedegán*. 140: 66-69.
- Barros-Rodríguez, M.A., Sandoval-Castro, C.A., Solorio-Sánchez, F.J., Sarmiento-Franco, L.A., Rojas-Herrera, R.A., Klieve, A. V. 2014. *Leucaena leucocephala* in ruminant nutrition. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17: 173-183.
- Barros-Rodríguez, M.A., Solorio-Sánchez, F.J., Sandoval-Castro, C.A., Klieve, A., Rojas-Herrera, R.A., Briceño-Poot, E.G., Ku-Vera, J.C. 2015. Rumen function *in vivo* and *in vitro* in sheep fed *Leucaena leucocephala*. *Tropical Animal Health and Production*. 47: 757-764. DOI: 10.1007/s11250-015-0790-y
- Bautista-Tolentino, M., López-Ortiz, S., Pérez-Hernández, P., Vargas-Mendoza, M., Gallardo-López, F., Gómez-Merino, F. C. 2011. Sistemas agro y silvopastoriles en la comunidad El Limón, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: 63-76.
- Beauchemin, K., McAllister, T.A., McGinn, S.M. 2009. Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*. 4: 1-18. DOI: 10.1079/PAVSNNR20094035
- Benítez-Bahena, Y., Bernal-Hernández, A., Cortés-Díaz, E., Vera-Castillo, G., Camillo-Anzués. 2010. Producción de forraje de guaje (*Leucaena* spp.) asociado con zacate (*Brachiaria brizantha*) para ovejas en pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1: 397-411.
- Bergman, E.N. 1990. Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews*. 70: 567-590. DOI: 10.1152/physrev.1990.70.2.567
- Bindari, Y.N., Enyenihi, G., Akpabio, U., Offiong, E. 2013. Effects of nutrition on reproduction: a review. *Advances in Applied Science Research*. 10: 413-424.
- Bodas, R., López, S., Fernandez, M., García-González, R., Rodríguez, A.B., Wallace, R.J., Gonzalez, J.S. 2008. *In vitro* screening of the potential of numerous plant species as antimethanogenic feed additives for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 145: 245-258. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2007.05.036
- Bobadilla-Hernández, A.R., Ramírez-Avilés, L., Sandoval-Castro, C.A. 2007. Effect of supplementing tree foliage to grazing dual-purpose cows on milk composition and yield. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 6: 1042-1046.
- Bottini-Luzardo, M., Aguilar-Pérez, C., Centurion-Castro, F., Solorio-Sánchez, F., Ayala-Burgos, A., Montes-Pérez,

- R., Muñoz-Rodríguez, D., Ku-Vera, J. 2015. Ovarian activity and estrus behavior in early postpartum cows grazing *Leucaena leucocephala* in the tropics. *Tropical Animal Health and Production*. 47: 1481-1486. DOI: 10.1007/s11250-015-0887-3
- Brewbaker, J.L. 1995. *Leucaena*. Dept. Horticulture, University of Hawaii. URL: <https://hort.purdue.edu/newcrop/CropFactSheets/leucaena.html#Cultivars>. Acceso Mayo 2018.
- Broom, D.M., Galindo, F.A., Murgueitio, E. 2013. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of Royal Society B*. 280: 2013-25. DOI: 10.1098/rspb.2013.2025
- Bugarín, J., Lemus, C., Sanjinés, L., Aguirre, J., Ramos, A., Soca, M., Arece, J. 2009. Evaluación de dos especies de *Leucaena*, asociada a *Brachiaria brizantha* y *Clitoria ternatea* en un sistema silvopastoril de Nayarit, México. II. Producción y composición bromatológica de la biomasa. *Pastos y Forrajes*. 32:1-9.
- Bunglavan, S.J. 2014. Methanogenesis and recent techniques for mitigation of methanogenesis in ruminants. *Journal of Livestock Science*. 5: 35-48.
- Butler, W.R. 1998. Review: Effect of protein nutrition on ovarian and uterine physiology in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 81:2533-2539.
- Cabrera, T.E.J., Sosa, R.E.E., Castellanos, R.A.F., Gutiérrez, B.A.O., Ramírez, S.J.H. 2009. Comparación de la concentración mineral en forrajes y suelos de zonas ganaderas del estado de Quintana Roo, México. *Veterinaria México*. 40: 167-179.
- Calderón-Quintal, J.A., Torres-Acosta, J.F.J., Sandoval-Castro, C.A., Alonso, M.A., Hostec, H., Aguilar-Caballero, A. 2010. Adaptation of *Haemonchus contortus* to condensed tannins: can it be possible? *Archivos de Medicina Veterinaria*. 42: 165-171. DOI: 10.4067/S0301-732X2010000300007
- Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J. 2012. Integrating forestry, sustainable cattle-ranching and landscape restoration. *Unasylva*. 63: 31-40.
- Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J., Molina, C.H., Zuluaga, A.F., Calle, A. 2013. A strategy for scaling-up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia. *Journal of Sustainable Forestry*. 32: 677-693. DOI: 10.1080/10549811.2013.817338
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., Solorio-Sánchez, F.J., Parsons, D., Ramírez-Avilés, L. 2014. Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry Systems*. 88: 29-39. DOI: 10.1007/s10457-013-9652-7
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A.T., Díaz-Echeverría, V. 2016. Environmental services from tropical agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22: 269-284. DOI: 10.5154/r.chscfa.2015.06.02
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Solorio-Sánchez, F.J. 2010. Efecto del intervalo de poda sobre la biomasa foliar y radical en árboles forrajeros en monocultivo y asociados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 12: 657-665.
- Chakeredza, S., Hove, L., Akinnifesi, F.K., Franzel, S., Ajayi, O.C., Sileshi, G. 2007. Managing fodder trees as a solution to human-livestock food conflicts and their contribution to income generation for smallholder farmers in southern Africa. *Natural Resources Forum*. 31: 286-296.
- Church, D.C., Pond, W.G., Pond, K.R. 2002. *Fundamentos de nutrición y alimentación de animales*. 2da. Ed. Limusa-Wiley. México D.F. 636 p.
- Clavero, T. 2011. Agroforestería en la alimentación de rumiantes en América Tropical. *Ciencias del Agro, Ingeniería y Tecnología*. 2: 11-35.
- Cortez, E.J.G., Uribe, G.M., Cruz, L.A., Lara, B.A., Romo, L.J.L. 2016. Árboles nativos para el diseño de tecnologías silvopastoriles en la Sierra de Huautla, Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3371-3380.
- Cuartas, C.C.A., Naranjo, R.J.F., Tarazona, M.A.M., Barahona, R.R. 2013. Uso de la energía en bovinos pastoreando sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* y su relación con el desempeño animal. *Revista CES de Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 8: 70-81.
- Cuartas, C.C.A., Naranjo, R.J.F., Tarazona, M.A.M., Correa, L.G.A., Barahona, R.R. 2015. Consumo de materia seca y nutrientes y composición de la dieta en sistemas silvopastoriles intensivos basados en *Leucaena leucocephala*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 18: 303-311.
- Cuartas, C.C.A., Naranjo, R.J.F., Tarazona, M.A.M., Murgueitio, R.E., Chará, O.J.D., Ku Vera, J., Solorio, S.F.J., Flores, E.M.X., Solorio, S.B., Barahona, R.R. 2014. Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 27: 76-94.
- Dalzell, S.A., Burnett, D.J., Dowsett, J.E., Forbes, V.E., Shelton, H.M. 2012. Prevalence of mimosine and DHP toxicity in cattle grazing *Leucaena leucocephala* pastures in Queensland, Australia. *Animal Production Science*. 52: 365-372. DOI: 10.1071/AN11236
- Díaz, C.A., Torres, C.V., Herrera, G.S.M., Fernández, C.L., Sarduy, G.L. 2014. Modelación del crecimiento de bovinos en pastoreo con gramíneas y leguminosas. *Zootecnia Tropical*. 32: 363-376.

- Depablos, L., Godoy, S., Chico, C.F., Ordoñez, J. 2009. Nutrición mineral en sistemas ganaderos de las sabanas centrales de Venezuela. *Zootecnia Tropical*. 27: 25-37.
- Eckard, R.J., Grianger, C., de Klein, C.A.M. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*. 130: 47-56. DOI: 10.1016/j.livsci.2010.02.010
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2006. *Livestock report 2006*. FAO. Rome, Italy. URL: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0255e/a0255e.pdf>. Acceso Septiembre 2017.
- Fariá, M.J., Sánchez, A. 2007. Efecto del aplazamiento de utilización sobre el contenido de nutrientes y digestibilidad de la materia orgánica de la asociación buffel-leucaena. *Interciencia*. 32: 185-185.
- Fariá, M.J., Chirinos, Z., Morillo, D. 2007. Efecto de la sustitución parcial de alimento concentrado por pastoreo en *Leucaena leucocephala* sobre la producción y características de la leche y variación de peso de vacas mestizas. *Zootecnia Tropical*. 25: 245-251.
- Galindo, J., González, N., Delgado, D., Sosa, A., Marrero, Y., González, R., Aldana, A.I., Moreira, O. 2008. Efecto modulador de *Leucaena leucocephala* sobre la microbiota ruminal. *Zootecnia Tropical*. 26: 249-252.
- Galindo, J., Marrero, Y., Ruiz, T., González, N., Díaz, A., Aldama, A., Moreira, O., Hernández, J., Torres V., Sarduy, L. 2009. Efecto de una mezcla múltiple de leguminosas herbáceas y *Leucaena leucocephala* en la población microbiana y productos fermentativos del rumen de añejos mestizos de Cebú. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*. 43: 256-264.
- García, D., Hilda, W.G., Gonzáles, M., Medina, M., Cova, L. 2008a. Caracterización de diez cultivares forrajeros de *Leucaena leucocephala* basada en la composición química y la degradabilidad ruminal. *Revista de Medicina Veterinaria y Zootecnia Córdoba*. 13: 1295-1303.
- García, D.E., Medina, M.G., Cova, L.J., Soca, M., Pizzani, P., Baldizán, A., Domínguez, C.E. 2008b. Aceptabilidad de follajes arbóreos tropicales por vacunos, ovinos y caprinos en el estado Trujillo, Venezuela. *Zootecnia Tropical*. 26: 191-196.
- García, D.E., Wencome, H.B., Gonzalez, M.E., Medina, M.G., Cova, L.J., Spengler, I. 2008c. Evaluación de diecinueve accesiones de *Leucaena leucocephala* basada en la calidad nutritiva del forraje. *Zootecnia Tropical*. 26: 9-18.
- García, D.E., Wencome, H.B., Medina, M.G., Cova, L.J., González, M.E., Pisan, P., Domínguez, C.E., Baldizán, A. 2008d. Variación interespecífica de la calidad nutricional de diecisiete accesiones de *Leucaena*. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 12: 67-80.
- García, D.E., Wencome, H.B., Medina, M.G., Moratinos, P., Cova, L.J. 2009. Caracterización de la calidad nutritiva de 53 accesiones del género *Leucaena* en condiciones tropicales. *Pastos y Forrajes*. 32: 1-16.
- Gaviria, X., Naranjo, J.F., Barahona, R. 2015. Cinética de fermentación *in vitro* de *Leucaena leucocephala* y *Megathyrsus maximus* y sus mezclas, con o sin suplementación energética. *Pastos y Forrajes*. 38: 55-63.
- Gaviria-Unibe, X., Naranjo-Ramírez, J.F., Bolívar-Vergara, D.M., Barahona-Rosales, R. 2015. Consumo y digestibilidad en novillos cebuinos en un sistema silvopastoril intensivo. *Archivos de Zootecnia*. 64: 21-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.21071/az.v64i245.370>
- Godoy, S., López, M., Alfaro, C., Chicco, C.F. 2007. Nutrición mineral de bovinos en las sabanas orientales de Venezuela. APPA - ALPA - Cusco, Perú, 2007. pp. 1-4.
- Goel, G., Makkar, H.P. 2012. Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health and Production*. 44: 729-739. DOI: 10.1007/s11250-011-9966-2
- Gómez, C.H., Nahed, T.J., Tewolde, A., Pinto, R.R., López, M.J. 2006. Áreas con potencial para el establecimiento de árboles forrajeros en el centro de Chiapas. *Técnica Pecuaria en México*. 44: 219-230.
- González, J.M. 2013. Costos y beneficios de un sistema silvopastoril intensivo (SSPi), con base en *Leucaena leucocephala* (Estudio de caso en el municipio de Tepalcatepec, Michoacán, México). *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17: 35-50.
- González, G.J.C., Ayala, B.A., Gutiérrez, V.E. 2006a. Determinación de fenoles totales y taninos condensados de especies arbóreas con potencial forrajero de la región de tierra caliente del estado de Michoacán, México. *Livestock Research for Rural Development*. 18: 1-9. URL: <http://www.lrrd.org/lrrd18/11/guti18152.htm>. Acceso Mayo 2017.
- González, G.J.C., Madrigal, S.X., Ayala, B.A., Juárez, C.A., Gutiérrez, V.E. 2006b. Especies arbóreas de uso múltiple para la ganadería en la región de tierra caliente del estado de Michoacán, México. *Livestock Research for Rural Development*. 18: 1-8. URL: <http://www.lrrd.org/lrrd18/8/gonz18109.htm>. Acceso Mayo 2017.
- Ghosh, M.K., Samiran, B. 2007. Mimosine toxicity - a problem of *Leucaena* feeding in ruminants. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2: 63-73. DOI: 10.3923/ajava.2007.63.73
- Halliday, M.J., Padmanabha, J., McSweeney, C.S., Kerven, G., Shelton, H.M. 2013. *Leucaena* toxicity: a new perspective on the most widely used forage tree

- legume. Tropical Grasslands. 1: 1-11. DOI: 10.17138/TGFT(1)1-11
- Hammond, A. 1995. *Leucaena* toxicosis and its control in ruminants. Journal of Animal Science 73: 1487-1492. DOI: 10.2527/1995.7351487x
- Harith, E., Szyzka, M., Günther, K.D., Meulen, U. 1987. A method for large scale extraction of mimosine. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 57: 105-110.
- Harrison, M.T., McSweeney, C., Tomkins, N.W., Eckard, R.J. 2015. Improving greenhouse gas emissions intensities of subtropical and tropical beef farming systems using *Leucaena leucocephala*. Agricultural System. 136: 138-146. DOI: 10.1016/j.agsy.2015.03.003
- Hassan, R.A., Tawfik, W.A., Abou-Setta, L.M. 2014. The flavonoid constituents of *Leucaena leucocephala*. Growing in Egypt, and their biological activity. African Journal of Traditional Complementary and Alternative Medicines. 11: 67-72. DOI: 10.4314/ajtcam.v11i1.9
- Hove, L., Franzel, S., Moyo, P.S. 2003. Farmer experiences on the production and utilization of fodder trees in Zimbabwe. Constraints and opportunities for increased adoption. Tropical Grasslands. 37: 279-283.
- Huang, X.D., Liang, J.B., Tan, H.Y., Yahya, R., Khamsekhiew, B., Ho, Y.W. 2010. Molecular weight and protein binding affinity of *Leucaena* condensed tannins and their effects on *in vitro* fermentation parameters. Animal Feed Science and Technology. 159: 81-87. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2010.05.008
- Huang, X., Liang, J., Tan, H., Yahya, R., Ho, Y. 2011. Effects of *Leucaena* condensed tannins of differing molecular weights on *in vitro* CH₄ production. Animal Feed Science and Technology. 166: 373-376. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2011.04.026
- Ibrahim, M., Villanueva, C., Casasola, F. 2007. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y rehabilitación ecológica de paisajes ganaderos en Centro América. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. 15: 74-88.
- Ilham, Z., Hamidon, H., Rosji, N.A., Ramli, N., Osman, N. 2015. Extraction and quantification of toxic compound mimosine from *Leucaena leucocephala* leaves. Procedia Chemistry. 16: 164-170. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.029
- Jarillo-Rodríguez, J., Castillo-Gallegos, E., Flores-Garrido, A.F., Valles-de la Mora, B., Ramírez, L., Avilés, L., Escobar-Hernández, R., Ocaña-Zavaleta, E. 2011. Forage yield, quality and utilization efficiency on native pastures under different stocking rates and seasons of the year in the Mexican humid tropic. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 13: 417-427.
- Jayanegara, A., Leiber, F., Kreuzer, M. 2011. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from *in vivo* and *in vitro* experiments. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 96: 365-375. DOI: 10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x
- Jiménez-Ferrer, J.G., López-Carmona, M., Nahed-Toral, J., Ochoa-Gaona, S., Ben de Jong. 2008a. Árboles y arbustos forrajeros de la región norte-trotal de Chiapas, México. Veterinaria México. 39: 199-213.
- Jiménez-Ferrer, J.G., Pérez-López, H., Soto-Pinto, M.L., Nahed-Toral, J., Hernández-López, L., Carmona de la Torre, J. 2007. Livestock, nutritive value and local knowledge of fodder trees in fragment landscapes in Chiapas, Mexico. Interciencia. 32: 274-280.
- Jiménez-Ferrer, J.G., Velasco-Pérez, R., Uribe Gómez, M., Soto-Pinto, L. 2008b. Ganadería y conocimiento local de árboles y arbustos forrajeros de la selva Lacandona, Chiapas, México. Zootecnia Tropical. 26: 333-337.
- Jiménez, T.J.A. 2007. Diseño de sistemas de producción ganaderos sostenibles con base a los sistemas silvopastoriles (SSP) para mejorar la producción animal y lograr la sostenibilidad ambiental. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Jones, R., McLennan, M., Dowset, K. 1989. The effect of *Leucaena leucocephala* on the reproduction of beef cattle grazing *Leucaena*/grass pastures. Trop Grasslands. 23:108-114.
- Jones, R.J., Hegarty, M.P. 1984. The effect of different proportions of *Leucaena leucocephala* in the diet of cattle on growth, feed-intake, thyroid-function and urinary-excretion of 3-hydroxy-4(1h)-pyridone. Australian Journal of Agricultural Research 35, 317-325. doi:10.1071/AR9840317
- Kanani, J., Lukefahr, S.D., Stanko, R.L. 2006. Evaluation of tropical forage legumes (*Medicago sativa*, *Dolichos lablab*, *Leucaena leucocephala* and *Desmanthus bicornutus*) for growing goats. Small Ruminant Research. 65: 1-7. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.04.028
- Knapp, J.R., Laur, G.L., Vadas, P.A., Weiss, W.P., Tricarico, J. M. 2014. Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. Journal of Dairy Science. 97: 3231-3261. DOI: 10.3168/jds.2013-7234
- Kolanowski, W., Laufenberg, G. 2006. Enrichment of food products with polyunsaturated fatty acids by fish oil addition. European Food Research and Technology. 222: 472-477. DOI: 10.1007/s00217-005-0089-8
- Kumar, P., Singh, R.P., Singh, A.K., Kumar, V. 2014. Quantification and distribution of agro forestry systems and practices at global level. HortFlora Research Spectrum. 3: 1-6.

- Kumaresan, A., Bujarbaruah, K.M., Pathak, K.A., Brajendra, I., Ramesh, T. 2010. Soil-plant-animal continuum in relation to macro and micromineral status of dairy cattle in subtropical hillagro ecosystem. *Tropical Animal Health and Production*. 42: 569-577. DOI: 10.1007/s11250-009-9459-8
- Lamela, L., López, O., Sánchez, T., Díaz, M., Valdés, R. 2009. Efecto del sistema silvopastoril en el comportamiento productivo de vacas Holstein. *Pastos y Forrajes*. 32: 1-12.
- López, O., Lamela, L., Montejó, I.L., Sánchez, T. 2015. Influencia de la suplementación con concentrado en la producción de leche de vacas Holstein x Cebú en silvopastoreo. *Pastos y Forrajes*. 38: 46-54.
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J.M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J., Milera-Rodríguez, M. de la C. 2017. Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*. 40: 83-95.
- Mahecha, L., Escobar, J.P., Suárez, J.F., Restrepo, L.F. 2007. *Tithonia diversifolia* (botón de oro) como suplemento forrajero de vacas F1 (Holstein x Cebú). *Livestock Research for Rural Development*. 1: 1-7. URL: <http://lrrd.cipav.org.co/lrrd19/2/mahe19016.htm>. Acceso Mayo 2017.
- Martínez, M.M., Reyes, C.A., Lara, B.A., Miranda, R.L.A., Huerta, B.M., Uribe, G.M. 2016. Composición nutricional de leucaena asociada con pasto estrella en la Huasteca Potosina de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3343-3355.
- Mayo-Eusebio, R., Utrilla-García, M.P., Aguilar-Pérez, C.F., Solorio-Sánchez, F.J., Ayala-Burgos, A.J., Briceño-Poot, E.G., Ramírez-Avilés, L., Ku-Vera, J.C. 2013. Productive performance of growing cattle grazing a silvopastoral system with *Leucaena leucocephala*. In: *Proceedings of the 22nd International Grassland Congress*, Sydney, Australia. p. 1013-1014.
- McAllister, T.A., Newbold, C.J. 2008. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 48:7-13.
- McDowell, L.R., Arthington, J.D. 2005. *Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales*. 4ª. ed. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA.
- Memmott, K.L., Anderson, V.J., Fugal, R. 2011. Seasonal dynamics of forage shrub nutrients. *Rangelands*. 33: 12-16. DOI: 10.2111/1551-501X-33.6.12
- Mijares, L.H., Hernández, M.O., Mendoza, M.G., Vargas, V.L., Aranda, I.E. 2012. Cambio de peso de toretes en pastoreo en el trópico: respuesta a suplementación con bloque multinutricional. *Universidad y Ciencia*. 28: 39-49.
- Milera, M. 2013. Contribución de los sistemas silvopastoriles en la producción y el medio ambiente. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17: 7-24.
- Min, B.R., Pinchak, W.E., Anderson, R.C., Fulford, J.D., Puchala, R. 2006. Effects of condensed tannins supplementation level on weight gain and *in vitro* and *in vivo* bloat precursors in steers grazing winter wheat. *Journal of Animal science*, 84: 2546-2554. DOI: 10.2527/jas.2005-590
- Minson, D.J. 1990. *Forage in ruminant nutrition*. San Diego: Academic Press.
- Molina, B.I.C., Cantet, J.M., Montoya, S., Correa, L.G.A., Barahona, R.R. 2013. Producción de metano *in vitro* de dos gramíneas tropicales solas y mezcladas con *Leucaena leucocephala* o *Gliricidia sepium*. *Revista CES de Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 8: 15-31.
- Molina, I.C., Angarita, E.A., Mayorga, O.L., Chará, J., Barahona, R.R. 2016. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of Lucerna heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livestock Science*. 185: 24-29. DOI: doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.009
- Molina, I.C., Donney's, G., Montoya, S., Rivera, J.E., Villegas, G., Chará, J., Barahona, R. 2015. La inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de temeras Lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrsus maximus*. *Livestock Research for Rural Development*. 27: 35-43. URL: <http://www.lrrd.org/lrrd27/5/moli27096.html>. Acceso Mayo 2017.
- Morales-Velasco, S., Vivas-Quila, N.J., Teran-Gomez, V.F. 2016. Ganadería eco-eficiente y la adaptación al cambio climático. *Biocnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 14: 135-144. DOI: 10.18684/BSAA(14)135-144
- Muñoz-González, J.C., Huerta-Bravo, M., Rangel-Santos, R., Lara-Bueno, A., De la Rosa-Arana, J.L. 2014. Evaluación mineral de forrajes del trópico húmedo mexicano. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17: 285-287.
- Muñoz-González, J.C., Huerta-Bravo, M., Lara-Bueno, A., Rangel-Santos, R., De la Rosa-Arana, J.L. 2016. Producción y calidad nutricional de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3315-3327.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., Solorio, B. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*. 261:1654-1663.
- Murgueitio, R.E., Barahona, R., Chará, J.D., Flores, M.X., Mauricio, R.M., Molina, J.J. 2015a. The intensive silvopastoral systems in Latin America sustainable alternative to face climatic change in animal husbandry. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 49: 541-554.

- Murgueitio, R.E., Barahona, R.R., Flores, E.M.X., Chará, O.J.D., Rivera, H.J.E. 2016. Es posible enfrentar el cambio climático y producir más leche y carne con sistemas silvopastoriles intensivos. *Ceiba*. 54: 23-30. DOI: 10.5377/ceiba.v54i1.2774
- Murgueitio, E., Barahona, R., Martins, R., Flores, M.X., Chará, J., Solorio, F.J. 2015b. Intensive Silvopastoral Systems: improving sustainability and efficiency in cattle ranching landscapes. FAO. Rome, Italy.
- Návar-Cháidez, J., Rodríguez-Flores, F.D., Domínguez-Calleros, P.A. 2013. Ecuaciones alométricas para árboles tropicales: aplicación al inventario forestal de Sinaloa, México. *Agronomía Mesoamericana*. 24: 347-356.
- Naranjo, J.F., Ceballos, O.A., Gaviria, X., Tarazona, A.M., Correa, G.A., Chará, J.D., Murgueitio, E., Barahona, R. 2016. Estudio de la cinética fermentativa *in vitro* de mezclas de forrajes que incluyen *Leucaena leucocephala* proveniente de sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en Colombia. *Revista CES de Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 11: 6-17.
- Naranjo, J.F., Cuartas, C.A., Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R. 2012. Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*. 24. Obtenido el 26 de febrero de 2017 de <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/nara24150.htm>
- National Research Council (NRC). 2016. Nutrient requirements of beef cattle. 8th ed. National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Ørskov, E.R. 2005. Silvopastoral systems: technical, environmental and socio-economic challenges. *Pastos y Forrajes*. 28:5-9.
- O'Regain, J.H., Graham, S.R., Dalzell, S.A., Shelton, H.M. 2014. Rates of urinary toxin excretion in unprotected steers fed *Leucaena leucocephala*. *Tropical Grassland*. 2: 103-105.
- Ortega-Gómez, R., Castillo-Gallegos, E., Jarillo-Rodríguez, J., Escobar-Hernández, R., Ocaña-Zavaleta, E., Valles de la Mora, B. 2011. Nutritive quality of ten grasses during the rainy season in a hot-humid climate and ultisol soil. *Tropical and Subtropical Agroecosystem*. 13: 481-491.
- Ortega, R.L., Castillo, H.J.E., Rivas, P.F.A. 2009. Conducta ingestiva de bovinos cebú adultos en leucaena manejada a dos alturas diferentes. *Técnica Pecuaria en México*. 47: 125-134.
- Osechas, D., Becerra, L., Rodríguez, I. 2008. Uso de *Leucaena leucocephala* como recurso forrajero en fincas doble propósito del estado Trujillo, Venezuela. *Agricultura Andina*. 14: 49-58.
- Otero, M.J., Hidalgo, L.G. 2004. Taninos condensados en especies forrajeras de clima templado: efectos sobre la productividad de rumiantes afectados por parasitosis gastrointestinales (una revisión). *Livestock Research for Rural Development*. 16. Obtenido el 12 de abril de 2018 de: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd16/2/oter1602.htm>
- Paciullo, D.S.C., Castro, C.R.T., Gomide, C.A.M., Mauricio, R.M., Pires, M.F.A., Müller, M.D., Xavier, D.F. 2011. Performance of dairy heifers in a silvopastoral system. *Livestock Science*. 141: 166-172. DOI: 10.1016/j.livsci.2011.05.012
- Palma, J.M. 2006. Los sistemas silvopastoriles en el trópico seco mexicano. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 14: 95-104.
- Peniche-González, I.N., González-López, Z.U., Aguilar-Pérez, C.F., Ku-Vera, J.C., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J. 2014. Milk production and reproduction of dual-purpose cows with a restricted concentrate allowance and access to an association of *Leucaena leucocephala* and *Cynodon nlemfuensis*. *Journal of Applied Animal Research*. 42: 345-351. DOI: 10.1080/09712119.2013.875902
- Peralta, J.R., Nuñez, J.J., & Branda, L. 2012. Utilización de *Leucaena leucocephala* como fuente de proteína, sobre la ganancia de peso, en novillos sobre pastura cultivada en el departamento de Presidente Hayes-Paraguay. *Compendio de Ciencias Veterinarias*. 2: 22-25.
- Pérez, A.N., Ibrahim, M., Villanueva, C., Skarpe, C., Guerin, H. 2013. Diversidad forrajera tropical. 2. Rasgos funcionales que determinan la calidad nutricional y preferencia de leñosas forrajeras para su inclusión en sistemas de alimentación ganadera en zonas secas. *Agroforestería en las Américas*. 50: 44-52.
- Petit, A.J., Casanova, L.F., Solorio, S.F. 2010. Rendimiento de forraje de *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* asociadas y en monocultivo en un banco de forraje. *Revista Forestal Venezolana*. 54: 161-167.
- Petit, A.J., Uribe, G., Casanova, F., Solorio, F., Ramírez, L. 2011. Composición química y rendimiento de forraje de *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* asociadas y en monocultivo en Yucatán, México. *Revista Forestal Latinoamericana*. 26: 35-65.
- Phaikaew, C., Suksaran, W., Ted-Arsen, J., Nakamane, G., Saichue, A., Seejundee, S., Kotprom, N., Shelton, H.M. 2012. Incidence of subclinical toxicity in goats and dairy cows consuming leucaena (*Leucaena leucocephala*) in Thailand. *Animal Production Science*. 52: 283-286. DOI: 10.1071/AN11239
- Pinto, R.R., Ortega, R.L., Gómez, C.H., Guevara, H.F., Hernández, S.D. 2014. Comportamiento animal y características de la dieta de bovinos pastoreando estrella africana sola y asociada con árboles. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 5: 365-374.

- Pinto-Santini, L., Drescher, K., Ruiz, A. Pérez, R., Domínguez, C., Benezra M., Martínez, N. 2009. Relación entre los niveles de glucosa e insulina sanguínea y el reinicio de la actividad ovárica en vacas de doble propósito con diferentes condiciones corporales al parto y diferente nivel de alimentación postparto. *Interciencia*. 34: 350-355.
- Piñero-Vázquez, A.T., Canul-Solis, J.R., Alayón-Gamboa, J.A., Chay-Canul, A.J., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Aguilar-Pérez, C.F., Ku-Vera, J.C. 2016. Energy utilization, nitrogen balance and microbial protein supply in cattle fed *Pennisetum purpureum* and condensed tannins. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 1-11. DOI: 10.1111/jpn.12436
- Piñero-Vázquez, A.T., Jiménez-Ferrer, G.O., Chay-Canul, A.J., Casanova-Lugoc, F., Díaz-Echeverría, V.F., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Aguilar-Pérez, C.F., Ku-Vera, J.C. 2017. Intake, digestibility, nitrogen balance and energy utilization in heifers fed low-quality forage and *Leucaena leucocephala*. *Animal Feed Science and Technology*. 228: 191-201. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2017.04.009.
- Ramírez, A.L., Ku, V.J.C., Alayón, G.J.A. 2007. Follaje de árboles y arbustos en los sistemas de producción bovina de doble propósito. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 15: 251-64.
- Razz, R., Clavero, T. 2007. Efecto de la suplementación con concentrado sobre la composición química de la leche en vacas doble propósito pastoreando *Panicum maximum*-*Leucaena leucocephala*. *Revista Científica, FCV-LUZ*. 17: 53-57.
- Razz, G.R.C. 2013. *Leucaena leucocephala*: alternativa alimenticia en la ganadería tropical. En: Manejo de Pastos y Forrajes Tropicales. Cuadernos Científicos Girar 13. Perozo Bravo A. (ed). Fundación Girar. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo, Venezuela, pp. 185-192.
- Reyes, J.J., Padilla, C., Martín, P.C., Gálvez, M., Rey, S., Noda, A. Redilla, C. 2015. Consumo de forrajes tropicales por vacas lecheras, mestizas Siboney, manejadas en sistemas de estabulación. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 19: 31-40.
- Rivas, P.F., Castillo, H.J., Ortega, R.L. 2009. Selectividad de herbicidas y control de malezas para establecer una asociación *Brachiaria brizantha*-*Leucaena leucocephala*. *Técnica Pecuaria en México*. 47: 339-355.
- Rodríguez, M.E., Corral, G., Solorio, B., Alarcón, A.D., Grado, J.A., Rodríguez-Muela, C., Cortés, L., Segovia V.E., Solorio, F.J. 2013. Calidad de la carne de bovinos engordados en un sistema silvopastoril intensivo en dos épocas del año. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 16: 235-241.
- Román-Miranda, M.L., Palma-García, J.M., Zorrilla-Rios, J.M., Mora-Santacruz, A. 2016. Producción de materia seca de *Leucaena leucocephala* y vegetación herbácea en un banco de proteína pastoreada por ovinos. *Revista de Sistemas Experimentales*. 3: 42-50.
- Rossi, C.A., De León, M., González, G.L., Chagra, D.P. Pereyra, M.P. 2008. Composición química, contenido de polifenoles totales y valor nutritivo en especies de ramoneo del sistema silvopastoril del Chaco árido argentino. *Zootecnia Tropical*. 26: 105-115.
- Ruz-Ruiz, N.E., Briceño-Poot, E.G., Ayala-Burgos, A.J., Aguilar-Pérez, C.F., Solorio-Sánchez, F.J., Ramírez-Avilés, L., Ku-Vera, J.C. 2013. Urinary excretion of mimosine derivatives by cows with and without experience in consumption of *Leucaena leucocephala*. In: Proceedings of the 22nd International Grassland Congress, Sydney, Australia. p. 221-222.
- Ryle, M., Ørskov, E.R. 1990. Energy nutrition of rumen microorganisms. In: *Energy Nutrition in Ruminants*. Springer, Dordrecht.
- Saminathan, M., Yin, T.H., Chin, S.C., Abdullah, N., Ling, W.C.M.V., Abdulmalek, E., Ho, Y.W. 2014. Polymerization degrees, molecular weights and protein-binding affinities of condensed tannin fractions from a *Leucaena leucocephala* hybrid. *Molecules*. 19: 7990-8010. DOI:10.3390/molecules19067990
- Saminathan, M., Sico, C.C., Abdullah, N., Wong, C.M.V.L., Ho, Y.W. 2015. Effects of condensed tannin fractions of different molecular weights from a *Leucaena leucocephala* hybrid on *in vitro* methane production and rumen fermentation. *Journal of Science of Food and Agriculture*. 95: 2742-2749. DOI: 10.1002/jsfa.7016
- Saminathan, M., Sico, C.C., Gan, H.M., Ravi, S., Venkatachalam, K., Abdullah, N., Ling, W.C.M.V., Ho, Y.W. 2016. Modulatory effects of condensed tannin fractions of different molecular weights from a *Leucaena leucocephala* hybrid on the bovine rumen bacterial community *in vitro*. *Journal of Science of Food and Agriculture*. 96. DOI: 10.1002/jsfa.7674
- Sánchez, G.A., Faria, M.J. 2008. Efecto de la edad de la planta en el contenido de nutrientes y digestibilidad de *Leucaena leucocephala*. *Zootecnia Tropical*. 26: 133-139.
- Sánchez, G.A., Faria, M.J. 2013. Efecto de la madurez de la planta en el contenido de nutrientes y la digestibilidad en una asociación *Cenchrus ciliaris*-*Leucaena leucocephala*. *Zootecnia Tropical*. 31: 50-56.
- Sánchez, G.A., Faria, M.J., Araque, C. 2008. Producción de materia seca en una asociación *Cenchrus ciliaris*-*Leucaena leucocephala* al aplazar su utilización durante la época seca. *Zootecnia Tropical*. 26: 117-123.
- Sánchez, G.A., González-Cano, J., Faria, M.J. 2007. Evolución comparada de la composición química con la edad al

- corte en las especies *Leucaena leucocephala* y *L. trichodes*. *Zootecnia Tropical*. 25: 233-236.
- Sánchez, T., Lamela, L., López, O. 2010. Efecto de la suplementación con residuos de destilería del maíz en el comportamiento de novillas en una asociación de gramínea y leucaena. *Pastos y Forrajes*. 33: 323-332.
- Sandoval, G.L., Miranda, R.L.A., Lara, B.A., Huerta, B.M., Uribe, G.M., Martínez, M.M. 2016. Fermentación *in vitro* y la correlación del contenido nutrimental de leucaena asociada con pasto estrella. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3185-3196.
- Santiago, F.I., Lara, B.A., Miranda, R.L.A., Huerta, B.M., Krinshnamurthy, L., Muñoz, G.J.C. 2016. Composición química y mineral de leucaena asociada con pasto estrella durante la estación de lluvias. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3173-3183.
- Scollan, N., Hocquette, J.F., Nuernberg, K., Dirk, D., Ian, R., Aidan, M. 2006. Innovations in beef production systems that enhance the nutritional and health value of beef lipids and their relationship with meat quality. *Meat Science*. 74: 17-33. DOI: 10.1016/j.meatsci.2006.05.002
- Shelton, H.M. 2001. Advances in forage legumes: shrub legumes. *In: Proceedings of the XIX International Grassland Congress. Grassland Ecosystems: an Outlook Into the 21st Century*, 11-21 February 2001, Sao Pedro, Sao Paulo, Brazil.
- Shelton, M., Dalzell, S. 2007. Production, economic and environmental benefits of leucaena pastures. *Tropical Grasslands*. 41: 174-190.
- Shingfield, K.J., Bernard, L., Leroux, C., Chilliard, Y. 2010. Role of trans fatty acids in the nutritional regulation of mammary lipogenesis in ruminants. *Animal*. 4: 1140-1166. DOI: 10.1017/S1751731110000510
- Sierra, J., Nygren, P. 2006. Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system. *Soil Biology and Biochemistry*. 38: 1893-1903. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.12.012
- Sierra, M.E., Chará, J.D., Barahona, R.R. 2017. The nutritional balance of early lactation dairy cows grazing in intensive silvopastoral systems. *Ciência Animal Brasileira*. 18: 1-12. DOI: 10.1590/1089-6891v18e-40419
- Sierra-Montoya, E., Barahona-Rosales, R., Ruiz-Cortés, Z.T. 2017. Reproductive behavior of crossbred dairy cows grazing an intensive silvopastoral system under tropical dry forest conditions. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. 69: 1-9. DOI: 10.1590/1678-4162-8712
- Silanikove, N., Gilboa, N., Perevolotsky, Z., Nitsan, Z. 1996. Goats fed tannin-containing leaves do not exhibit toxic syndrome. *Small Ruminant Research*. 25: 195-201.
- Soca, M., Simón, L., Roque, E. 2007. Árboles y nemátodos gastrointestinales en bovinos jóvenes: un nuevo enfoque de las investigaciones. *Pastos y Forrajes*. 30: 1-16.
- Soltan, Y.A., Morsy, A.S., Sallam, S.M.A., Louvandini, H., Abdalla, A.L. 2012. Comparative *in vitro* evaluation of forage legumes (*Prosopis*, *Acacia*, *Atriplex*, and *Leucaena*) on ruminal fermentation and methanogenesis. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 21: 753-766.
- Soltan, Y.A., Morsy, A.S., Sallam, S.M.A., Lucas, R.C., Louvandini, H., Kreu-Zer, M., Abdalla, A.L. 2013. Contribution of condensed tannins and mimosine to the methane mitigation caused by feeding *Leucaena leucocephala*. *Archives of Animal Nutrition*. 67: 169-184. DOI: 10.1080/1745039X.2013.801139
- Soltan, Y.A., Morsy, A.S., Lucas, R.C., Abdalla, A.L. 2016. Potential of mimosine of *Leucaena leucocephala* for modulating ruminal nutrient degradability and methanogenesis. *Animal Feed Science and Technology*. 223: 30-41. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2016.11.003
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C. 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. LEAD-FAO. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Talukder, K. 2006. Low-lignin wood - a case study. *Nature Biotechnology*. 24: 395-96.
- Tan, H., Siao, C., Abdullah, N., Liang, J., Huang, X., Ho, Y. 2011. Effects of condensed tannins from *Leucaena* on methane production, rumen fermentation and populations of methanogens and protozoa *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*. 169: 185-193. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2011.07.004
- Tarazona, A.M.M., Ceballos, M.A., Cuatras, C.A., Naranjo, J.F., Murguicio, R.E., Barahona, R.R. 2013. The relationship between nutritional status and bovine welfare associated to adoption of intensive silvopastoral systems in tropical conditions. In: Harinder P. & S. Makkar (Eds). *Enhancing animal welfare and farmer income through strategic animal feeding-Some case studies*. FAO Animal Production and Health Paper No. 175. Rome, Italy. pp. 69-78.
- Taylor, C.A., Harrison, M.T., Telfer, M., Eckard, R. 2016. Modelled greenhouse gas emissions from beef cattle grazing irrigated leucaena in northern Australia. *Animal Production Science*. 56: 594-604. DOI: 10.1071/AN15575
- Tinoco-Magaña, J.C., Aguilar-Pérez, C.F., Delgado-León, R., Magaña-Monforte, J.G., Ku-Vera, J.C., Herrera-Camacho, J. 2012. Effects of energy supplementation on productivity of dual-purpose cows grazing in a silvopastoral system in the tropics. *Tropical animal*

- Health and Production. 44: 1073-1078. DOI: 10.1007/s11250-011-0042-8
- Toral, P.O.C., Iglesias, G.J.M. 2008. Selectividad de especies arbóreas potencialmente útiles para sistemas de producción ganaderos. *Zootecnia Tropical*. 26: 197-200.
- Urbano, D., Dávila, C., Moreno, P. 2006. Efecto de las leguminosas arbóreas y la suplementación con concentrado sobre la producción de leche y cambio de peso en vacas doble propósito. *Zootecnia Tropical*. 24: 69-83.
- Valarini, M., Posenti, R. 2006. Research note: nutritive value of a range of tropical forage legumes. *Tropical Grassland*. 40: 183-167.
- Valarezo, J., Ochoa, D. 2014. Rendimiento y valoración nutritiva de especies forrajeras arbustivas establecidas en bancos de proteína, en el sur de la Amazonía ecuatoriana. *Revista CEDAMAZ*, 113-124. URL: http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-9-4/articulo_9_-_113_-_124.pdf. Acceso diciembre 2017.
- Vélez-Terranova, M., Campos-Gaona, R., Sánchez-Guerrero, H. 2014. Uso de metabolitos secundarios de las plantas para reducir la metanogénesis ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystem*. 17: 489-499.
- Verdecia, A.D.M., Herrera, G.R.S., Ramírez, de la R.J.L., Acosta, I.L., Bodas, R.R., Lorente, S.A., Giraldez, G.F.J., González, A.J.S., Arceo, B.Y., Bazán, O.Y., Álvarez, B.Y., López, P.S. 2014. Caracterización bromatológica de seis especies forrajeras en el Valle del Cauto, Cuba. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18: 75-90.
- Verdecia, D.M., Herrera, H., Ramírez, J.L., Leonard, I., Álvarez, Y., Bazán, Y., Arceo, Y., Bodas, R., Andrés, S., Álvarez, J., Giraldez, F., López, S. 2012. Valor nutritivo de *Leucaena leucocephala*, con énfasis en el contenido de metabolitos secundarios. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 13: 1-10.
- Vergara, L.J., Rodríguez, P.A., Navarro, C., Atencio, A. 2006. Efecto de la suplementación con leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam. de Wit) sobre la degradabilidad ruminal del pasto alemán (*Echinochloa polystachya* H.B.K. Hitch). *Revista Científica, FCV-LUZ*. 16: 642-647.
- Vieyra-Alberto, R., Domínguez-Vara, I.A., Olmos-Oropeza, G., Martínez-Montoya, J.F., Borquez-Gastelum, J.L., Palacio-Núñez, J., Lugo, J.A., Morales-Almaráz, E. 2013. Perfil e interrelación mineral en agua, forraje y suero sanguíneo de bovinos durante dos épocas en la huasteca potosina, México. *Agrociencia*. 47: 121-133.
- Vivas, M.E.F., Rosado, R.G., Castellanos, R.A., Heredia, A.M., Cabrera, T.E. 2011. Contenido mineral de forrajes en predios de ovinocultores del estado de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 2: 465-475.
- von Son-de Femex, E., Alonso-Díaz, M.A., Mendoza-de Gives, P., Valles-de la Mora, B., González-Cortazar, M., Zamilpa, A., Gallegos, E.C. 2015. Elucidation of *Leucaena leucocephala* anthelmintic-like phytochemicals and the ultrastructural damage generated to eggs of *Cooperia* spp. *Veterinary Parasitology*. 214: 89-95. DOI: 10.1016/j.vetpar.2015.10.005
- Wright, A.D.G., Auckland, C.H., Lynn, D.H. 2007. Molecular diversity of methanogens in feedlot cattle from Ontario and Prince Edward Island, Canada. *Applied Environmental Microbiology*. 73:4206-4210. doi:10.1128/AEM.00103-07.
- Zaky, Z.M., Badruddin, A.F., Abdallah, Z.M., Ho, W.S., Pang, S.L. 2014. The reduction of mimosine content in *Leucaena leucocephala* (petai belalang) leaves using ethyl methanesulphonate (EMS). *Archives of Applied Science Research*. 6: 124-128.
- Zapata, B.G., Bautista, Z.F., Astier, C.M. 2009. Caracterización forrajera de un sistema silvopastoril de vegetación secundaria con base en la aptitud de suelo. *Técnica Pecuaria en México*. 47: 257-270.
- Zárate, P.S. 1994. Revisión del género *Leucaena* en México. *Inst. Biol. Univ. Auton. México, Ser. Bot.* 65: 83-162.
- Zarate, P.S. 1999. Ethnobotany and domestication process of *Leucaena* in Mexico. *Journal of Ethnobiology*. 19: 1-26.
- Zhou J. R., Erdman J. W. Jr. 1995. Phytic acid in health and disease C. R. C. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 35:495-508

Chapter 3. Seed and pod morphological diversity in the native mexican *leucaena* germplasm

Claudio Vite · Pedro A. Martínez · Enrique Cortés · Ponciano Pérez · J. M. Palma · J. M. Pech

Claudio Vite · Pedro A. Martínez (✉) · Enrique Cortés
Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-
Texcoco, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México, México
e-mail: pedroarturo@correo.chapingo.mx

Claudio Vite
Tecnológico Nacional de México - ITS Tantoyuca. Desv. Lindero-Tametate S/N, Col. La Morita,
C. P. 92100, Tantoyuca, Veracruz, México

Ponciano Pérez
Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, Km. 88.5 Carretera Federal Xalapa-Veracruz,
Predio Tepetates, C. P. 91690, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México

J. M. Palma
Colegio Mexicano de Agroforestería Pecuaria A. C., Centro Universitario de Investigación y
Desarrollo Agropecuario, Universidad de Colima, C. P. 28040, Colima, Colima, México

J. M. Pech
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Km. 7.5 Carr.
Tuxpan-Tampico, C. P. 92895, Tuxpan, Veracruz, México

Abstract Right choice of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit accessions for a given region is an important practice to the successful establishment in field, in which the physical quality of seed is valuable for producers, and the study of its genetic variability is necessary and possible with multivariate analysis methods (MAM). The objective of this study was to determine the association relationship between eight pod and seed morphological traits of 145 accessions of *Leucaena* from different agroclimatic regions of Mexico. The results highlighted the genotypic variation and the adaptation to variable environments of the trees of different agroclimatic regions. The MAM provided complementary ways of studying the *Leucaena* provenances. The accessions were classified in five clusters based in pod and seed traits, which can be used for backcross breeding programs. Eight primary traits were reduced to two new set traits as principal factors that explained 71.7% of the variability. Regularized canonical correlation indicated that single seed weight of *Leucaena* depended mostly on single seed size, brood size, and locules per pod because of its strongest discriminatory power. These results indicated that the native Mexican *Leucaena* provenances are valuable germplasm for genetic breeding programs with commercial purposes under their natural conditions.

Keywords Genetic diversity · *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit · Multivariate statistics · Seed quality · Wild germplasm

Introduction

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit (*Leucaena*) is a native woody fodder legume with extensive use as livestock feed in tropics because of its productivity in tropical environments (Shelton and Dalzell 2007; Radrizzani et al. 2010; Beutel et al. 2018). *Leucaena* (Fabaceae-Mimosoideae) has fast growth, grows in dry or humid regions from warm to temperate climates, cultivated in the center and south of Mexico (Zárate 1999). This species in association with forage grasses in livestock systems constitutes the fundamental basis for feeding, improving the chemical composition of the diet and the efficiency of the use of forage resources, and it is an alternative for nutrient-deficient soils, mainly during drought (Osechas et al. 2008; Radrizzani et al. 2010; Vijay et al. 2017). This forage resource is naturalized in almost the entire country and its use as a wild germplasm for its establishment in pastures is variable in time and not systematic. The utilization of *leucaena* accessions in tropical environments will depend on seed availability and quality (Mullen et al. 2003; Vijay et al. 2017).

Breeding activities aiming towards increase in crop forage productivity can benefit from a thorough understanding of the genetic variability within a set of elite and wild germplasm accessions (Olivera et al. 2008; Awan et al. 2015; Maqueira-López et al. 2019). Evaluation of different traits that improve the propagation, reproductive success, and establishment of the plant in field define the good quality seeds, both genetic, physiological, physical and sanitary. Morphological traits of crops provide a simple way of quantifying genetic variation and they have been used for estimation of genetic diversity and used in improvement programs under different conditions (Fufa et al. 2005; Vijay et al. 2017; Maqueira-López et al. 2019). The physical quality involves traits related to moisture content, weighted by volume and purity (Moreno 1996; Vijay et al. 2017); although recently size and shape of seed, weight of a thousand seeds, color and damage by insects and fungi are valuable for seed producing companies and producers (Lezcano et al. 2007; Khan and Zaki 2016; ISTA 2018).

Right choice of *leucaena* genotypes for a given region is an important practice to obtain establishment success of the crop and a high forage yield in livestock farms. In studies carried out on legumes for the seed size and its relation with seed quality, favorable answers have been obtained (Khan and Zaki 2016; Vijay et al. 2017). However, studies in which the seed size of legume fodder shrubs, such as native Mexican *leucaena* provenances, is associated with physical quality parameters, are scarce and insufficient. Pérez et al. (2006) concluded that a larger quantity of reserve substances and a larger embryo correspond to longer seeds, which translates into an increase in the percentage and speed of emergence of the seedlings. Therefore, the sowing of large-sized seeds with greater weight guarantees better establishment in field, which results in a greater accumulation of dry matter in the plant (Pérez et al. 2006; Vijay et al. 2017), although not a higher seed yield (Vijay et al. 2017).

The detection of genetic variability and study of interaction among the environments can be possible with a number of suitable and available multivariate analysis methods (MAM) like principal component analysis (PCA), multiple linear regression analysis, principal factor analysis (PFA) and hierarchical cluster analysis (HCA) (Mohammadi and Prasanna 2003; Alishah et al. 2008; Khodadadi et al. 2011; Janmohammadi et al. 2014), which have an emphatic and complementary role in the detection of association between traits (Alishah et al. 2008; Khodadadi et al. 2011; Janmohammadi et al. 2014). This study was undertaken in order to preserve the diversity of these native resources, and under the premise of finding variability between the pod and seed morphological traits of *Leucaena*, attributed to different agroclimatic characteristics, to select promising genotypes for commercial purposes. The objective was to determine the association relationship between pod and seed morphological traits of 145 accessions of *Leucaena* from different agroclimatic regions of México, using MAM.

Materials and methods

The seek for *Leucaena* mature trees was performed from May to August, 2016. Considering only fruiting trees, ten ripe pods and 150 g of seed samples were collected from 145 collection sites of different agroclimatic regions of México: Colima (C, n=30), Morelos (M, n=33), Nuevo León (N, n=36) and Veracruz (V, n=46). The following conventions were adopted: 1) each sampled plant was separated by at least 50 m from each other and was identified as a site or accession (Allisons y Simons, 1996), and was geographically referenced using GPS (GPSmap 60CSx, Garmin, USA); 2) every provenance collected was considered as one collection. For every site, the ripe pods and seeds collected of the trees were harvested and transported to the facilities of the Posgrado en Producción Animal of the Universidad Autónoma Chapingo. The seeds were collected in 100 mL collection cups and treated with diazinon 5% insecticide dusted to each sample to avoid the affectation by insects that could reduce the conditions, and this was maintained in refrigeration at 4-8 °C until processing. The ripe pods collected in field were dehydrated in an oven with forced ventilation at 65 °C up to constant weight.

Geographical and climatological data from each provenance appears in **Table 1**. In order to analyze more specific data for each site, temperature (maximum, mean and minimum) and annual rainfall from the period 1981-2010 were obtained from the meteorological stations of the National Meteorological System (SMN). Climate data is based in a modified Köppen classification for México (García, 1988), while soil classification was adapted from the FAO/UNESCO 2010 system proposed by the Geography Department of INEGI with a 1:1,000,000 scale. The warmest regions corresponded to those of lower altitude (Colima and Veracruz), while the less warm regions were those of higher altitude (Morelos and Nuevo León). The Veracruz region was the one with the highest rainfall characterized by a subhumid warm climate and losses for all the other regions under study with warm and semi-warm subhumid climates. Vertisol soil type was dominant for Morelos, Nuevo León and Veracruz regions, while Foezem was for Colima.

Observations on eight traits related to the pod and seed: pericarp weight per pod (PWP, g), seed yield per pod (SYP, g), locules per pod (LP, number), brood size (BS, number), seed-pericarp ratio (SPR, g seed g⁻¹ pericarp), pod filling ratio (PFR, %), single seed size (SSS, mm²), and single seed weight (SSW, mg) were recorded and estimated on 10 randomly selected pods of each *Leucaena* tree. BS was represented as the number of healthy seeds recovered from a pod. SPR was determined based on the weight of seeds pod⁻¹ and pericarp weight pod⁻¹. PFR was calculated based on the number of seeds pod⁻¹ and the number of locules pod⁻¹ in percentage. SSS corresponded to the perimeter occupied by the BS converted to area on the same BS. SSW was estimated based on the weight of seeds pod⁻¹ and the number of seeds pod⁻¹. The weights were taken with a precision balance of 0.0001 g. The perimeter was taken with measuring tape of 150 cm length.

Multivariate techniques, including multivariate analysis of variance (MANOVA), HCA, PFA and regularized canonical correlation analysis (RCCA) were employed using statistical software 'R Studio 1.1.419 Version'. As measurement scales of various traits were not identical, the data were standardized as proposed by Hair et al. (2006). The relationship among sets of accessions with pod and seed morphological traits was determined by MANOVA, which was made based on Mohammadi and Prasanna (2003) proposal with a level of significance of 0.01. The similarity among collections was estimated trough HCA, and then the dendrogram was constructed utilizing Ward's method based on squared Euclidean distance (Kumar et al. 2009).

The PFA was followed in the extraction of the factor loadings (Harman 1976). Estimates of factor loadings were based on data from all replications for all populations. The array of communality and the amount of the variance of a variable accounted by the common factors together were estimated by the highest correlation coefficient in each array, as suggested by Seiller and Stafford (1985). The number of factors were estimated using the principal components

method (Rao 1952). The varimax rotation method (an orthogonal rotation) was used in order to make each factor uniquely defined as a distinct cluster of intercorrelated traits (Rao 1952). The factor loadings of the rotated matrix, the percentage variability explained by each factor and the communalities for each variable were determined. Factor loadings were used to interpret the results based on their magnitude and sign. Traits with identical signs in a factor are positively interrelated. Two factors were assigned meaningful biological interpretations based on the principal traits loaded in each factor. All results were consolidated to produce a generalized set of biological concepts to reflect the possible functional relationships existing among the traits investigated.

Table 1 Geographic location, soil types and means and standard deviations of the climatic conditions values from sites where native Mexican *Leucaena* provenances were collected

Variable	Region			
	Colima	Morelos	Nuevo León	Veracruz
Maximal temperature (°C)	33.9±0.7	31.9±2.3	28.8±1.3	29.8±1.0
Mean temperature (°C)	26.7±0.6	23.1±1.8	22.3±0.7	24.2±0.8
Minimal temperature (°C)	19.4±0.6	14.2±1.2	15.7±1.7	18.6±0.7
Annual rainfall (mm)	784±62	920±60	774±142	1427±341
Altitude (m)	69±69	1179±97	456±29	90±34
Extreme coordinates		18°29'46.0" LN		21°01'54.0" LN
	18°56'03.0" LN	98°45'03.0" LN	25°36'56.0" LN	98°02'48.6" LN
	103°57'33.3" LW	LW	100°08'18.3" LW	LW
	19°03'20.4" LN	18°38'27.5" LN	25°46'00.1" LN	21°45'00.7" LN
	103°46'04.8" LW	98°57'32.3" LW	100°19'13.5" LW	98°24'26.2" LW
Climate	Aw0(w), BS1(h')w(w)	Aw0(w)	(A)Cx', (A)C(w0), (A)C(w1), BS1hw, BS0(h')hw, BS1(h')hw, BS1(h')hw,	(A)C(m)w, Am(f), Aw1, Aw2
Soil type	Feozem, Fluvisol, Regosol, Solonchak, Vertisol	Feozem, Rendzina, Vertisol	Feozem, Litosol, Rendzina, Vertisol	Regosol, Vertisol

RCCA was performed to highlight correlations between the traits related to the seed matrix (X of order $n \times p$) and the traits related to the pod matrix (Y of order $n \times q$) retrieved from collection sites as well as accessions of *Leucaena* using the R software CCA package (González et al. 2008). Regularization parameters λ_1 and λ_2 were chosen to maximize the leave-one-out cross-validation score (Leurgans et al. 1993).

Results and discussion

There were significant differences ($p < 0.0001$) between *Leucaena* collection sites for all traits measured (**Table 2**). Samples from Veracruz showed the lowest values for SSW and SSS, as well as SYP, but with higher values for LP and BS than Colima, Morelos and Nuevo León sampling regions. Samples from Morelos were similar in PFR with Veracruz. Nuevo León accession had the highest SYP and Veracruz had the lowest; however, both productions were lower than the estimated average (1.18 ± 0.16 g) by Vijay et al. (2017) and superior to 0.74 ± 0.02 g reported by Khan and Zaki (2016) for other from locations around the world that were grown under agronomic management with non- and fertilization.

PWP was lower for samples from Colima and increased for those from Veracruz, Morelos and Nuevo León, in this order of sampled region (**Table 2**), only Nuevo León was higher than 0.87 ± 0.05 g reported by Vijay et al. (2017) compared to the other three sampled regions. Almost all the sites were superior to 0.57 ± 0.02 g reported by Khan and Zaki (2016), except from Colima, which coincides with that indicated by these same authors.

SPR was lower for Morelos and increased for Nuevo León, Veracruz and Colima, in this order of sampled region (**Table 2**). Morelos region had the lowest SPR at 1.21 ± 0.05 shown by Khan and Zaki (2016) compared to the other three regions. While, Morelos and Nuevo León regions had the lowest SPR at 1.35 ± 0.10 obtained by Vijay et al. (2017) and the sites of Colima and Veracruz had a greater parameter to this, in addition, Veracruz is similar to that obtained by these same authors. The inverse of the SPR corresponds to seed packaging cost (SPC), this is determined based on the quantum of pericarp biomass of pod per gram of seed (Khan and Zaki 2016). SPC for one gram of seeds were 862, 800, 746 and 625 mg of pericarp for Morelos, Nuevo León, Veracruz and Colima regions, respectively, which were above (Morelos) and below (Colima) the efficiency range of 746 to 827 obtained by some authors for this same species (Khan and Zaki 2016; Vijay et al. 2017). These findings indicated that the lowest efficiency within pod reproductive allocation was for Colima and increased for Veracruz, Nuevo León and Morelos regions, respectively.

The mean pod weights (PWP + SYP) of all sampled regions were higher than the mean weights (1.24 ± 0.31 g) obtained by Khan and Zaki (2016), but lower than 2.05 ± 0.21 g reported by Vijay et al. (2017) for the same species, except for Veracruz that has similarity with these last authors.

The general mean of the PFR in this study (**Table 2**) was higher than 93.63% reported by Khan and Zaki (2016), which indicated that high seed setting in this species, and its duration and filling rate are essential elements contributing to final yield (Vijay et al. 2017; Maqueira-López et al. 2019).

BS was represented as the number of healthy seeds recovered from a pod (**Table 2**), which was within the range (13.81 a 20.85) found by some authors (Khan and Zaki 2016; Vijay et al. 2017). Khan and Zaki (2016) indicated that *Leucaena* has many-seeded fruits and the majority of ovules within the ovary mature into seeds in most fruits, as is suggested by very high seed number-seed chambers ratio in this species.

The seeds of Veracruz (**Table 2**) had lower weight than the mean of 39.21 ± 8.08 mg obtained by Khan and Zaki (2016) from a pooled sample, although the seeds of Colima, Morelos and Nuevo León were heavier than this mean weight, but all regions sampled were lower weight than the mean of 64.91 ± 4.06 mg reported by Vijay et al. (2017). It was observed that the SSS was significantly larger in Veracruz accessions compared to the other three sampled regions. The mean for SSS (33.15 ± 0.76 mm²) obtained by Vijay et al. (2017) was superior to Veracruz and lower to the other three sampled regions. Thus, SSW variation may be due to the trade-off of resource allocation between SSS and BS, and to the environmental factor (Vijay et al. 2017).

Results highlighted the significance of genotypic variation and the adaptation to variable environments of the trees from different agroclimatic regions of Mexico, in such a way each tree

of *Leucaena* appears to have registered the environmental variation within their pod crops. This finding is in agreement with previous results obtained by Vijay et al. (2017). Other authors concluded that it is interesting to explore ultra specific diversity in local (Khan and Zaki 2016) and commercial (Olivera et al. 2008; Vijay et al. 2017) *Leucaena* populations.

Table 2 Descriptive statistics including mean and standard deviation for pod and seed morphological traits in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico

Trait	Region				SEM	P-value
	Colima	Morelos	Nuevo León	Veracruz		
Pericarp weight per pod, g	0.59 ^d	0.83 ^b	0.89 ^a	0.65 ^c	0.01	<0.0001
Seed yield per pod, g	0.93 ^b	0.93 ^b	1.10 ^a	0.86 ^c	0.01	<0.0001
Locules per pod, number	16.89 ^c	16.92 ^c	19.85 ^b	23.55 ^a	0.10	<0.0001
Brood size, number	15.79 ^c	16.03 ^c	18.69 ^b	22.60 ^a	0.11	<0.0001
Seed-pericarp ratio, g seed g ⁻¹ pericarp	1.60 ^a	1.16 ^d	1.25 ^c	1.34 ^b	0.01	<0.0001
Pod filling ratio, %	93.44 ^b	94.82 ^{ab}	93.77 ^b	95.94 ^a	0.21	<0.0001
Single seed size, mm ²	45.26 ^a	46.04 ^a	46.02 ^a	31.07 ^b	0.17	<0.0001
Single seed weight, mg	59.19 ^a	58.75 ^a	59.06 ^a	38.15 ^b	0.28	<0.0001

^{a,b,c,d} Means with the same letter in the same rows are not significantly different ($P < 0.01$; Tukey Test). SEM = standard error of the mean.

HCA of *Leucaena* from different agroclimatic regions of Mexico based on pod and seed traits was employed to explore the possible intra- and interrelationships among *Leucaena* collection sites. By incision of baseline in the dendrogram at 30 units distance were classified the 145 *Leucaena* populations into five groups (one to five clusters) in order to include each 1, 1, 30, 28 and 40 % of total sites (**Fig. 1**). This result highlights the high genetic diversity within provenances as were showed in other studies (Mohammadi and Prasanna 2003; Fufa et al. 2005; Kumar et al. 2009). The highest distance or dissimilarity between sites was observed for 78 and 138 vs. 35 and 71 sites. The highest similarity was obtained for sites 90 and 145, which can be used for backcross breeding programs (Fufa et al. 2005; Kumar et al. 2009; Khodadadi et al. 2011). The 78 and 138 sites showed greater magnitude for all traits related to pod and seed compared to 35 and 71 sites, the cross between these accessions can be used in *Leucaena* breeding programs to achieve maximum heterosis (Khodadadi et al. 2011). The 78 and 138 sites are early in their flowering habits, since precocity provides a longer grain filling period that results in higher grain weight and it can, therefore, be used to induce earliness and higher grain weight in breeding populations (Awan et al. 2015; Vijay et al. 2017). The dendrogram showed that grouping of accessions in the same clusters confirmed their relationships and that the seeds and pods with lower magnitude for all traits are the most abundant (Cluster 5).

Based on the cluster results, five grouped cluster of sites can have a common origin; on the other hand, crossing between sites in distanced clusters like first and fifth cluster can provide much variation for plant breeding aims, coinciding with Kumar et al. (2009), Khodadadi et al. (2011), Saed-Moucheshi et al. (2013), and Janmohammadi et al. (2014). The fact that seeds and pods of *Leucaena* accessions of same geographical region were grouped into different clusters and vice-versa exhibited that geographical diversity was not related to genetic diversity, which was similar to the pattern of distribution in different clusters observed in wheat genotypes by Kumar et al. (2009) and *Jatropha curcas* L. provenances by Valdés-Rodríguez et al. (2018).

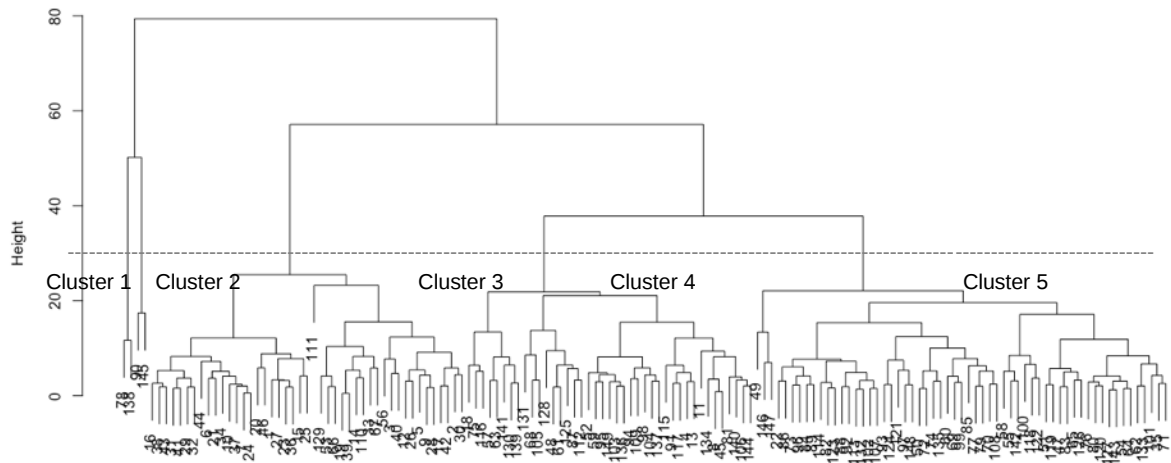


Fig. 1 Dendrogram obtained from the cluster analysis for 149 collection sites of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico. Dotted line indicates the five-group truncation level

PFA is performed by examining the pattern of correlations or covariances between the observed traits (Seiller and Stafford, 1985; Saed-Moucheshi et al. 2013; Janmohammadi et al. 2014), such as to determine the latent factors or trait groups (Alishah et al. 2008; Janmohammadi et al. 2014; Ali et al. 2015). For this data, two first factors of the eight factors in the PFA accounted for 71.7% of the total variations in the data structure (**Fig. 2**). The first two factors have a higher value than two unit values (2) of eigenvalue, which was considered as the criterion of significance; only those factors were considered important. The first factor was included for SSS, SSW, SYP, and PWP traits that are positively correlated, and it could explain 43.7 % of the total variation in the dependent structure, and which was named traits related to the seed. The second factor accounted for 28.0 % of total variability and it was included for LP, BS, SPR, and PFR traits that are negatively correlated, which was named traits related to the pod (**Fig. 2**). Similarly, SSW and BS loaded with opposite signs (0.8 and -0.6) was founded in a study of plant variables associated with architecture and SSS in dry bean, which elucidate that pod and seed related traits may share some genes in common for their control (Acquaah et al. 1992).

These groups or clusters of under-study *Leucaena* provenances are an efficient tool to minimize the plant pool during the selection process (Crossa 1990). As expected, traits related to the seed and traits related to the pod loaded opposite signs in the first factor, this pattern is a more logical functional relationship because large seeds require large pods, whereas longer pods contain many seeds (Acquaah et al. 1992; Vijay et al. 2017). This proportion of the variance explained by the two factors in this study was higher than that reported for the three main factors in the study of morpho-physiological traits of grasspea populations (Tadesse and Bekele 2001) and spring wheat genotypes (Awan et al. 2015), as well as for two main factors of the characterization based on grain yield and its attributing traits of wheat (Saed-Moucheshi et al. 2013; Janmohammadi et al. 2014), bean (Acquaah et al. 1992), and maize grown (Ali et al. 2015); but lower than the variation obtained for tree factors in morphological traits and yield components in cotton (Alishah et al. 2008) and wheat (Golparvar et al. 2017).

PFA showed that SSW and BS had the highest relative contribution in SSS and SSW of *Leucaena* plants. Therefore, the pod and seed related traits are useful for the characterization of

naturalized *Leucaena* germplasm in the different agroclimatic regions of Mexico. This finding is in agreement with previous reports of Pérez et al. (2006) and Vijay et al. (2017), who identified, for this purpose, that the weight of a thousand seeds is the most important trait for classifying SSS, achieving the best response in terms of physical quality parameters than in morphological traits. These authors found a close association between seed length with shoot dry weight, concluding that a larger quantity of reserve substances and a larger embryo corresponds to seeds of greater length, which at the same time is reflected in an increase in the percentage and the speed of emergence of the seedlings. A situation contrary to the previous one was reported by Mullen et al. (2003) for the multi-environment trial of *Leucaena* accessions. From the interpreted main factors, the traits may be selected and used as criteria for selection in a breeding program to improve the forage yield in livestock farms with *Leucaena* silvopastoral system.

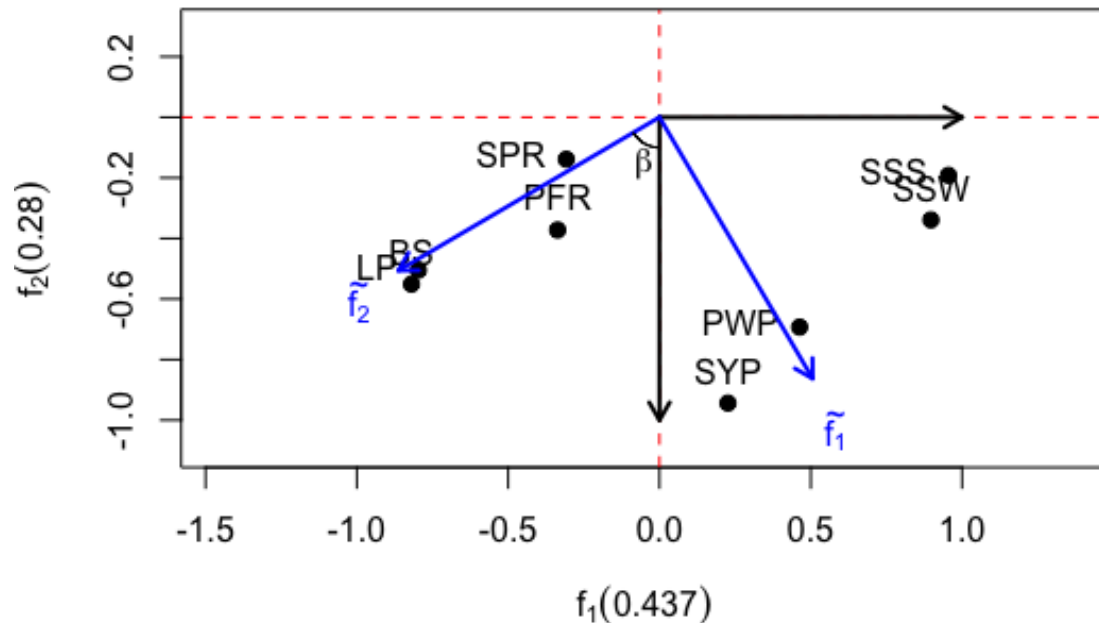


Fig. 2 Orthogonal rotation for pod and seed morphological traits in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico, angle selected with the "varimax" criterion, $\beta = -59.6^\circ$. SPR = Seed-pericarp ratio, PFR = Pod filling ratio, BS = Brood size, LP = Locules per pod, SSS = Single seed size, SSW = Single seed weight, PWP = Pericarp weight per pod, SYP = Seed yield per pod, f_1 = First factor loading, and f_2 = Second factor loading

A schematic view of the RCCA process was provided in **Fig. 3**, from the pod and seed morphological traits in *Leucaena* to graphical displays. Highlights significant correlations not only within each set of traits (squared matrices 120×120 and 21×21 at the top) but also between both sets (the rectangular matrix 21×120 at the bottom), i.e., between pod and seed related traits. RCCA indicated that BS values were positively correlated with LP, and most strongly within SSS and SSW, while LP and BS were negatively correlated with SSS. This result was consistent with the finding of Vijay et al. (2017), who confirmed the high associations (up to 0.89) among pod and seed traits in *Leucaena* trees.

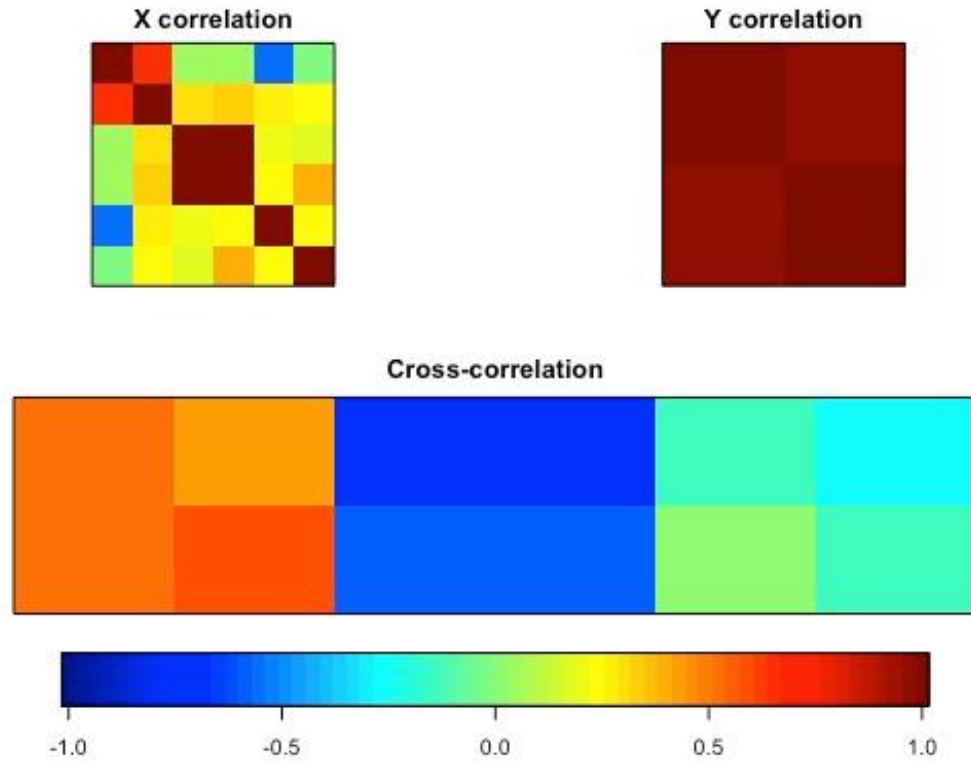


Fig. 3 Relationships between (correlation matrices) pod (X variables, upper-left) and seed (Y variables, upper-right) traits, and cross-correlation $X \times Y$ (bottom) in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico. Increasing values are translated into colors from blue (negative correlation) to red (positive correlation)

The left panel of **Fig. 4** gives the largest cross validation score (CV), i.e., 0.98 for this study. That is maximum value reached on the grid to obtain the optimal value for eigenvalues (González et al. 2008); it enables to evaluate the optimal values for eigenvalues (λ_1 and λ_2) at respectively 0 and 0.2. The two principal components of canonical correlations were plotted as a barplot (see left panel of **Fig. 4**), once regularization parameters were fixed. This barplot can lead to several arguable choices for d_1 and d_2 larger gaps between two successive canonical correlations.

This study focused on the first two dimensions for the interpretation and representation of traits and units (**Fig. 5**). Traits with a strong relationship were projected in the same direction from the origin (González et al. 2008), i.e., LP vs. BS, PFR vs. SPR and SSS vs. SSW. The greater the distance from the origin, the stronger the relationship is (González et al. 2008), i.e., LP, BS, SSS, and SSW to d_1 , and SPR, SYP and PFR to d_2 .

The representation of the units can be useful to clarify the interpretation of the correlation between traits (**Fig. 5**). The relationships between the two plots (traits and units) drawn on the matching axes can reveal associations between traits and units (González et al. 2008), i.e., the stronger effect of the agroclimatic region (see the clear separation of the agroclimatic region along the first canonical variate), which is mostly due to the traits related to the pod (LP and BS) and the lower expression of the PWP in these *Leucaena* plants (regions with high negative coordinates on the d_1).

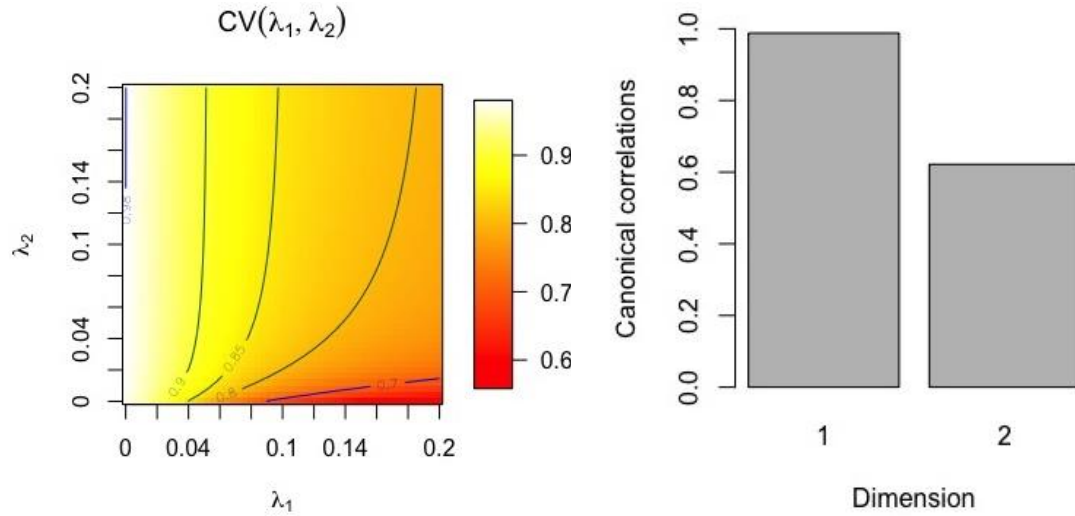


Fig. 4 Cross-validation score (CV, on the left) and barplot of canonical correlations (on the right) for pod and seed traits in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico. Image representing the CV-score for λ_1 and λ_2 on a 51×51 grid defined by equally-spaced discretization points on the region: $0 \leq \lambda_1 \leq 0.2$ and $0 \leq \lambda_2 \leq 0.2$. Two kinds of contour plots are also displayed for values equal to $\{0-0.7-0.98(*)\}$ (in blue line) and to $\{0.8-0.85-0.9\}$ (in green line). (*) maximal value reached on the grid

The response of pod and seed traits to the agroclimatic region in plant expression is well illustrated by the less clear separations of the units corresponding to different region (see the units with negative and positive coordinates on the d_1 and d_2 , right panel of **Fig. 5**). On the other hand, there is a clear tendency of greater association for SSS and SSW to Morelos and Nuevo León; LP, BS, and PFR to Veracruz; SPR to Colima, and PWP and SYP to Colima and Nuevo León (see left and right panels of **Fig. 5**). This finding is in agreement with Mullen et al. (2003), who demonstrated the effects of environmental factors on the agronomic performance of *Leucaena* during establishment and post-establishment growth in multi-environment trials.

In general, the agro-climatic regions of Mexico that produce *Leucaena* seeds with the highest weights and sizes are associated with small pods that imply lower amounts of locules, seeds and weight of valves. Plant breeders need to identify the strongly associated traits in order to choose appropriate breeding strategies for handling them in crop improvement programs (Acquaah et al. 1992; Olivera et al. 2008; Janmohammadi et al. 2014), and it is a crucially important practice to obtain success in the establishment of the crop and high forage yield in livestock farms with the right choice of *Leucaena* genotypes for a given region.

The MANOVA, HCA, PFA and RCCA methods provided complementary ways of studying the *Leucaena* data. For example, the MANOVA showed the initial importance of PWP and SPR, which are identified when its statistical significance was compared with other traits. Therefore, subsequent MAM were conducted. The HCA classified all the accessions in five clusters based in all pod and seed related traits, when 78 and 138 sites showed greater magnitude and 35 and 71 sites were the lowest magnitudes for all traits. The PFA showed the relationship between pod and seed related traits, so indicating that SSS and SSW, BS and LP were the major importance traits in the variation of the data structure. Thus, the conducted PFA allowed the reduction from eight primary traits to two new set traits as principal factors, which can explain 71.7% of the variability

of the primary data. Furthermore, RCCA indicated that BS, LP, SSS and SSW must be used in *Leucaena* breeding goals, and without the need to carry out progeny tests (Khodadadi et al. 2011; Vijay et al. 2017). *Leucaena* SSW depended mostly on SSS, BS, and LP because these traits showed the strongest discriminatory power, as demonstrated by Janmohammadi et al. (2014). Taken together, the MAM indicates which trait related to pod and seed was the most important under the environmental conditions for each studied agroclimatic regions.

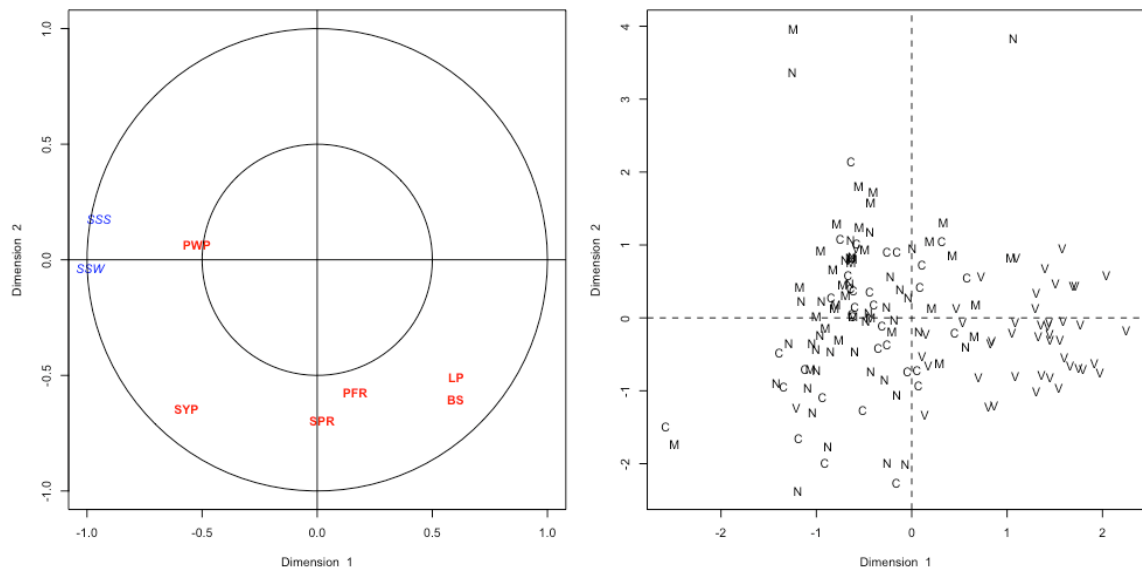


Fig. 5 Traits (on the left) and units (on the right) representations on the plane defined by the first two canonical variates for pod and seed traits in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit from different agroclimatic regions of Mexico

Conclusions

The high variability shown with the complementary of multivariate analysis methods in *Leucaena* provenances should be widely applicable to initiate breeding programs involving germplasm originating from different agroclimatic regions of México. Particularly, the one and five clusters could be exploited in transgressive breeding by the greatest genetic distance that was detected in these members of clusters. Single seed weight and single seed size can be useful for the indirect selection for evolving a superior genotype possessing a high percentage and speed of emergence of the seedlings breeder. Results of the present study indicated that the native Mexican *Leucaena* provenances are valuable germplasm for genetic breeding programs with commercial purposes under their natural conditions.

Acknowledgements The authors acknowledge to the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), the Instituto de Investigación y Posgrado en Ciencia Animal (IIPCA), the Posgrado en Producción Animal (PPA) and Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) of Universidad Autónoma Chapingo (UACH), and Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca (ITSTa) for their support and funding.

References

- Acquaah G, Adams MW, Kelly JD (1992) A factor analysis of plant variables associated with architecture and seed size in dry bean. *Euphyt* 60:171-177.
- Ali F, Kanwal N, Ahsan M et al (2015) Multivariate analysis of grain yield and its attributing traits in different maize hybrids grown under heat and drought stress. *Scientif* 2015:1-6. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/563869>
- Alishah O, Bagherieh-Najjar MB, Fahmideh L (2008) Correlation, path coefficient and factor analysis of some quantitative and agronomic traits in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Asian J Biol Sci*, 1: 61-68.
- Allisons GE, Simons AJ (1996) Propagation and husbandry. In: Stewart JL, Allison GE, Simons AJ (eds). *Gliricidia sepium*-Genetics resources or farmers. Tropical Forestry Paper 33. Oxford Forestry Institute. pp. 49-71.
- Awan SI, Ahmad SD, Ali MA et al (2015) Use of multivariate analysis in determining characteristics for grain yield selection in wheat. *Sarh J Agric* 31:139-150. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2015/31.2.139.150>
- Beutel TS, Corbet DH, Hoffmann MB et al (2018) Quantifying leucaena cultivation extent on grazing land. *The Rangel J* 40:31-38. <https://doi.org/10.1071/RJ17085>
- Crossa J (1990) Statistical analysis of multi-location trials. *Adv Agron* 44:55-85.
- Fufa H, Baenziger PS, Beecher BS et al (2005) Comparison of phenotypic and molecular marker-based classifications of hard red winter wheat cultivars. *Euphyt* 145:133-146. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-0626-3>
- García E (1988) Modificaciones a la clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Golparvar AR, Gheisari MM, Hadipanah A et al (2017) Relationship of morphological traits and yield components with seed and protein yields in Iranian bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Res Crop* 18:216-218. DOI:10.5958/2348-7542.2017.00036.5
- González I, Déjean S, Martin PGP et al (2008) CCA: An R package to extend canonical correlation analysis. *J Stat Softw* 23:1-14.
- Hair JF, Black WC, Babin BJ et al (2006) Multivariate data analysis. 6th edn. Pearson Education Inc. and Dorling Kindersley Publishing Inc., USA.
- Harman HH (1976) Modern factor analysis. 3rd edn. University of Chicago Press, Chicago.
- International Seed Testing Association (ISTA). 2018. International rules for seed testing. Bassersdorf, Switzerland. <https://doi.org/10.15258/istarules.2018.i>
- Janmohammadi M, Movahedi Z, Sabaghnia N (2014) Multivariate statistical analysis of some traits of bread wheat for breeding under rainfed conditions. *J Agric Sci* 59: 1-14. DOI: 10.2298/JAS1401001J
- Khan DA, Zaki MJ (2016) Variation in brood- and seed-size and seed packaging cost in *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit from Karachi. *Int J Biol Biotechnol* 13:115-130.
- Khodadadi M, Fotokian MH, Miransari M (2011) Genetic diversity of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes based on cluster and principal component analyses for breeding strategies. *Aust J Agric Sci* 5:17-24.
- Kumar B, Lal GM, Upadhyay R et al (2009) Genetic variability, diversity and association of quantitative traits with grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Asian J Agric Sci* 1:4-6.
- Leurgans S, Moyeed R, Silverman B (1993) Canonical correlation analysis when the data are curves. *J Res Stat Soc Ser B* 55:725-740.
- Lezcano JC, Navarro M, González Y et al (2007) Determinación de la calidad de las semillas de *Leucaena leucocephala* cv. Perú almacenadas al ambiente. *Pastos y Forrajes* 30:107-118.

- Maqueira-López LA, Morejón-Rivera R, Roján-Herrera O et al (2019) Relationship between growth traits and yield formation in Indica-type rice crop. *Agron Mesoam* 230:79-100. DOI:10.15517/ma.v30i1.29671
- Mohammadi SA, Prasanna BM (2003) Analysis of genetics diversity in crop plants: salient statical tools and considerations. *Crop Sci* 43: 1235-1248.
- Moreno ME (1996) Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. 3^{ra} edn. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mullen BF, Shelton HM, Gutteridge RC et al (2003) Agronomic evaluation of *Leucaena*. Part 1. Adaptation to environmental challenges in multi-environment trials. *Agrofor Syst* 58:77-92.
- Olivera CY, Sánchez ST, Testino L (2008) Caracterización morfofotográfica de las especies predominantes en un sistema silvopastoril con gramíneas y leguminosas mejoradas después de 10 años de explotación. *Zootec Tróp* 26:323-326.
- Osechas D, Becerra L, Rodríguez I (2008) Uso de *Leucaena leucocephala* como recurso forrajero en fincas doble propósito del estado Trujillo, Venezuela. *Agric Andina* 14:49-58.
- Pérez MC, Hernández LA, González CFV et al (2006) Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. *Agric Téc Méx* 32:341-352.
- Radrizzani A, Dalzell SA, Kravchuk O et al (2010) A grazier survey of the long-term productivity of leucaena (*Leucaena leucocephala*)-grass pastures in Queensland. *Anim Prod Sci* 50:105-113. DOI: 10.1071/AN09040
- Rao CR (1952) Advanced statistical method in biometric research. John Wiley and Sons, New York.
- Saed-Moucheshi A, Fasihfar E, Hasheminasab H et al (2013) A review on applied multivariate statistical techniques in agriculture and plant science. *Int J Agron Plant Prod* 4:127-141.
- Seiller GJ, Stafford RE (1985) Factor analysis of components of yield in Guar. *Crop Sci* 25:905-908. DOI:10.2135/cropsci1985.0011183X002500060003x
- Shelton M, Dalzell S (2007) Production, economic and environmental benefits of leucaena pastures. *Trop Grassl* 41:174-190.
- Tadesse W, Bekele E (2001) Factor analysis of components of yield in grasspea (*Lathyrus sativus* L.). *Lathyrus Lathyrism Newsl* 2:91-93.
- Valdés-Rodríguez OA, Pérez-Vázquez A, Palacios-Wassenaar O et al (2018) Seed diversity in native mexican *Jatropha curcas* L and their environmental conditions. *Trop Subtrop Agroecosyst* 21:521-37.
- Vijay D, Gupta SK, Mishra SM (2017) Seed yield and quality enhancement of pollarded subabul (*Leucaena leucocephala*) by nutrient supplementation. *Agrofor Syst* 91:613-621. DOI 10.1007/s10457-016-9984-1
- Zarate PS (1999) Ethnobotany and domestication process of *Leucaena* in Mexico. *J Ethnobiol* 19:1-26.

Este capítulo fue aceptado para su publicación en la revista científica *Avances en Investigación Agropecuaria* (2020)

Capítulo 4. Modelos cuantitativos desarrollados con estrategias no destructivas para la estimación del área foliar en *Leucaena leucocephala* ((Lam.) de Wit)

Quantitative models developed from nondestructive strategies for the estimation of the leaf area in *Leucaena leucocephala* ((Lam.) de Wit)

Vite Cristóbal, C.^{1,2}; Martínez Hernández, P. A.¹; Cortés Díaz, E.^{1*}; Pérez Hernández, P.³; Palma García, J. M.⁴; Escalante Estrada, J. A. S.⁵; Rodríguez González, M.T.⁵

¹ Posgrado en Producción Animal
Universidad Autónoma Chapingo
Estado de México, México

² Posgrado en Producción Pecuaria Tropical
Tecnológico Nacional de México - ITS Tantoyuca
Veracruz, México

³ Postgrado en Agroecosistemas Tropicales
Colegio de Postgraduados
Veracruz, México

⁴ Centro Universitario de Investigación y Desarrollo Agropecuario
Universidad de Colima
Colima, México

⁵ Postgrado en Botánica
Colegio de Postgraduados
Estado de México, México

*Correspondencia: ecodia@yahoo.com.mx

Resumen

Con el objetivo de desarrollar modelos cuantitativos a partir de estrategias no destructivas para describir la acumulación del área foliar (AF), intercepción de radiación (RI) y cambios en altura de planta (AP) en plantaciones de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), se llevó a cabo un estudio en Veracruz con 350 días de duración y otro de 372 días en Morelos, para procedencias distintas. La AP, longitud (L) y ancho (A) de hoja, AF y

RI se monitorearon durante el estudio. Se generó un factor de ajuste para L y A que permitió estimar AF, comparada con AF medido con integrador de AF. Éstas variables fueron modeladas con análisis de regresión para describir los cambios en acumulación de AP, AF y RI. La estimación de AF obtenida por el producto $L \times A$ demandó el ajuste de $y = 0.35(L \times A)$ para Morelos y Veracruz analizados en conjunto. En Veracruz, las máximas acumulaciones de AF medidas con integrador y estimada con factor de ajuste, se obtuvieron entre los 119 y 143 días de rebrote, mientras que los máximos para AP se dieron entre los 128 y 177 días. Para la plantación en Morelos, las máximas acumulaciones de AF medidas con integrador y estimada con factor de ajuste, se obtuvieron entre los 134 y 228 días, y los máximos para AP se dieron entre los 148 y 233 días. Las RI máximas se lograron entre los 203 y 217 días en la estación lluviosa, y entre los 80 y 104 días en la sequía, ambos para la plantación de Veracruz. La variabilidad generada en los momentos de cosecha fue debida a las procedencias evaluadas. Se concluye que con modelos cuadráticos y logísticos basados en variables no destructivas se puede describir el desarrollo de plantaciones de *Leucaena* que permita una mejor toma de decisión del momento de cosecha para procedencias distintas en plantaciones de Morelos y Veracruz.

Palabras clave

Patrón de crecimiento, factor de ajuste, radiación interceptada.

Abstract

To achieve the developed of quantitative models from non-destructive strategies to describe leaf area (LA) accumulation, solar radiation interception (RI) and changes in plant height (PH) in *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) plantations, a study was carried out in Morelos and Veracruz, from different provenances. PH, leaf length (L) and wide (W), LA and RI were measured. LA was estimated by $L \times W$ times a correction factor and compared to LA determined by a leaf integrator. Models were developed to describe changes in PH, LA and RI over time by regression and other approaches. Best correction factor was $y = 0.35 (L \times A)$ for Morelos and Veracruz analyzed together. For Veracruz site, highest LA accumulation measured with integrator and estimated with adjustment factor, were registered between 119 and 143 days of regrowth, while highest PH were registered between 128 and 177 days of regrowth. For Morelos plantation, highest LA accumulation measured with integrator and estimated with adjustment factor, were registered between 134 and 228 days of regrowth, while highest PH were registered between 148 and 233 days of regrowth. Highest RI were registered between 203 and 217 days in the rainy season, and between 80 and 104 days in the drought, both for the Veracruz plantation. The variability generated at harvest times was due to the provenances evaluated. In conclusion, quadratic and logistic models from non-destructive variables could describe closely *Leucaena* above-ground development and allow for harvesting decision-making in different provenances from Morelos and Veracruz plantations.

Key words

Growth pattern, correction factor, intercepted radiation.

Introducción

Leucaena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) es una leguminosa tropical leñosa que supera a otras especies leñosas en adaptación a diferentes condiciones edafo-climáticas, incorporación de N₂ atmosférico al conjunto suelo-planta-animal y en proveer forraje en cantidad y calidad (Estrada *et al.*, 2018; Villanueva *et al.*, 2018). El follaje de Leucaena es rico en proteína y puede mejorar el comportamiento productivo de un bovino al conformar hasta 30% del consumo total diario (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017).

El mayor impacto positivo de la inclusión de Leucaena, como de otras forrajeras leñosas, a sistemas silvopastoriles o bancos de proteína, es mediante aplicar una frecuencia de cosecha que permita que la especie manifieste su potencial de acumulación de follaje en cada cosecha y a lo largo de todas las cosechas, esta frecuencia puede ser intensa cada dos a seis meses según sean las condiciones para el crecimiento de la especie (Latt *et al.*, 2000; Sánchez *et al.*, 2008). Por tanto, el mejor aprovechamiento de Leucaena como fuente de forraje, en sistemas silvopastoriles o bancos de proteína, demanda contar con métodos de fácil aplicación en campo para identificar el momento en que la planta alcanza la máxima acumulación de follaje fresco y efectuar la cosecha de un forraje en abundancia y de calidad (Del Pozo y Álvarez, 2003). Para ello, es necesario desarrollar investigación ecológica sobre la biomasa y la productividad en plantaciones de leucaena enfocada a la selección de especies sobresalientes en condiciones agroclimáticas específicas y mejorar la predicción de rendimientos de forraje futuros (Kanazaqa *et al.*, 1982).

Las hojas absorben la radiación solar fotosintéticamente activa (400-700 nm) para proveer la energía necesaria para el crecimiento y mantenimiento de la planta, conforme la planta acumula más hoja, medida como área foliar, la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa también se incrementa, hasta alcanzar un máximo de intercepción, en este punto la planta logra a su vez la máxima acumulación de área foliar, momento adecuado para realizar la cosecha; de mantenerse una frecuencia de cosecha que permita ambas condiciones: máximas área foliar e intercepción de radiación solar, se logrará máximo rendimiento del forraje (Escalante-Estrada *et al.*, 2017). El desarrollo de ambos, área foliar e intercepción de la radiación solar son, por tanto, dos variables que determinan el patrón de acumulación de forraje.

El desarrollo del área foliar y su relación con la acumulación de biomasa en diferentes cultivos impulsa la investigación sobre métodos no destructivos para determinar el área foliar. En Leucaena se validó que la superficie de una lámina foliar se puede determinar en función del área de la hoja con la masa seca foliar (Kanazaqa *et al.*, 1982; Del Pozo y Álvarez, 2003), siendo necesario el desarrollo de ecuaciones matemáticas que incluyan el producto: (longitud x ancho de la lámina foliar) x Factor de Ajuste. También para Leucaena es necesario validar la medición de área foliar en campo a partir de estrategias no destructivas y de fácil medición, para luego asociar el desarrollo del área foliar con intercepción de radiación solar y acumulación de follaje, debido a que los estudios para

Leucaena son basados en modelos alométricos y destructivos (Kanazaqa *et al.*, 1982; Aguirre-Medina *et al.*, 2018).

Además del área foliar, cambios en la altura de la planta, se usa como una variable no destructiva para describir la dinámica de acumulación de biomasa e identificar el momento en que se logra una acumulación máxima (Kanazaqa *et al.*, 1982; Espinoza *et al.*, 1996; Aguirre-Medina *et al.*, 2018).

Actualmente existen instrumentos y equipos, como integradores portátiles de área foliar, sensores digitalizados para medir radiación recibida y capacidades computacionales para desarrollar modelos matemáticos que asocien los cambios en unas variables con cambios en otras. Por lo que la investigación presente tuvo como objetivo desarrollar modelos cuantitativos a partir de estrategias no destructivas para describir la dinámica de acumulación del área foliar, intercepción de radiación y cambios en altura de planta en plantaciones de Leucaena.

Materiales y métodos

Los datos de campo para el desarrollo de los modelos se obtuvieron de las áreas en Tepalcingo, Morelos y Tantoyuca, Veracruz, donde se encontraban parcelas establecidas de Leucaena de diferentes procedencias (tres accesiones elegidas al azar para cada una de las procedencias: Colima, Cuhnnningham, Morelos, Nuevo León y Veracruz). Las accesiones en cada procedencia sólo fueron las sobrevivientes durante el aviveramiento de seis meses después de elegir las cada diez en función del orden adoptado en la base de datos elaborada de un total de 149 sitios de colecta, con excepción de Cuhnnningham que fueron seleccionadas tres de un total de cuatro accesiones colectadas.

Tepalcingo se localiza a 18° 31' 18.5" N y 98° 56' 25.2" O, y 1,179 msnm, el clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación anual de 879 mm y temperatura media de 21.8 °C. La zona de Tantoyuca se localiza a 21° 19' 56.3" N y 98° 13' 22.3" O y 136 msnm, el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación anual de 1,228 mm y temperatura media de 23.9 °C (García, 2005). Ambos sitios tienen suelo vertisol, de acuerdo con la clasificación del sistema FAO/UNESCO 2010 (IUSS Working Group WRB, 2010) obtenido del continuo nacional a escala 1:1,000,000 del INEGI. El suelo en Morelos es de textura franco-arenosa, con pH de 6.3, CE de 0.04 dSm⁻¹, presentó un contenido de materia orgánica (MO) de 1.8%, con 15.8 mg kg⁻¹ de N aprovechable y 3.7 mg kg⁻¹ de P asimilable; en tanto, Tantoyuca tiene un suelo de textura arcillosa, con pH de 7.2, CE de 0.18 dSm⁻¹, 4.2% MO, con 12.5 mg kg⁻¹ de N aprovechable y 4.3 mg kg⁻¹ de P asimilable. El cultivo en ambos casos se desarrolló con la fertilidad de cada suelo.

Cada parcela experimental se estableció al inicio con 16 plantas de Leucaena por accesión, posterior al tiempo de establecimiento las parcelas y número total de plantas por sitio de plantación fueron 11 y 176 y 14 y 224 para Tepalcingo y Tantoyuca, respectivamente. En ambos sitios la plantación fue en hileras con tres metros de separación y con plantas cada dos metros dentro de una misma hilera, para permitir el máximo potencial

de crecimiento de la planta. El establecimiento fue por trasplante de plantas desarrolladas por seis meses en un vivero de la Universidad Autónoma Chapingo. Una vez en campo, las plantas fueron protegidas contra corte o pastoreo, a seis meses del trasplante fueron podadas a 50 cm de altura y a partir de este momento se inició la toma de datos.

De cada procedencia y sitio se seleccionaron las cuatro plantas centrales para la toma de datos de campo, en las dos o tres parcelas experimentales por accesión que al final se tuvieron como repetición. En cada planta se midió con aproximación de 0.1 cm la longitud y ancho de tres hojas del tamaño medio de cada una de las plantas usando una regla de 30 cm; posteriormente, a estas mismas hojas se les midió área foliar con un integrador de área foliar (LI-3100 Area Meter, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), se contabilizó el número de hojas totalmente expandidas en cada planta y con ambos se calculó el área foliar por planta.

Únicamente en Tantoyuca, además de área foliar y altura de la planta, desde la base a la yema apical del fuste principal, se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA) por arriba (iRFA) y a nivel del suelo por debajo (tRFA) del dosel, para ambas se usó un sensor lineal de quantum (Quantum Line 6 sensor Bar, Spectrum Technologies, Inc., USA) entre las 11:00 y 13:00 horas, el sensor se colocó perpendicular a las hileras de plantación tanto arriba como por debajo del dosel, la diferencia (iRFA - tRFA) fue la radiación interceptada (RI) que se expresó en $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ como en otras leguminosas y gramíneas (Colabelli *et al.*, 2011). Los datos de campo se tomaron a 28 días desde el inicio y hasta la mitad de las estaciones lluviosa y sequía, cada 14 días posteriormente, para todas las variables.

Además de las mediciones en campo, para ambos sitios se obtuvo la temperatura media mensual máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) y precipitación mensual acumulada de marzo 2018 a febrero 2019, a partir de los registros del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA). Para Tantoyuca, se consideró como estación lluviosa y sequía de marzo a septiembre de 2018 y de agosto 2018 a febrero 2019, respectivamente, y para Tepalcingo, estas estaciones fueron de febrero a agosto de 2018 y de septiembre 2018 a febrero 2019. El traslape en inicio y fin de las estaciones de crecimiento para ambos sitios de plantación se debe a los diferentes ciclos de crecimiento mostrados por las diferentes procedencias de las plantas de *Leucaena*.

El área rectangular de la cual sólo una parte es ocupada por el área de la hoja se obtuvo midiendo longitud y ancho y se denotó como variable X, en tanto, el área obtenida por el integrador de área se denotó como variable Y. Con cada par de datos X-Y se estimó la regresión lineal simple sin ordenada al origen (Berman y Saunders, 2008; Kuhn y Johnson, 2018) y la pendiente de la ecuación se utilizó como el factor de ajuste para obtener el área foliar a partir de los datos generados en campo de longitud y ancho de hoja.

Las áreas foliares obtenidas con integrador y factor de ajuste, y la altura de la planta se sometieron a un análisis de varianza mediante un modelo mixto que incluyó los efectos fijos de estación de crecimiento (E), sitio de crecimiento (S), procedencia (P), las dobles y triples interacciones entre efectos principales ($E \times S$, $E \times P$, $S \times P$ and $E \times S \times P$) y los efectos

aleatorios de accesión anidado en E y accesión anidado en E×S, con el procedimiento MIXED. Para RI el modelo fue similar con los efectos fijos de sitio de crecimiento (S), procedencia (P), la interacción S×P y el efecto aleatorio de accesión anidado en S. Para ambos modelos se incluyó además como efecto fijo la covariable de tiempo de muestreo después del corte de uniformización. Cuando fue necesario, las medias de las variables fueron estimadas con la instrucción LSMEANS.

Con el procedimiento NLIN se desarrollaron modelos logísticos y polinomios de segundo grado para describir la dinámica de cambio en radiación interceptada, área foliar y altura de planta para cada uno de los efectos significativos a través del tiempo de rebrote. Para área foliar se desarrollaron modelos independientes con la medición de área foliar por el integrador de área foliar y la calculada por la longitud y ancho de hoja y el factor de ajuste. Los criterios para determinar el modelo con mejor ajuste, fueron lograr el mayor coeficiente de determinación (R^2), el menor error estándar (EE) de la expresión y los intervalos de confianza (IC) más estrechos al 95% de confiabilidad para los parámetros de las ecuaciones. Todos los procedimientos estadísticos se desarrollaron con SAS (SAS[®] 9.4, SAS Inst. Inc., Cary, NC., USA).

Resultados

Precipitación y temperatura durante el estudio

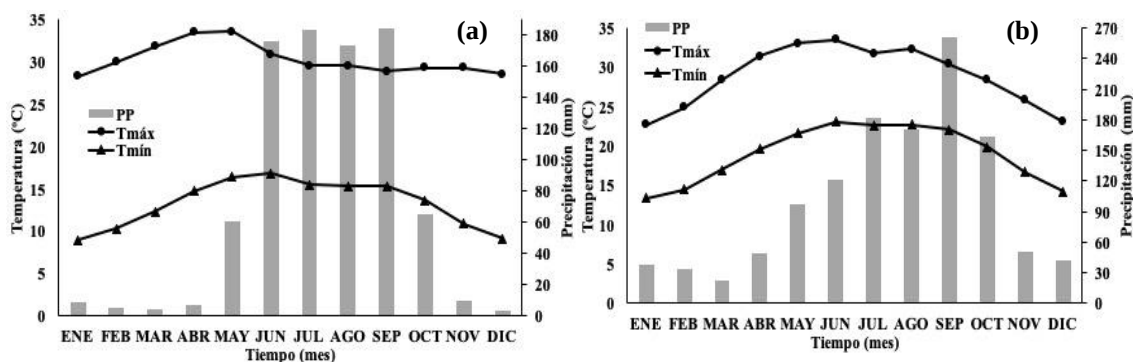
El área de Tepalcingo registró 879 mm de precipitación, 31 y 69% en la sequía y lluviosa, respectivamente; la temperatura máxima mensual varió de 28.3 a 33.6 °C y la mínima mensual de 8.9 a 16.8 °C, mayo y enero registraron la mayor y menor temperatura mensual máxima y mínima, respectivamente. Tantoyuca registró 1,228 mm de precipitación, 45 y 55% en la estación de sequía y lluviosa, respectivamente; la temperatura máxima mensual fue de 22.7 a 33.5 °C y la mínima mensual de 13.4 a 23.1 °C, junio y enero registraron la mayor y menor temperatura mensual máxima y mínima, respectivamente (Figura 1).

Tantoyuca recibió 40% más precipitación anual que Tepalcingo, pero en sequía la diferencia en precipitación recibida entre las áreas fue mayor, el primer sitio recibió poco más del doble de precipitación que el segundo en esta estación. Además de una menor precipitación, Tepalcingo mostro mayor temperatura máxima y menor mínima que en Tantoyuca.

Las diferencias entre los sitios de plantación en cantidad y distribución de la precipitación y la variación entre la temperatura máxima y mínima mensual, permite señalar que la información de campo provino de áreas con condiciones climáticas diversas. Tantoyuca fue un sitio cálido y húmedo, mientras que Tepalcingo fue un semicálido sub-húmedo, este sitio se consideró semicálido debido a la menor temperatura.

Figura 1

Temperatura media mensual máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) y precipitación (PP) mensual en Tepalcingo, Morelos, México, marzo-diciembre 2018, enero-febrero 2019 (a); y Tantoyuca, Veracruz, México, abril-diciembre 2018, enero-marzo 2019 (b).



Significancia estadística de las variables en estudio

La significancia estadística de las variables en estudio se muestran en el Cuadro 1. Los efectos de Procedencia, Sitio $\times$ Procedencia y la covariable Tiempo influyeron ($P < 0.0004$) sobre las áreas foliares calculadas con factor de ajuste y medidas con integrador, y la altura de planta. El efecto de Sitio sólo fue importante ($P = 0.0786$) para la altura de planta. En tanto, la radiación interceptada fue afectada ($P < 0.006$) por los efectos de Estación, Procedencia, Estación $\times$ Procedencia y la covariable Tiempo.

Cuadro 1. Significancia estadística de las áreas foliares calculadas con factor de ajuste y medidas con integrador, altura de planta y la radiación interceptada.

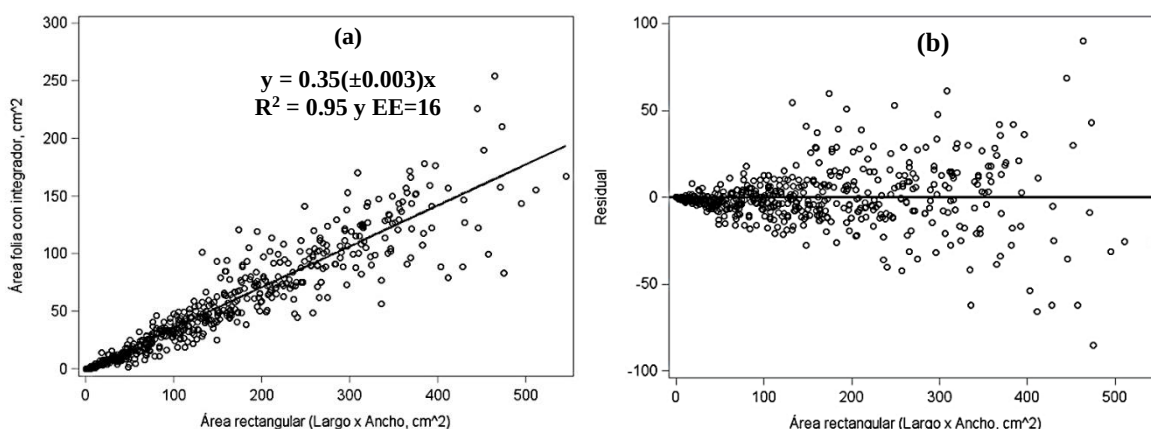
Factor	Área foliar (cm ²)		Altura (cm)	Radiación interceptada (μE m ⁻² s ⁻¹)
	Factor de ajuste	Integrador		
Estación (E)	0.2269	0.2474	0.3630	0.0067
Sitio (S)	0.1189	0.1557	0.0786	---
Procedencia (P)	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0001
E $\times$ S	0.3302	0.4218	0.1303	---
E $\times$ P	0.1239	0.9200	0.6116	0.0004
S $\times$ P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	---
E $\times$ S $\times$ P	0.1287	0.6058	0.3019	---
Tiempo	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Validación del factor de ajuste y ecuaciones de predicción de área foliar

La determinación del factor de ajuste para calcular área foliar con base a las mediciones de área foliar con integrador y a las no destructivas de longitud por ancho de hoja (área rectangular) fue posible y aceptable al lograr una R^2 de 95% y EE de 16 para la expresión (Figura 2a). El área foliar con integrador mostró una dispersión amplia cuando ésta superó los 50 cm². Esta tendencia a mayor frecuencia de áreas foliares superiores a los 50 cm² fue reflejo del tamaño de la hoja que fue mayor conforme avanzó la edad de la planta; mismo fenómeno apreciado con los residuales (Figura 2b), que se traduce en una variabilidad cada vez más alta a mayores tamaños de hoja.

Figura 2

Dispersión del área foliar observada por planta (a) y residuales (b) con respecto de la estimada mediante el producto de longitud x ancho de hoja en plantaciones de Morelos y Veracruz. Modelo significativo ($P < 0.0001$).

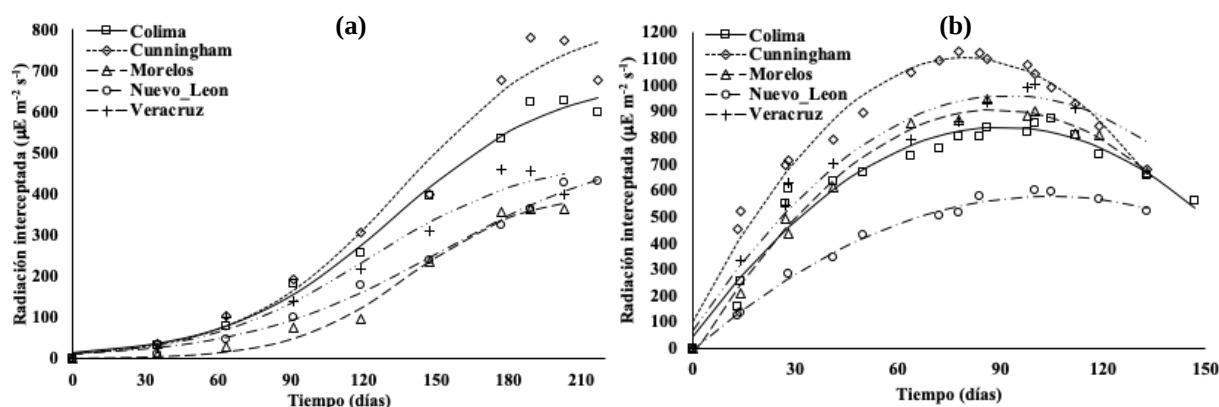


Modelos descriptivos de la dinámica de radiación interceptada (RI)

El patrón de RI, a lo largo del rebrote, en cada estación de crecimiento (sequía y lluviosa) y procedencia fue descrito por modelos distintos; en sequía, este patrón fue explicado por un modelo cuadrático, la RI incrementó constantemente desde los 80 (en Cunningham) y hasta los 104 días (en Morelos) para alcanzar un máximo de RI y luego decreció. En la estación lluviosa, el modelo fue logístico con reducción progresiva en la magnitud del incremento de la RI, luego de los 203 (en Morelos y Veracruz) y 217 días de rebrote (en Colima, Cunningham y Nuevo León) el incremento fue mínimo (Figuras 3a y 3b). Ambos modelos demuestran que el monitoreo de la RI es una estrategia aplicable en condiciones de campo para la toma de decisiones del momento de la cosecha del forraje por la alta capacidad predictiva observada con la R^2 , EE y los IC al 95% para los parámetros.

Figura 3

Modelos descriptivos de la cantidad de radiación interceptada (RI) medida como $\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por procedencia en una plantación de *Leucaena* en las estaciones lluviosa (a) y de sequía (b). R^2 = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Modelos significativos ($P < 0.0001$).



Estación	Procedencia	Ecuación	R^2	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Lluviosa	Colima	$y=688/[1+51.2e^{(-0.0296x)}]$	0.99	8.0	(585, 791)	(2, 100)	(0.0202, 0.0390)
	Cunningham	$y=833/[1+65.5e^{(-0.0306x)}]$	0.97	18.1	(596, 1071)	(-62, 193)	(0.0122, 0.0491)
	Morelos	$y=406/[1+311.0e^{(-0.0413x)}]$	0.99	5.8	(332, 481)	(-346, 968)	(0.0233, 0.0592)
	Nuevo León	$y=521/[1+42.5e^{(-0.0247x)}]$	0.99	4.1	(416, 627)	(16, 69)	(0.0180, 0.0313)
	Veracruz	$y=489/[1+39.4e^{(-0.0300x)}]$	0.97	10.5	(350, 628)	(-26, 105)	(0.0118, 0.0483)
Sequía	Colima	$y=50.0+17.7x-0.0974x^2$	0.95	13.5	(-36, 120)	(15, 20)	(-0.1142, -0.0806)
	Cunningham	$y=102.5+25.0x-0.1565x^2$	0.97	11.8	(33, 172)	(22, 27)	(-0.1749, -0.1381)
	Morelos	$y=-28.1+21.0x-0.1184x^2$	0.99	8.4	(-78, 22)	(19, 23)	(-0.1315, -0.1052)
	Nuevo León	$y=-7.6+11.2x-0.0538x^2$	0.99	5.1	(-35, 20)	(10, 12)	(-0.0614, -0.0462)
	Veracruz	$y=69.5+19.3x-0.1045x^2$	0.97	19.4	(-49, 188)	(14, 24)	(-0.1483, -0.0607)

La RI en sequía fue siempre superior que en la estación lluviosa en casi todas las procedencias, con excepción de Nuevo León. Considerando las máximas RI de cada procedencia, las de sequía fueron entre 33 y 139% superiores a las registradas para las procedencias durante la estación lluviosa. En contraste, en lluviosa la RI siempre mostró incrementos constantes, no así en sequía, estación en que se registró hasta una caída en la RI. La dinámica distinta en la RI entre ambas estaciones puede ser reflejo del efecto combinado de la frecuencia de días nublados y disponibilidad de humedad en cada una de ellas.

Modelos descriptivos de la dinámica de acumulación de área foliar

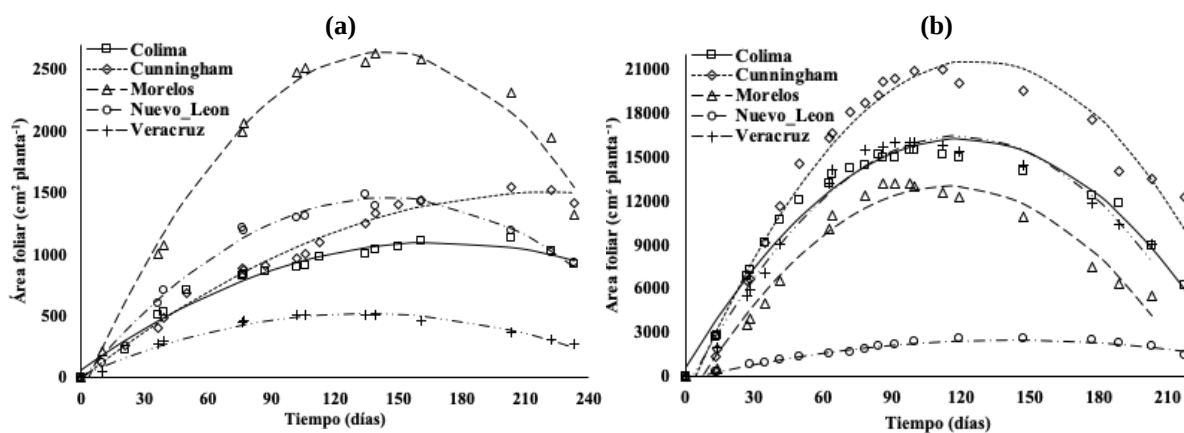
Los modelos de las plantaciones de Morelos y Veracruz fueron polinomios de segundo grado para las áreas foliares calculada con factor de ajuste y medida con integrador (Figuras 4 y 5). El área foliar calculada con factor de ajuste incrementó

constantemente y alcanzó un máximo entre los 134 (para Veracruz) y 222 días (para Cunningham) en Morelos y entre los 114 (para Morelos) y 141 días (para Nuevo León) en Veracruz, posterior a ello decreció (Figura 4). En tanto, el área foliar medida con integrador incrementó constantemente y alcanzó un máximo entre los 139 (para Veracruz) y 228 días (para Cunningham) en Morelos y entre los 119 (para Veracruz) y 143 días (para Nuevo León) en Veracruz, posterior a ello decreció (Figura 5).

Considerando las máximas áreas foliares de cada procedencia entre los sitios de plantación, las procedencias de Veracruz fueron entre 0.7 y 30.3 veces superiores a las registradas en Morelos para ambas áreas foliares calculada con factor de ajuste y medida con integrador de área foliar (Figuras 4 y 5).

Figura 4

Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar calculada mediante un factor de ajuste, en plantaciones de *Leucaena* en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R^2 = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos ($P < 0.0001$).



Sitio	Procedencia	Ecuación	R^2	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Morelos	Colima	$y=60.2+12.3x-0.0365x^2$	0.97	13.2	(-19, 139)	(11, 14)	(-0.0426, -0.0304)
	Cunningham	$y=-4.6+13.4x-0.0305x^2$	0.99	13.3	(-84, 75)	(12, 15)	(-0.0366, -0.0244)
	Morelos	$y=-134.4+38.8x-0.1357x^2$	0.99	30.6	(-299, 30)	(36, 42)	(-0.1491, -0.1223)
	Nuevo León	$y=-17.2+20.4x-0.0709x^2$	0.99	13.4	(-89, 55)	(19, 22)	(-0.0768, -0.0651)
	Veracruz	$y=15.3+7.6x-0.0284x^2$	0.98	6.8	(-21, 52)	(7, 8)	(-0.0314, -0.0254)
Veracruz	Colima	$y=582.6+260.3x-1.0864x^2$	0.97	165.2	(-326, 1,491)	(240, 280)	(-1.1767, -0.9960)
	Cunningham	$y=-1,513.3+363.7x-1.4317x^2$	0.97	248.3	(-2,861, -165)	(333, 394)	(-1.5682, -1.2951)
	Morelos	$y=-1,744.3+257.5x-1.1255x^2$	0.96	219.8	(-2,987, -501)	(229, 286)	(-1.2600, -0.9910)
	Nuevo León	$y=-189.7+38.1x-0.1347x^2$	0.98	28.0	(-338, -41)	(35, 42)	(-0.1500, -0.1194)
	Veracruz	$y=826.8+290.1x-1.2178x^2$	0.98	190.3	(-1,903, 249)	(265, 315)	(-1.3343, -1.1014)

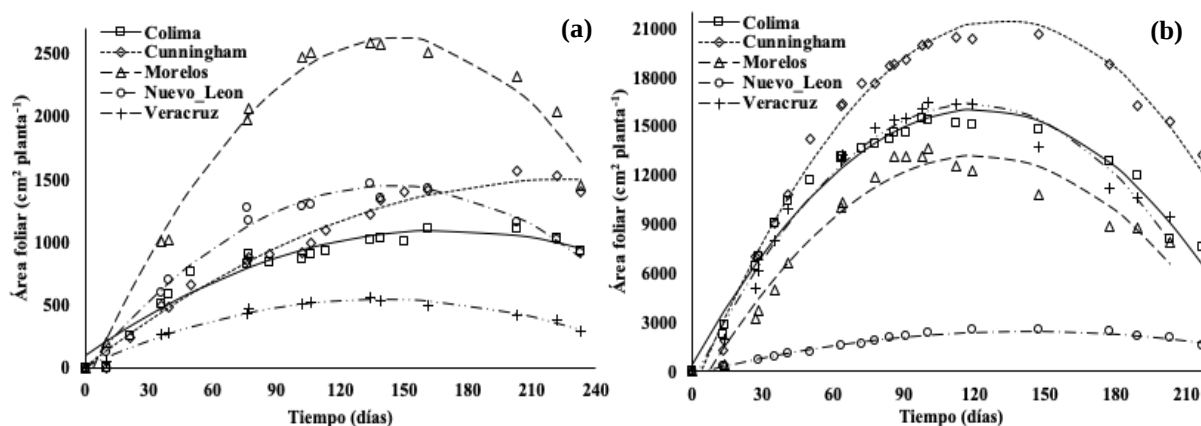
Los modelos desarrollados con las áreas foliares medidas con integrador y calculadas con factor de ajuste fueron aceptables al lograr una R^2 de 82% o superiores y EE de 436.6

cm² o inferiores, lo que justifica el monitoreo de área foliar con el factor de ajuste generado como una estrategia no destructiva útil en la toma de decisiones del momento de cosecha de forraje de *Leucaena* (Figuras 4 y 5). El EE fue de 1 a 33 veces inferior para las procedencias en Morelos en comparación con las de Veracruz (Figuras 4 y 5).

En la plantación de Morelos, considerando los EE de las expresiones del modelo basado en la estimación por cálculo sub-estimó para casi todas las procedencias entre 0.6 (para Morelos) y 36% (para Colima), con excepción para Veracruz que sobre-estimó en más de 15% el área foliar comparado con el basado en datos del integrador. En tanto, para la plantación de Veracruz, la estimación por cálculo sub-estimó en 3% para Veracruz y 98% para Morelos, y sobre-estimó entre 4.1 (para Nuevo León) y 30.6% (para Cunningham) el área foliar comparado con el basado en el integrador.

Figura 5

Modelos descriptivos del desarrollo del área foliar medida con integrador, en plantaciones de *Leucaena* en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R² = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Todos los modelos fueron significativos (P < 0.0001).



Sitio	Procedencia	Ecuación	R ²	EE	IC al 95% para los parámetros		
					a	b	c
Morelos	Colima	$y=100.6+11.7x-0.0347x^2$	0.94	17.9	(-7, 208)	(10, 14)	(-0.0430, -0.0264)
	Cunningham	$y=7.1+13.2x-0.0291x^2$	0.98	15.3	(-85, 99)	(11, 15)	(-0.0361, -0.0220)
	Morelos	$y=-127.9+37.9x-0.1299x^2$	0.99	30.8	(-293, 38)	(35, 41)	(-0.1434, -0.1165)
	Nuevo León	$y=-11.1+20.3x-0.0708x^2$	0.98	16.8	(-101, 79)	(18, 22)	(-0.0781, -0.0634)
	Veracruz	$y=4.7+7.8x-0.0281x^2$	0.99	5.8	(-26, 36)	(7, 8)	(-0.0306, -0.0256)
Veracruz	Colima	$y=382.2+256.9x-1.0534x^2$	0.97	153.8	(-464, 1,228)	(238, 276)	(-1.1375, -0.9693)
	Cunningham	$y=-1,233.9+344.0x-1.2998x^2$	0.98	172.4	(-2,182, -285)	(323, 365)	(-1.3941, -1.2055)
	Morelos	$y=-718.8+207.7x-0.7719x^2$	0.82	436.6	(-3,186, 1,749)	(154, 261)	(-1.0090, -0.5348)
	Nuevo León	$y=-194.8+37.4x-0.1310x^2$	0.98	26.8	(-337, -52)	(34, 41)	(-0.1456, -0.1163)
	Veracruz	$y=654.8+286.4x-1.2003x^2$	0.97	196.0	(-1,763, 453)	(261, 312)	(-1.3202, -1.0803)

Las máximas áreas foliares fueron superiores a 2,633 cm² planta⁻¹ en la plantación de Morelos y 21,525 cm² en la plantación de Veracruz, que correspondieron a las

procedencias de Morelos y Cunningham, respectivamente. En contraste, las mínimas áreas foliares fueron inferiores a $546 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ en la plantación de Morelos y $2,506 \text{ cm}^2$ en la plantación de Veracruz, que correspondieron a las procedencias de Veracruz y Nuevo León, respectivamente. Con base a lo anterior, podría afirmarse que a mayor acumulación de área foliar, también es mayor la diferencia entre modelos desarrollados con datos de área foliar en función de la procedencia y sitio de plantación.

Esta mayor acumulación de área foliar coincide también con la mayor RI en las estaciones de sequía y lluviosa para los casos de Colima, Cunningham y Morelos (Figura 3). Por lo que la expansión del área foliar tiene en la cantidad de radiación solar recibida un factor determinante, en función de las procedencias y las estaciones y sitios de crecimiento.

Los intervalos de confianza para los parámetros de las ecuaciones generadas con las áreas foliares medidas con integrador y calculadas con factor de ajuste indican diferencias entre las procedencias evaluadas (Figuras 4 y 5). En la plantación de Morelos las procedencias de Colima, Cunningham y Nuevo León mostraron un comportamiento intermedio (10 a $22 \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$) entre Morelos y Veracruz para la tasa de acumulación de área foliar, Morelos superó en más de cuatro veces la tasa de crecimiento observada para Veracruz. En tanto, para la plantación de Veracruz las procedencias de Colima, Morelos y Veracruz mostraron un comportamiento intermedio (154 a $315 \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$) entre Cunningham y Nuevo León para la tasa de acumulación de área foliar, Cunningham superó en más de ocho veces la tasa de crecimiento observada para Nuevo León.

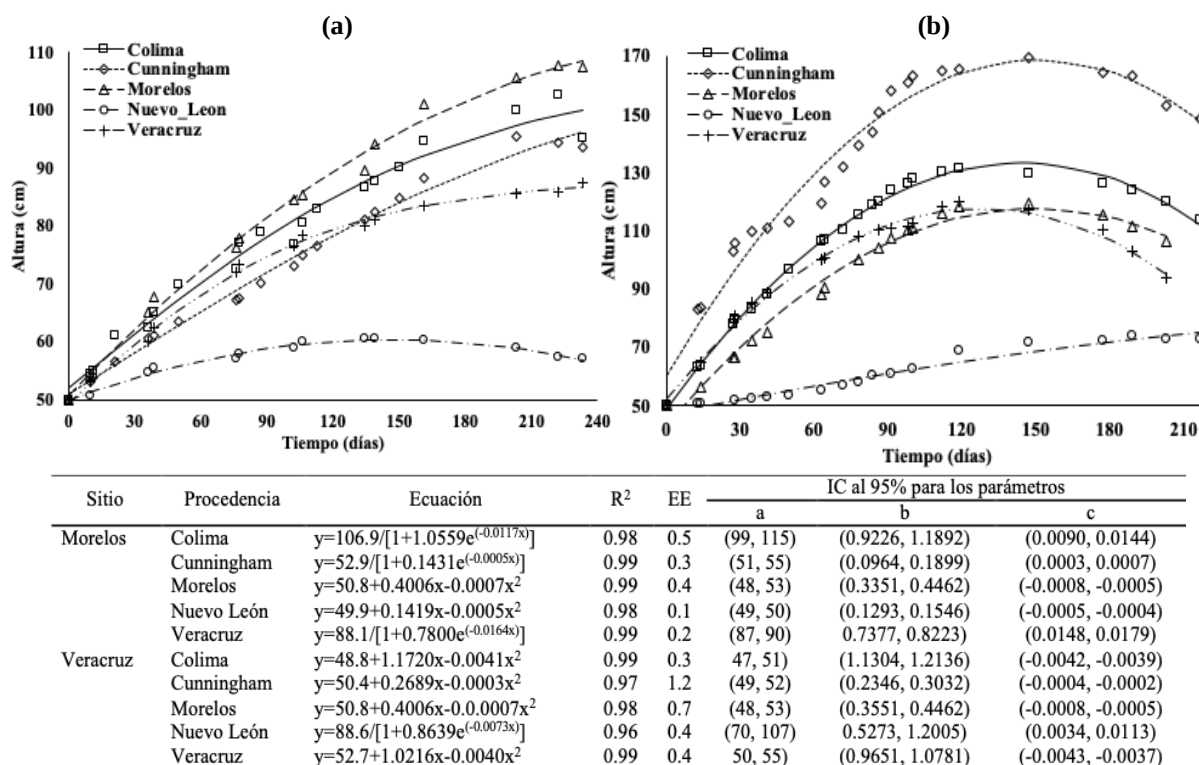
Modelos descriptivos de la dinámica de cambio en altura de planta

Los patrones de cambio en altura de planta fueron similares a los correspondientes en RI (Figuras 3 y 6). En la plantación de Morelos el modelo fue logístico para las procedencias de Colima, Cunningham y Veracruz, y cuadrático para Morelos y Nuevo León; en tanto, para la plantación de Veracruz en casi todas las procedencias el comportamiento fue cuadrático, con excepción para Nuevo León que fue explicado por un modelo logístico. Con el modelo cuadrático se registró un incremento en altura hasta un máximo y luego una ligera reducción, mientras que con el modelo logístico la planta siempre mantuvo un incremento de altura, aunque con cambios en la magnitud de este incremento a lo largo de la estación de crecimiento (Figura 6).

Las alturas máximas fueron de 60 (para Nuevo León) a 105 cm (para Morelos) en la plantación de Morelos y de 72 (para Nuevo León) a 169 cm (para Cunningham) en la plantación de Veracruz, y se registraron entre los 148 a 203 y 151 a 177 días de rebrote, respectivamente. La altura de planta para las procedencias de la plantación de Veracruz superaron en 12 a 75% a las de Morelos. Esta situación de máxima altura para Cunningham coincidió con RI en ambas estaciones de crecimiento. Esto permite señalar que los entrenudos en *Leucaena* fueron más largo en la plantación de Veracruz que en Morelos, y esta mayor longitud explica las mayores RI y área foliar acumulada.

Figura 6

Modelos descriptivos de cambios en altura de planta en una plantación de *Leucaena* en Morelos (a) y Veracruz (b) para procedencias distintas. R^2 = coeficiente de determinación, EE = error estándar e IC = intervalo de confianza. Ambos modelos fueron significativos ($P < 0.0001$).



Discusión

La *Leucaena* prosperó en ambos sitios de plantación con diferencias en cantidad y distribución de las lluvias e incidencia de temperaturas ambientales bajas, esto validó la capacidad amplia de *Leucaena* de adaptarse a diferentes condiciones tropicales, aunque con variaciones importantes en el desarrollo y acumulación de follaje. En Veracruz que fue el más cálido y húmedo, la magnitud de área foliar acumulada y la altura de planta fueron mayores que en Morelos, que fue más fresco y seco. Las variaciones en clima y respuesta de la *Leucaena* en las variables medidas dan validez a los resultados.

El uso de un factor de ajuste para que las mediciones no destructivas de longitud y ancho de la hoja sirvieran de base para estimar el área foliar en un momento determinado fue válido. La validación del factor de ajuste coincide con lo registrado por Del Pozo y Álvarez (2003) para la estación de sequía, quienes demostraron la utilidad práctica de

ecuaciones con $R^2 = 0.95$ para la estimación del área foliar de la *Leucaena* a partir de los valores de masa seca de sus hojas. El área foliar calculada por mediciones no destructivas y ajustadas, puede implicar una ligera sub o sobre estimación de esta variable en comparación con la determinación destructiva, sin embargo, el gran ahorro en tiempo, esfuerzo y mantener la planta en pie favorece este acercamiento (Espinoza *et al.*, 1996).

Los coeficientes de determinación altos de este estudio que resultaron del cálculo del área foliar de forma no destructiva, y basados en medir longitud y ancho de hoja con un factor de ajuste, permite señalar que este es un método adecuado para medir área foliar en plantaciones de *Leucaena* y con ello determinar un criterio para el momento de cosecha. En este sentido, el estudio realizado concuerda con los estudios de Espinoza *et al.* (1996) que concluyeron que la confiabilidad estadística lograda por los métodos no destructivos los hace una opción para el seguimiento en campo de cultivos en pie de *Leucaena*.

La intercepción de la radiación solar es producto de una participación compleja de factores externos y propios de la planta, entre ellos la presencia de días nublados, topología y densidad del cultivo, arreglo foliar y longitud de entrenudos, sin embargo, es un factor determinante en el patrón de acumulación de biomasa, por lo que es un parámetro medular en el seguimiento a la producción de un cultivo (Kanazaqa *et al.*, 1982), y con ello la importancia de darle seguimiento en campo a los cultivos en pie para la toma de decisiones, como lo es la cosecha oportuna para maximizar rendimientos en el caso de forrajeras perennes. El patrón de intercepción de radiación solar encontrada en el estudio fue contrastante entre las estaciones de sequía y lluviosa, en la primera la intercepción aumentó rápidamente para alcanzar un máximo en un tiempo corto y superior al registrado en lluvias. El comportamiento en sequía fue similar a lo encontrado en pastizales naturales por Colabelli *et al.* (2011), quienes también encontraron una rápida intercepción de radiación en la estación con menor frecuencia de días nublados.

Con base en intercepción de radiación el tiempo de rebrote para la cosecha en las estaciones de sequía y lluviosa, debe ser distinto. En este estudio en sequía la plantación de *Leucaena* estaba lista para cosecha entre los 112 y los 123 días de rebrote más temprano que en la lluviosa. Aunque, este comportamiento estuvo en función de las procedencias evaluadas durante las dos estaciones de crecimiento (lluviosa y sequía). Para la sequía, el intervalo propuesto en este estudio es 22 días inferior al propuesto por Aguirre-Medina *et al.* (2018) y para la lluviosa el intervalo de rebrote propuesto en este estudio es 35 días superior a lo recomendado por Espinoza *et al.* (1996). Estas diferencias resaltan la importancia de contar con métodos rápidos y sencillos de aplicar en campo, para decidir el momento de cosechar con base al desempeño real del cultivo y no solo depender de intervalos prefijados que no incorporan el verdadero desempeño de la plantación o de la especie a cosechar. Sin embargo, sería interesante conocer el comportamiento de la RI a través del tiempo en plantaciones de *Leucaena* con densidades superiores a las de este estudio.

En especies de ciclos anuales o perennes herbáceas, los modelos para describir la dinámica a través del tiempo de la radiación interceptada tienden a ser lineales o logísticos

y con menores intervalos de tiempo para alcanzar la máxima radiación interceptada, por ejemplo Escalante-Estrada *et al.* (2017) en cultivo de frijol ayocote, Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2004) que en frijol encontraron la máxima intercepción de radiación a los 84 días después de la siembra, y Colabelli *et al.* (2011) quienes reportaron intercepciones máximas de radiación entre los 50 y 60 días de rebrote en diferentes leguminosas y gramíneas herbáceas perennes. Estas diferencias en patrones y tiempos en la cantidad de radiación interceptada entre especies anuales o perennes herbáceas con respecto de las arbustivas enfatizan la necesidad de considerar a ambos estratos cuando se decidan los momentos de cosechas en sistemas silvopastoriles.

El seguimiento a través del tiempo de la acumulación de área foliar por métodos no destructivos fue posible, y al igual que con intercepción de la radiación, las máximas acumulaciones de áreas foliares se dieron a intervalos de rebrote distintos, aunque en este fue en función de las procedencias para cada una de las estaciones de crecimiento. Espinoza *et al.* (1996) propusieron en Leucaena usada como banco forrajero irrigada y fertilizada con NPK cosechas fijas cada 63 días a través del año. Con base en los resultados del presente estudio, mantener un mismo intervalo de cosecha a lo largo del año puede implicar que Leucaena no alcance a expresar sus máximos rendimientos, resaltando la importancia de seguimientos no destructivos para decidir el momento de cosecha.

Altura de planta, como lo fueron las otras variables medidas, permitió identificar las diferentes tasas de desarrollo del cultivo en cada una de las procedencias y sitios de crecimiento. Aguirre-Medina *et al.* (2018) realizaron una cosecha de Leucaena a los 120 días del establecimiento y a una altura variable entre 124 y 128 cm, lo que coincidió con la altura de cosecha estimados en este estudio para las procedencias evaluadas en la plantación de Veracruz, aunque con 8 a 57 días más tarde. Espinoza *et al.* (1996) recomendaron la cosecha a los 63 días entre cortes, momento en el cual se lograron 135 y 157 cm de AP durante la sequía y lluviosa, respectivamente, coincidiendo con las AP obtenidas en este estudio también para las procedencias de la plantación de Veracruz.

El seguimiento del desarrollo de Leucaena mediante mediciones no destructivas como la intercepción de radiación, área foliar acumulada y altura de planta, mostraron un patrón conjunto de respuesta que permite señalar que todas ellas por sí solas o en conjunto, son consistentes en reflejar los cambios asociados al desarrollo de la planta, a la vez de ser sensibles a cambios en este desarrollo asociados a condiciones climáticas como temperatura y disponibilidad de humedad. Este patrón consistente de respuesta de las distintas variables usadas apuntala la conclusión de Espinoza *et al.* (1996), de que la validación de métodos no destructivos para dar seguimiento al desarrollo en pie de cultivos es un importante campo de investigación, por su utilidad práctica.

Por tanto, las variables no destructivas permitieron desarrollar modelos sensibles a describir cambios en el desarrollo de Leucaena a través del tiempo y sitios de plantación; sin embargo, queda pendiente la validación de estos modelos para determinar rendimiento de follaje y otros atributos, como interacción con otras especies herbáceas (espontáneas y sembradas), densidad de población, impacto sobre características del suelo (erosión,

capacidad de retención de humedad), y aspectos microclimáticos como humedad relativa. Kanazaqa *et al.* (1982) y Del Pozo y Álvarez (2003) señalan la existencia de relaciones cuantitativas entre variables como la acumulación de área foliar, y estos atributos fundamentan la necesidad de continuar con este proceso de validación.

Conclusiones

La determinación de área foliar y sus cambios a través del tiempo, en las procedencias evaluadas en las plantaciones de Morelos y Veracruz, así como los cambios en la radiación interceptada y altura de planta en plantaciones de *Leucaena* pueden ser determinados por modelos cuantitativos desarrollados a partir de variables no destructivas. Los modelos fueron polinomios de segundo grado y logísticos y permitieron determinar los días de rebrote en que se alcanzaron los valores máximos de las variables mencionadas en plantaciones de *Leucaena*. Estos modelos podrían generar la información necesaria para decidir momentos oportunos de cosecha del follaje de plantaciones de *Leucaena*.

Agradecimientos

Los autores reconocen el financiamiento y apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Autónoma Chapingo y al Tecnológico Nacional de México a través del ITS Tantoyuca para el desarrollo de la Disertación Doctoral del primer autor. El agradecimiento también es extensivo a los Sres. Claudio y Cleotilde Benítez Cardozo por el espacio facilitado para el desarrollo del trabajo de campo en el ejido Limón, Tepalcingo, Morelos, y al área de Ecofisiología de Cultivos del Postgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados por el apoyo con la instrumentación para la obtención de las variables en estudio.

Literatura citada

- Aguirre-Medina, J. F.; Gálvez-López, A. L. y Ibarra-Puón, J. C. (2018). Growth of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit biofertilized with arbuscular mycorrhizal fungi in the nursery. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambient.* 24(1):49-58. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.07.043
- Berman, R. y Saunders, M. (2008). Dealing with Statistics. What you need to know? Open University Press. Buckingham, G. B. R. McGraw-Hill Education. London, U.K. 149 pp.
- Colabelli, M. R.; Agnusdei, M. G. y Durand, J. L. (2011). Grupos funcionales de plantas, producción de forraje y eficiencia de uso de radiación de pastizales naturales en condiciones potenciales y limitadas de agua y nitrógeno. *Rev. Inv. Agropecu.* 37(1):62-74.
- Del Pozo, P. P. y Álvarez, A. 2003. Estimación del área foliar de la *Leucaena leucocephala* de la masa seca de sus hojas. En: Sánchez, M. D. y Rosales, M. (eds.).

- Agroforestería para la Producción Animal en América Latina (II) No. 155. Dirección de Producción y Sanidad Animal, FAO, Roma, Italia. pp. 171-181.
- Escalante-Estrada, J. A. S.; Rodríguez-González, M. T. y Escalante-Estrada, Y. I. (2017). Modelos que describen la distribución del rendimiento, sus componentes y radiación solar en ayocote en espaldera de tripie. En: F. Pérez, D. Sepúlveda, R. Salazar, D. Sepúlveda (eds.) *Ciencias Matemáticas aplicadas a la Agronomía*. Handbook T-I.-©ECORFAN, Texcoco de Mora, México. pp. 9-17.
- Espinoza, F.; Tejos, R.; Chacón, E.; Arriolas, L. y Argenti, P. (1996). Producción, valor nutritivo y consumo por ovinos de *Leucaena leucocephala*. I. Arquitectura. *Zootec. Trop.* 14(2):215-239.
- Estrada, L. I.; Esparza, J. S.; Albarrán, P. B.; Yong, A. G.; Rayas, A. A. A. y García M. A. (2018). Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. *Cienc. Ergo-Sum.* 25(3):1-13.
- Gutiérrez-Rodríguez, M.; Escalante-Estrada, J. A.; Rodríguez-González, M. T. y Reynolds, M. P. (2004). Índices de reflectancia y rendimiento del frijol con aplicaciones de nitrógeno. *Terra Latinoam.* 22(4):409-416.
- IUSS Working Group WRB. 2010. Guidelines for constructing small-scale map legends using the WRB. FAO, Rome. URL: <http://www.fao.org/nr/land/soils/soil/wrb-documents/en/>
- Kanazaqa, T.; Sato, A. y Orsolino, R. S. (1982). Above-ground biomass and the growth of giant ipil ipil [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit] plantations in Northern Mindanao Island, Philippines. *J. A. R. Q.* 15 (3):209-217.
- Kuhn, M. y K. Johnson. (2018). *Applied predictive modeling*. New York, USA: Springer. 527 p.
- Latt, C. R.; Nair, P. K. R. y Kang, B. T. (2000). Interactions among cutting frequency, reserve carbohydrates, and post-cutting biomass production in *Gliricidia sepium* and *Leucaena leucocephala*. *Agrofor. Syst.* 50(1):27-46.
- Piñeiro-Vázquez, A. T.; Jiménez-Ferrer, G. O.; Chay-Canul, A. J.; Casanova-Lugo, F.; Díaz-Echeverría, V. F.; Ayala-Burgos, A. J.; Solorio-Sánchez, F. J.; Aguilar-Pérez, C. F. y Ku-Vera, J. C. (2017). Intake, digestibility, nitrogen balance and energy utilization in heifers fed low-quality forage and *Leucaena leucocephala*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 228:191-201. Doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.04.009.
- Sánchez, G. A.; Faría, M. J. y Araque, C. (2008). Producción de materia seca en una asociación *Cenchrus ciliaris*-*Leucaena leucocephala* al aplazar su utilización durante la época seca. *Zootec. Trop.* 26(2):117-123.
- Villanueva, C.; Casasola, F. y Detlefsen, G. (2018). *Potencial de los sistemas silvopastoriles en la mitigación al cambio climático y en la generación de múltiples beneficios en fincas ganaderas de Costa Rica*. Boletín Técnico No. 87. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. 61 pp.

This chapter was prepared for submission to the scientific journal *Animal Feed Science and Technology*

Chapter 5. Environmental factors variation in fodder production and feed value of Mexican native *Leucaena leucocephala*

Claudio Vite^{a,b}, Pedro A. Martínez^{a*}, Enrique Cortés^a, Ponciano Pérez^c, José M. Palma^d, Danilo Pezo^e, Luis A. Miranda^a

^a Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México, México

^b Tecnológico Nacional de México - ITS Tantoyuca. Desv. Lindero-Tametate S/N, Col. La Morita, C. P. 92100, Tantoyuca, Veracruz, México

^c Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, Km. 88.5 Carretera Federal Xalapa-Veracruz, Predio Tepetates, C. P. 91690, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México

^d Colegio Mexicano de Agroforestería Pecuaria A. C., Centro Universitario de Investigación y Desarrollo Agropecuario, Universidad de Colima, C. P. 28040, Colima, Colima, México

^e Independent consultant of International Livestock Research Institute (ILRI) and Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, C. P. 7170, Cartago, Turrialba, Costa Rica

*Corresponding author: pedroarturo@correo.chapingo.mx

Abstract

Environmental factors variation (season and site) in forage quality and production of five provenances (Colima, Cunningham, Morelos, Nuevo León and Veracruz) of *Leucaena leucocephala* were evaluated. During the dry season the fodder harvest (FH) and the time of microbial colonization (L) were earlier; dry matter (DM), crude protein (CP), Ca, P, K, Cu, Fe and Zn were higher; but with the CH₄ produced (CH₄P), rapid fermentable fraction (FF), ethereal extract (EE), neutral detergent fiber (NDF), lignin (LIG), digestibility of the organic matter (OM) at 72 h of fermentation (IVDOM72) and Ca:P ratio were lower than in the rainy season. FH and L were earlier; Foliar area (FA), regrowth height (RH), plant density (PD), forage yield (FY), survival (SV), CP, EE, NDF, CH₄, total gas production (TGP), K, Fe and Zn were higher, and OM, IVDOM72 and Mg were lower in Veracruz than in Morelos plantation. Cunningham showed regrowth height (RH) higher than other provenances. Morelos exceeded EE, acid detergent fiber (ADF), the gas production rate (S), FF, slow fermentable fraction (SF), IVDOM72, Na, Ca, P, Fe and Zn over the other provenances. L and the metabolizable energy content was more low in Morelos than in the other provenances. The balance between the quality of the parameters evaluated suggested Morelos provenance as the forage of higher nutritional quality during the year.

All provenances showed appropriate quality parameters to complement part of the nutritional requirements from livestock.

Keywords: Forage yield, Chemical composition, Methane production, Fermentative quality, Mineral content.

Introduction

The variability in the production and the nutritional value of the forages is a product of the annual transition of temperature, relative humidity and rainfall (Leng, 1990). These factors depend on livestock production, because it is the main source of food for grazing ruminants and represent the highest volume of the diet (López-Vigosa et al., 2019). This variability is a great defiance for tropical livestock based on monocultures of grazing grasses during the dry season, in which the availability and quality of forages drastically decrease (Cuartas et al., 2014), forcing to look for alternatives that improve this situation in different agroclimatic regions.

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit (Leucaena) is a woody species native of the Mexican tropics that provides forage in quantity and quality to the livestock in silvopastoral systems (SPS), used as an alternative during the dry season (Navas, 2010; Estrada et al., 2018). This forage quality is based on high levels of crude protein ($> 25\%$) and energy (> 4.2 Mcal BE kg MS⁻¹), and low fiber levels ($<44\%$ FDN and $<27\%$ FDA); thus, this resource is capable of ensuring that the bovine SPS grazing eat a diet with less structural carbohydrates but enough protein and fiber to maintain rumen functionality (Minson, 1990; Sierra et al., 2017; Martínez-Hernández et al., 2019).

Leucaena has stood out among the woody forage and woody legumes of other families and species, for its agronomic attributes and promotion of animal production (Shelton and Dalzell, 2007). Some attributes are the higher yield of aerial biomass, concentration of leaf nutrients, flexibility of branches, amount of atmospheric N₂ incorporated into the soil-plant-animal system, drought tolerance, vigorous regrowth, acceptance by cattle, persistence in the field, and accessibility for browsing (Navas, 2010; Cuartas et al., 2014).

Due to the nutritional content of *Leucaena* foliage, cattle can improve their productive performance by forming up to 30% dry basis of total daily consumption (Palma, 2006; Sierra et al., 2017; Piñeiro-Vázquez et al., 2017). However, due to the *Leucaena* high fiber content, it is classified as a rough forage that could limit livestock productivity if it is not efficiently degraded in the rumen (Gaviria et al., 2015). Therefore, it is important to study both the production and the nutritional quality of *Leucaena* fodder, to determine its availability for being part of the diet for livestock that graze in SPS, throughout the year and in different tropical climates.

There is a concern to achieve regenerative and sustainable livestock without causing greater environmental contamination by CH₄. Thus, an option for this is the use of *Leucaena* foliage in livestock feed as an indigenous resource in the Mexican tropics

(Palma, 2006; Vite et al., 2020). It is proposed to study the provenances compared with the improved Cunningham variety, as there were no research reports on seasonal, provenances and growing site variations in production and forage quality between the comparison of improved varieties and native Mexican accessions. An understanding of the environmental factor changes in forage production and nutritional quality of the native Mexican accessions is also needed to optimize the use of *Leucaena* as a feed supplement in the tropical SPS. This study aimed to evaluate the seasonal, provenance, and growing site variation in forage production and nutritional quality of Mexican native *L. leucocephala*.

Materials and methods

Experimental details

The field data for the development of the research were obtained from the areas in Tepalcingo, Morelos and Tantoyuca, Veracruz, where plots of *Leucaena* from different provenances were established (three randomly selected accessions for each of the provenances: Colima, Cunningham, Morelos, Nuevo León and Veracruz). The accessions in each provenance were only the survivors during the six-month nursery stage after choosing them every ten based on the order adopted in the elaborated database of a total of 149 collection sites; with the exception of Cuhnningham, three out of a total of four accessions collected were selected.

Tepalcingo is located at 18° 31' 18.5" N and 98° 56' 25.2" O and 1,179 masl, the climate is semi-warm subhumid with rains in summer, annual rainfall of 879 mm and average temperature of 21.8 °C. The Tantoyuca area is located at 21° 19' 56.3" N and 98° 13' 22.3" O and 136 masl, the climate is warm subhumid with rains in summer, annual rainfall of 1,228 mm and average temperature of 23.9 °C (Garcia, 2005). Both sites have vertisol soil, according to the classification of the FAO/UNESCO 2010 system (IUSS Working Group WRB, 2010) obtained from the national continuum at 1: 1,000,000 scale of INEGI. The soil in Morelos has a sandy-loam texture, with a pH of 6.3, EC of 0.04 dSm⁻¹, presented an organic matter content (OM) of 1.8%, with 15.8 mg kg⁻¹ of usable N and 3.7 mg kg⁻¹ of assimilable P; while, Tantoyuca has a clay-textured soil, with a pH of 7.2, EC of 0.18 dSm⁻¹, 4.2% OM, with 12.5 mg kg⁻¹ of usable N and 4.3 mg kg⁻¹ of assimilable P. The cultivation, in both cases, was developed with the fertility of each soil in temporary conditions, which is how the producer uses it to reduce production costs.

Treatments and experimental design

Each experimental plot was established with 16 *Leucaena* plants per accession, the accessions and the total number of plants per planting site were 11 and 176, and 14 and 224, for Tepalcingo and Tantoyuca, respectively; in both places, the distances between rows and plants were 3 and 2 m. The establishment was made by transplanting plants developed for six months in a nursery at the Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Once in the field, the plants were protected against cutting or grazing, six months after the

transplant they were pruned at 50 cm high. From that moment the foliar area (FA) was monitored with integrator (LI-3100 Area Meter, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) until the maximum accumulation that was used as a criterion to determine the moment of the harvest of each accession, according to the technique used by Vite et al. (2020). The experiment was established in a randomized block design with three accessions per block. At the end of the experiment, Colima, Cunningham and Morelos provenances in the Morelos plantation only had two replicas because of an infestation by a stem miner that caused the total loss of plants in the plots. Accession was used as blocking criteria.

The cumulative monthly average temperature and precipitation from March 2018 to February 2019 were obtained from the National Meteorological Service (CONAGUA). For Tantoyuca, it was considered as a rainy season from March to September 2018, and drought from August 2018 to February 2019; for Tepalcingo, these stations were from February to August 2018 and from September 2018 to February 2019, respectively. The overlap in the beginning and end of the growing seasons for both planting sites is due to the different growth cycles shown by the different provenances of the *Leucaenas*.

Variables measured or calculated

During the harvest of edible fodder, the frequency of harvest (FH) in days was estimated, FA in $\text{cm}^2 \text{ plant}^{-1}$, number of main regrowths (MR), plant density (PD, plants ha^{-1}) and survival (SV, %), the latter depending on the ratio of live plants at the time of sampling on the total sown plants. The regrowth height (RH, cm) was obtained with a tape measure, from the root crown to the apical bud, and stem diameter (SD, mm) was measured with a digital Vernier caliper (AutoTEC™, China), 5 cm away from the root crown to the apex.

The edible foliage sample under study came from a sample composed of leaves plus stems with a $3,0 \pm 0,3$ mm diameter, using the technique of simulated grazing, considering the behavior of grazing cattle, made in four plants of each plot during the growing seasons. The samples were transferred in a thermos flask to the Forage Laboratory of UACH, where it was dried until constant weight in a forced air oven at 55 °C. A subsample was milled in a Wiley® 4 mill (Arthur H. Thomas, Philadelphia, PA, USA) with a 1 mm mesh and processed in the Livestock Microbiology Laboratory of UACH. Forage yield (FY, kg ha^{-1} DM) was obtained from the average of the dry matter (DM) of edible forage samples multiplied by the PD. The measurement of fermentable fractions was based on the *in vitro* technique of gas production (Bhatta et al., 2007; Theodorou et al., 1994), from which the total gas (TGP, mL kg^{-1} of substrate), and carbon dioxide (CO_2P , %) and CH_4 plus minor gases (CH_4P , %) productions were obtained, these last two variables from TGP. The procedure consisted in connecting a hypodermic needle to a digital pressure transducer that is manually inserted through the rubber stopper of the known volume bottle to measure and release the accumulated gas pressure during 6, 12, 18 and 24 h (Theodorou et al., 1994). The fermentation pattern values at 4, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42, 48, 60 and 72 h were obtained with the gas production technique of Theodorou et al. (1994), for which a nanometer with a scale of 0-1 kg was used that yielded pressure volumes in kg

cm⁻². With these volumes, the fermentable fractions were generated: fast (FF), medium (MF) and slow (SF), which were expressed in mL g⁻¹ incubated DM (iDM). The gas production kinetics variables: maximum volume of gas produced (Vmax, mL g⁻¹ iDM), Lag phase or time to microbial colonization or establishment (L, h) and gas production rate (S, mL h⁻¹) were obtained using a logistic model (Gompertz) in the NLMIXED procedure (SAS® 9.4, SAS Inst. Inc., Cary, NC., USA). The *in vitro* digestibility of the DM to 24 and 72 h (IVDDM24 and IVDDM72, %), and organic matter (OM) to 24 and 72 h (IVDOM24 and IVDOM72, %) were obtained by the technique of Tilley and Terry (1963).

Neutral detergent fiber (NDF, %), acid detergent fiber (ADF, %), lignin acid detergent (LIG, %) and silica (SIL, %) were sequentially determined via the filter bag technology described by Ferreira and Mertens (2007) in an ANKOM²⁰⁰ Fiber Analyzer (ANKOM Technology Corporation, Fairport, NY, USA). The bromatological analysis was carried out with the Official Methods of the AOAC (2005), which consisted of the determinations of OM and total ashes with 942.05, DM and moisture with 934.01, crude protein (CP) with 954.01 and ethereal extract (EE) with 920.39B methods. Metabolizable energy (ME) content was estimate according to the equation proposed for forage legumes by McLeod and Minson (1976): ME (Mcal kg⁻¹ DM) = 3.6 × [92.3 - 0.91 × %ADF]. The concentrations of Cu, Fe, Zn, Ca, Mg, Na and K in edible foliage samples were determined by the technique of atomic absorption spectrophotometry (Perkin Elmer Analyst 700 spectrophotometer) according to procedures Perkin-Elmer (1996). The content of phosphorus (P) was determined by the colorimetric method (Fick et al., 1979; Clesceri et al., 1992) using spectrometer light brand (Perkin Elmer U.V.-VIS Lambda 2). These analyses were carried out in duplicate at the Laboratory of Ruminant Nutrition of the Animal Production Graduate of UACH, Mexico.

Statistical procedures

Analysis of variance regarding all variables under study were carried out using a mixed model that included the fixed effects of accession as a block, growing season (G), growing site (S), provenance (P) and their double and triple interactions between main effects (G×S, G×P, S×P and G×S×P), and the random effects of accession nested at G, and accession nested at G and S, with the MIXED procedure. When necessary, the means of the variables were estimated and compared with the Tukey test using the LSMEANS instruction. All statistical procedures were performed with SAS (SAS® 9.4, SAS Inst. Inc., Cary, NC., USA).

Results

Agronomic performance

The agronomic performance was affected by growing season (p<0.09), growing site (p<0.04) and provenance factors (p<0.06), and G×S (p<0.09), S×P (p<0.07) and G×S×P (p<0.08) interactions (Table 1). The drought harvest was 116 days earlier than in the rainy

season, due to increased intercepted radiation, moisture availability and leaf area as described by Vite et al. (2020). This finding is also attributed to a 71% higher production in the number of main regrowths during drought than in rainy season. The harvest in the Veracruz plantation was 18 days earlier than in Morelos, with FA, RH, PD, FY and SV higher in 5.8, 0.4, 4.4, 36.7 and 3.6 times more than Veracruz. Cunningham variety showed regrowth height and stem diameter over 84 and 82%, compared to Nuevo León, while the other provenances had intermediate performance in both agronomic variables. The harvest in Veracruz occurred 30 days earlier than in Morelos during the drought, while in the rainy season both planting sites were ready for harvest at the same time.

Table 1. Agronomic performance of *Leucaena leucocephala* plantation in response to different environmental factors.

Factor	FH	FA	SD	RH	MR	PD	FY	SV
Growing season (G)								
Rainy	217 ^a	4706	14	114	3.8 ^b	846	36	59
Drought	101 ^b	8989	19	103	6.5 ^a	832	80	57
SEM	5	1679	1.6	9	0.5	88	18	3
Growing site (S)								
Morelos	168 ^a	1762 ^b	18	90 ^b	4.7	263 ^b	3 ^b	21 ^b
Veracruz	150 ^b	11933 ^a	16	127 ^a	5.6	1415 ^a	113 ^a	96 ^a
SEM	4	1665	1.6	8	0.5	87	18	3
Provenance (P)								
Colima	159	8083	19 ^{ab}	120 ^{ab}	5.1	868	66	60
Cunningham	159	11437	20 ^a	136 ^a	5.9	1007	111	62
Morelos	158	6983	20 ^{ab}	117 ^{ab}	5.3	735	49	60
Nuevo León	158	3819	11 ^b	74 ^c	4.9	594	34	53
Veracruz	159	3916	14 ^{ab}	93 ^{bc}	4.7	991	30	57
SEM	4	2658	2.2	13	0.7	139	29	4
p-value								
G	<0.01	0.21	0.16	0.46	0.06	0.92	0.23	0.80
S	0.02	0.01	0.45	0.04	0.24	<0.01	0.01	<0.01
P	0.98	0.24	0.06	0.04	0.77	0.26	0.23	0.59
G×S	0.07	0.09	0.55	0.43	0.19	0.99	0.14	0.96
G×P	0.18	0.90	0.88	0.87	0.27	0.99	0.95	0.99
S×P	0.99	0.07	0.37	0.15	0.67	0.74	0.13	0.32
G×S×P	0.08	0.86	0.97	0.81	0.63	0.99	0.94	0.98

^{abc} Different letters in the same column for each factor are significantly different ($P < 0.05$; Tukey). SEM = standard error of the mean. FH = frequency of harvest (days), FA = foliar area ($\text{cm}^2 \text{ plant}^{-1}$), SD = stem diameter (mm), RH = regrowth height (cm), MR = number of main regrowths (n), PD = plant density (plants ha^{-1}), FY = Forage yield (kg ha^{-1} of dry matter) and SV = survival (%).

The Morelos plantation was harvested 30 days earlier compared to Veracruz plantation during the rainy season. The Morelos and Nuevo León provenances grown in Morelos during the rainy season were harvested 41 days earlier compared to Morelos grown in Veracruz during the same growing season (235 vs. 194 days). The foliar area in the drought of the Veracruz plantation was eight times higher than the drought and rainy seasons in Morelos (16,659 vs. 1,762 cm²); this same variable for the Cunningham provenance was four times higher compared to Nuevo León in the Veracruz plantation (21,440 vs. 4,135 cm²).

Methane production and digestibility

The *in vitro* methane production and digestibility during 24 h fermentation of *Leucaena* edible foliage were affected by growing season ($p < 0.02$), growing site ($p < 0.02$) and provenance ($p < 0.04$) factors, and G×S ($p < 0.02$), G×P ($p < 0.09$) and S×P ($p < 0.09$) interactions (Table 2). Forage harvested during the rainy season produced 41% more CH₄ and 8.4% less CO₂ than in drought. The forage harvested in Morelos produced 16% more CH₄, although with 20 and 4% less TGP and CO₂ than in Veracruz, respectively. Morelos provenance produced 5% more CO₂ than Nuevo León.

There was a high variability of the total gas production between the growing season and the growing sites interaction, Morelos plantation stood out with the highest and Veracruz plantation stood out with the lowest gas production during the 24 h incubation of the DM (103 vs 73 mL kg⁻¹ of substrate), both in the rainy season. The Nuevo León provenance produced more TGP during the rainy season (103 mL kg⁻¹ of substrate), compared to Colima and Veracruz at the same time (83 mL kg⁻¹ of substrate), and Colima and Morelos (83 mL kg⁻¹ of substrate) in drought that showed the lowest TGP.

Morelos provenance in Veracruz plantation stood out with the lowest CO₂ production than the other provenances (75 vs. 79%).

Colima, Cunningham and Nuevo León provenances during the drought season stood out with the lowest CH₄ emissions (16%), while Colima provenance during the rainy season stood out with the highest CH₄ emissions (27%). All provenances grown in Morelos and Nuevo León grown in Veracruz stood out with the lowest CH₄ emissions (19%), while Morelos provenance grown in Veracruz plantation stood out with the highest CH₄ emissions (25%). Colima in drought and Nuevo León in rainy season grown in Morelos, and Colima and Nuevo León provenances grown in Veracruz showed the lowest CH₄ emissions (Figures 1c and 1d).

Table 2. *In vitro* methane production and digestibility during 24 h of fermentation of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples in response to different environmental factors.

Factor	Fermentable fractions			Digestibility	
	TGP	CO ₂ P	CH ₄ P	IVDDM24	IVDOM24
Growing season (G)					
Rainy	88	76 ^b	24 ^a	37	39
Drought	88	83 ^a	17 ^b	38	41
SEM	2.1	0.7	0.6	0.9	0.9
Growing site (S)					
Morelos	96 ^a	81 ^a	19 ^b	38	40
Veracruz	80 ^b	78 ^b	22 ^a	36	40
SEM	2.1	0.6	0.5	0.8	0.9
Provenance (P)					
Colima	82	79 ^{ab}	21	36	40
Cunningham	88	80 ^{ab}	20	37	40
Morelos	85	77 ^b	22	35	40
Nuevo León	93	81 ^a	19	37	40
Veracruz	91	79 ^{ab}	21	38	40
SEM	3.4	0.9	0.8	1.1	1.0
p-value					
G	0.89	0.02	0.01	0.11	0.20
S	0.01	0.02	0.01	0.15	0.62
P	0.15	0.04	0.13	0.33	0.98
G×S	0.02	0.23	0.32	0.56	0.98
G×P	0.06	0.09	0.09	0.12	0.45
S×P	0.36	0.34	0.09	0.19	0.86
G×S×P	0.58	0.59	0.54	0.69	0.67

^{ab} Different letters in the same column for each factor are significantly different ($P < 0.05$; Tukey). SEM = standard error of the mean. TGP = total gas production (mL kg⁻¹ of substrate), CO₂P = carbon dioxide production (%), CH₄P = methane plus minor gases production (%), IVDDM24 = *in vitro* digestibility of the dry matter to 24 h (%) and IVDOM24 = *in vitro* digestibility of organic matter to 24 h (%).

The methane produced with the forage harvested for all provenances in the rainy season was always superior to the drought (Figures 1a y 1b), and that produced in the Veracruz plantation was always superior to Morelos (Figures 1c y 1d), through the 24 hours of incubation, which was explained with a simple linear regression in all cases. Slopes of the straight lines indicated that methane production rates were 0.97 to 1.21 and 0.63 to 0.74% per hour of incubation of one gram of DM for the rainy and dry seasons, and 0.93-1.13 and 0.71 to 0.92% for the Veracruz and Morelos plantations, respectively.

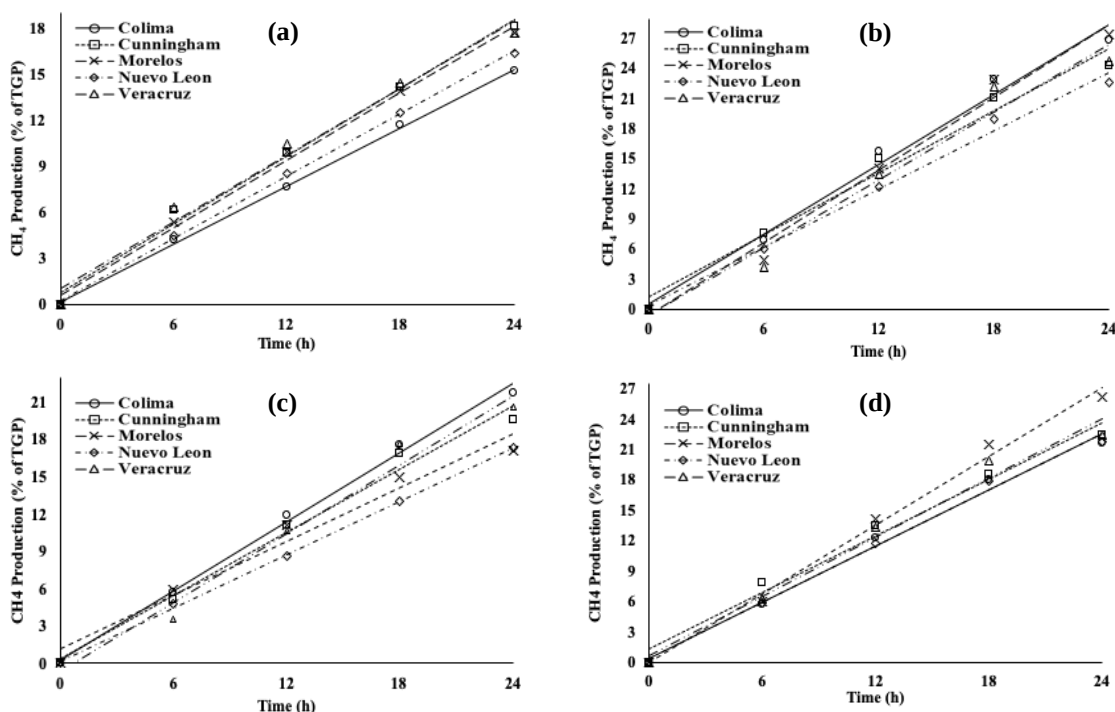


Figure 1. Methane produced during 24 h of fermented dry matter of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples in response to different growing season [(a): Drought and (b): Rainy], and growing site [(c): Morelos and (d): Veracruz].

Fermentative quality and *in vitro* digestibility

Fermentative quality and *in vitro* digestibility during 72 h fermentation of *Leucaena* edible foliage were affected by growing season ($p < 0.07$), growing site ($p < 0.04$) and provenance ($p < 0.04$) factors, and $G \times S$ ($p < 0.05$), $G \times P$ ($p < 0.05$), $S \times P$ ($p < 0.08$) and $G \times S \times P$ ($p < 0.09$) interactions (Table 3).

During the rainy season, the time to microbial colonization was achieved 1.1 h later, with the rapid fermentable fraction and digestibility of the OM at 72 h of fermentation (IVDOM72) of 42 and 32% higher, respectively, although with a medium fermentable fraction 11% lower, compared to drought. In Morelos plantation, the time to microbial colonization was achieved half an hour later, with digestibility of the OM 8.5% higher, compared to Veracruz. Morelos provenance exceeded the gas production rate by 12% to the average of Colima, Cunningham and Veracruz. Morelos achieved the time to bacterial colonization 0.6 h earlier and exceeded the rapidly fermentable fraction by 20% than the average of Colima and Cunningham. Morelos exceeded by 10 and 27% the average digestibility of the DM and slower fermentable fraction than Nuevo León and Veracruz.

Morelos provenance during the rainy season stood out with the highest gas production rate compared than the other provenances (0.038 vs. 0.032 mL h⁻¹). Morelos provenance grown in Morelos stood out with the highest gas production rate compared than the other provenances (0.037 vs. 0.032 mL h⁻¹) grown in Morelos and Veracruz. Morelos provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the highest gas production rate compared than the other provenances in the different growing seasons and sites (0.044 vs. 0.032 mL h⁻¹).

Veracruz plantation during the rainy season stood out with the highest time to bacterial colonization compared to the rest of the G×S interaction (5.8 vs. 4.2 h). Nuevo León provenance during the rainy season stood out with the highest time to bacterial colonization (5.7 h), and Morelos and Nuevo León provenances stood out with the lowest time to bacterial colonization (3.7 h). Colima, Cunningham and Nuevo León provenances grown in Veracruz stood out with the highest time to bacterial colonization (5.0 h), while Morelos (3.7 h) and Nuevo León (4.0 h) provenances grown in Morelos stood out with the lowest time to bacterial colonization. Cunningham and Nuevo León provenances grown in Veracruz during the rainy season stood out with the highest time to bacterial colonization (6.0 h), and Nuevo León provenance grown in Morelos (3.3 h) and Veracruz grown in Veracruz (2.7 h) stood out with the lowest time to bacterial colonization, both during the drought season.

Morelos plantation during the rainy and drought seasons stood out with the highest and lowest fast fermentable fraction (55 and 29 mL g⁻¹ iDM, respectively). Morelos provenance during the rainy season stood out with the highest fast fermentable fraction (57 mL g⁻¹ iDM), while Cunningham provenance during the drought season stood out with the lowest fast fermentable fraction (30 mL g⁻¹ iDM). Morelos provenance grown in Morelos stood out with the highest fast fermentable fraction than the others provenances grown in Morelos and Veracruz (50 vs. 39 mL g⁻¹ iDM). Morelos (73 mL g⁻¹ iDM) and Nuevo León (54 mL g⁻¹ iDM) provenances grown in Morelos during the rainy season stood out with the highest fast fermentable fraction, while Colima, Cunningham and Morelos provenances grown in Morelos during the drought season stood out with the lowest fast fermentable fraction.

Veracruz plantation during the drought and rainy season stood out with the highest and lowest medium fermentable fraction (74 and 62 mL g⁻¹ iDM, respectively). Veracruz provenance during the drought and rainy seasons stood out with the highest and lowest medium fermentable fraction (80 and 58 mL g⁻¹ iDM, respectively). Veracruz provenance grown in Veracruz during the drought and rainy seasons stood out with the highest and lowest medium fermentable fraction (80 and 55 mL g⁻¹ iDM, respectively).

Nuevo León provenance during the rainy season stood out with the highest slow fermentable fraction (102 mL g⁻¹ iDM), while Colima, Morelos and Veracruz during the rainy season and Colima, Cunningham, Morelos and Nuevo León during the drought season stood out with the lowest slow fermentable fraction (72 mL g⁻¹ iDM). Nuevo León

provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the highest slow fermentable fraction (109 mL g⁻¹ iDM). Morelos provenance grown in Morelos during the rainy season, and Colima, Morelos and Nuevo León provenances grown in Morelos during the drought season, and Colima, Cunningham, Morelos and Veracruz grown in Veracruz during the rainy season, and Colima, Cunningham, Morelos and Nuevo León grown in Veracruz during the drought season stood out with the lowest slow fermentable fraction (69 mL g⁻¹ iDM).

Table 3. Fermentative quality and *in vitro* digestibility during 72 h of fermentation of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples in response to different environmental factors.

Factor	Fermentation kinetics			Fermentable fractions (mL g ⁻¹ iDM)			Digestibility (%)	
	Vmax (mL g ⁻¹ iDM)	S (mL h ⁻¹)	L (h)	FF	MF	SF	IVDDM72	IVDOM72
Growing season (G)								
Rainy	173	0.033	5.1 ^a	47 ^a	64 ^b	83	52	70 ^a
Drought	161	0.031	4.0 ^b	33 ^b	71 ^a	72	49	53 ^b
SEM	7.0	0.001	0.1	1.0	1.2	3.3	1.1	1.5
Growing site (S)								
Morelos	165	0.032	4.3 ^b	42	67	80	50	64 ^a
Veracruz	169	0.032	4.8 ^a	39	68	75	51	59 ^b
SEM	6.5	0.001	0.1	1.0	1.2	2.9	1.1	1.2
Provenance (P)								
Colima	165	0.032 ^b	4.8 ^a	37 ^b	65	76 ^{ab}	52 ^{ab}	60
Cunningham	172	0.031 ^b	4.9 ^a	38 ^b	67	79 ^{ab}	49 ^{abc}	61
Morelos	159	0.035 ^a	4.2 ^b	45 ^a	66	66 ^b	53 ^a	59
Nuevo León	166	0.033 ^{ab}	4.6 ^{ab}	41 ^{ab}	70	84 ^a	49 ^{bc}	64
Veracruz	174	0.031 ^b	4.5 ^{ab}	41 ^{ab}	69	83 ^a	48 ^c	63
SEM	7.8	0.001	0.1	1.7	2.0	4.0	1.4	1.7
p-value								
G	0.37	0.10	0.01	0.01	0.07	0.14	0.18	0.01
S	0.72	0.73	0.03	0.17	0.81	0.31	0.48	0.04
P	0.60	<0.01	0.01	0.01	0.24	<0.01	0.04	0.22
G×S	0.33	0.23	<0.01	<0.01	0.05	0.51	0.89	0.10
G×P	0.12	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05
S×P	0.62	<0.01	0.01	0.01	0.56	0.11	0.28	0.77
G×S×P	0.15	<0.01	<0.01	0.02	0.09	0.08	0.17	0.59

^{abc} Different letters in the same column for each factor are significantly different (P < 0.05; Tukey). SEM = standard error of the mean. Vmax = maximum volume of gas produced (mL g⁻¹ iDM), L = Lag phase or time to microbial colonization or establishment (h), S = gas production rate (mL h⁻¹), FF = fast fermentable fraction (mL g⁻¹ iDM), MF = medium fermentable fraction (mL g⁻¹ iDM), SF = slow fermentable fraction (mL g⁻¹ iDM), IVDDM72 = *in vitro* digestibility of the dry matter to 72 h (%) and IVDOM72 = *in vitro* digestibility of organic matter to 72 h (%).

Colima, Morelos and Veracruz provenances during the rainy season stood out with the highest IVDDM72 (54%), while Nuevo León provenance during the rainy season and Veracruz provenance during the drought season stood out with the lowest IVDDM72 (44%).

Nuevo León provenance during the rainy season stood out with the highest IVDOM72 (76%), while Colima, Cunningham, Morelos and Nuevo León during the drought season stood out with the lowest IVDOM72 (51%).

The variables S, L, FF, SF, IVDDM72, and IVDOM72 were represented with the modeled curves of total gas production between the growing seasons and the sources of the genetic material, only Colima in the rainy season (Figure 2b) and Nuevo León during the drought (Figure 2c) excelled with the highest gas production during the 72 h of DM incubation. During the rainy season, the digestibility of DM and OM of the provenances was 12 and 33% higher than in the drought. However, the IVDDM72 for Nuevo León during the rainy season was 16% lower than in drought.

The variables S, L, FF, and IVDDM72 were represented with the modeled curves of total gas production between the growing sites and the provenances of the genetic material. The Cunningham, Morelos and Nuevo León provenances had the highest gas production during the 72 h of incubation of the DM, and Veracruz with the lowest production in the Morelos plantation (Figure 2d). Contrary to what was observed for the Veracruz plantation, in which Morelos showed the highest gas production and Cunningham, Morelos and Nuevo León, the smaller one (Figure 2e). While, Colima showed an intermediate performance in both plantations. The digestibility of DM of the Cunningham and Veracruz provenances in the Morelos plantation was lowest than other S×P interaction.

The Morelos and Nuevo León provenances cultivated in Morelos during the rainy season stood out for their higher gas production rate, exceeding by 40% the average of the Cunningham and Veracruz provenances grown in Morelos during the drought (0.040 vs. 0.028 mL h⁻¹). The time to microbial colonization for Nuevo León cultivated in Morelos during the drought was achieved 3.4 h earlier than for Nuevo León cultivated in Veracruz during the rainy season (2.7 vs. 6.1 h). The fast fermentable fraction for the origin of Morelos cultivated in Morelos during the rainy season was 1.8 times higher than the average of the Colima, Cunningham and Morelos provenances grown in Morelos during the drought (73 vs. 26 mL g⁻¹ iDM). The medium fermentable fraction was higher for the Veracruz provenance grown in Veracruz during the drought compared to the Colima provenance grown in Morelos in drought, Cunningham and Veracruz provenances grown

in Morelos during the rainy season, Colima and Morelos provenances grown in Veracruz in the drought, and Veracruz provenance cultivated in Veracruz during the rainy season.

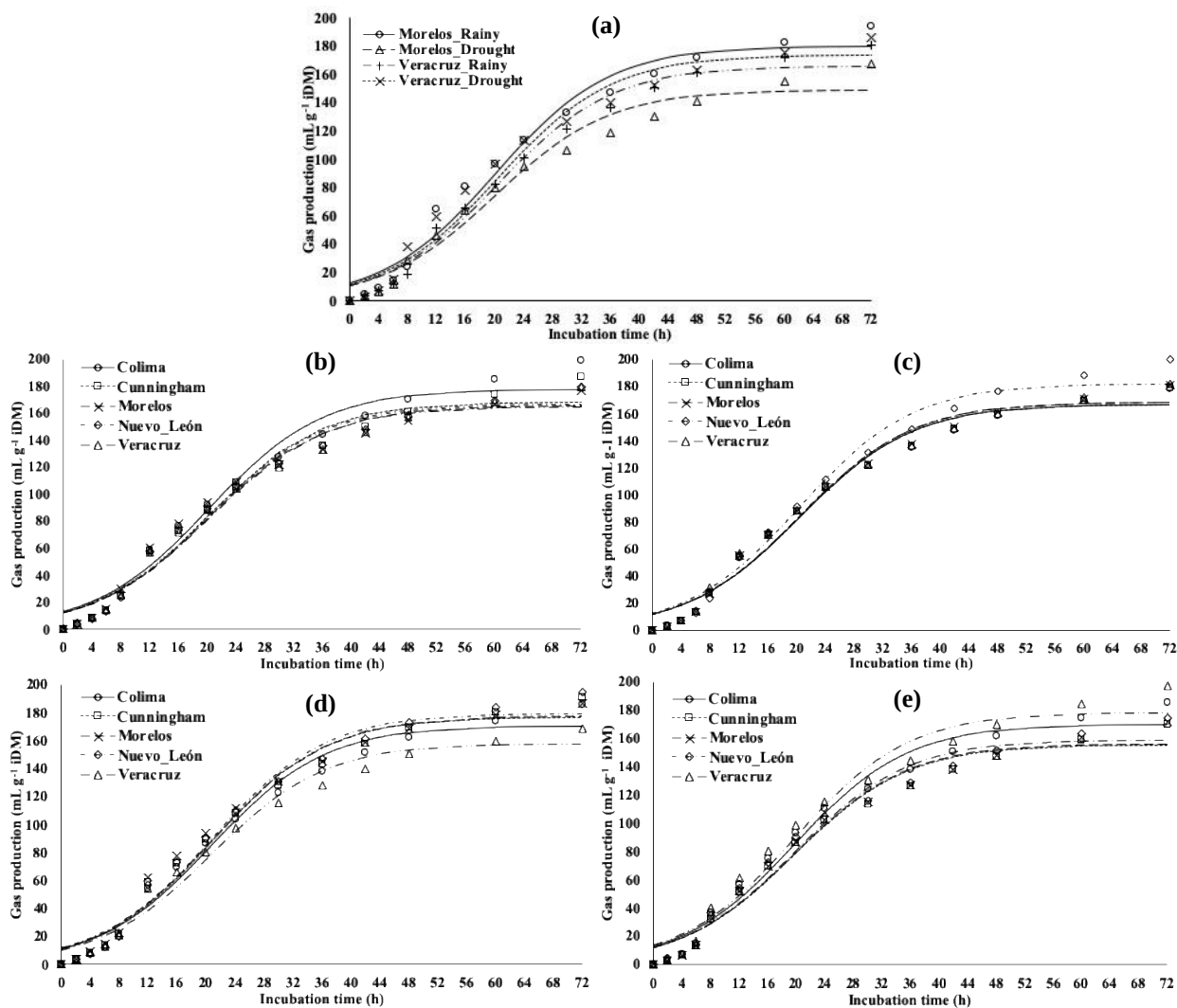


Figure 2. Effect of Growing season x Growing site (a), Growing season (b, rainy; c, drought) x Provenance, and Growing site (d, Morelos; e, Veracruz) x Provenance interactions on patterned curves of the *in vitro* total volume of gas produced of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples during 72 h of fermentation.

Chemical composition and metabolizable energy

Chemical composition and metabolizable energy were affected by growing season ($p < 0.09$), growing site ($p < 0.06$) and provenance ($p < 0.08$) factors, and by G×S ($p < 0.02$), G×P ($p < 0.02$) and G×S×P ($p < 0.07$) interactions (Table 4).

The contents of OM, EE, NDF and LIG were 1, 89, 21 and 65% higher in the rainy season, while DM, CP and ME were 1, 59 and 4% higher during the drought. The DM, CP, EE and NDF contents were 1, 3, 84 and 21% higher in the forage harvested in Veracruz, while OM was 3% higher in Morelos. The average of the protein content of the forage for Colima, Cunningham and Morelos provenances was 8.2% higher than that of Nuevo León and Veracruz. The EE content for the forage of Morelos provenance was 12% higher than the average of Cunningham and Veracruz, and 34% higher than that of Colima and Nuevo León provenances. The average of the energy content of the forage for Nuevo León and Veracruz was 4.8% higher than that of Colima and Morelos provenances, contrary to that observed for ADF of Colima and Morelos, which was 21% higher than the average of Nuevo León and Veracruz. The Nuevo León provenance showed a lignin content 24% lower than the average of the rest of the provenances.

The DM content for Veracruz during the drought season was 2.7% higher than the average content between the rest of the G×S interaction (95 vs. 93%), while OM content for Veracruz during the drought was 6.4% lower than the average content between the rest of the G×S interaction (84 vs. 89%).

Veracruz plantation during the drought season stood out with the highest CP (28.2%), while Morelos (13.3%) and Veracruz (20.7%) plantation both during the rainy season stood out with the lowest CP. Colima provenance was 21% CP higher than Nuevo León provenance both during the drought season (30.0 vs. 24.8%), and both provenances stood out with the highest CP than the average content among the all provenances during the rainy season (17%).

The EE for Veracruz plantation during the rainy season was 1.4 times higher than the average content among the rest of the G×S interaction (4.9 vs. 2.0%). Morelos provenance was 84% EE higher than Nuevo León provenance both during the rainy season (4.7 vs. 2.5%), and both provenances stood out with the highest EE than the average content among the all provenances during the drought season (1.9%).

Cunningham provenance grown in Morelos plantation during the drought season had 15% higher ME than Colima and Cunningham provenances grown in Veracruz plantation during the rainy season (2.85 vs. 2.47 Mcal kg⁻¹ DM).

Cunningham provenance grown in Morelos during the drought season stood out with the lowest ADF than the average content among the all provenances during the all growing seasons and plantation sites (14.5 vs. 20.2%).

In silica there was no difference ($p < 0.10$) in any of the single, double or triple combinations.

Table 4. Chemical composition (%) and metabolizable energy content (Mcal kg⁻¹ DM) of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples in response to different environmental factors.

Factor	DM	OM	CP	EE	ME	NDF	ADF	LIG	SIL
Growing season (G)									
Rainy	93 ^b	88 ^a	17 ^b	3.6 ^a	2.62 ^b	41 ^a	21	11.7 ^a	0.54
Drought	94 ^a	87 ^b	27 ^a	1.9 ^b	2.72 ^a	34 ^b	19	7.1 ^b	0.28
SEM	0.2	0.4	0.9	0.1	0.02	1.0	0.7	0.5	0.07
Growing site (S)									
Morelos	93 ^b	89 ^a	19 ^b	1.9 ^b	2.70	34 ^b	19	8.8	0.30
Veracruz	94 ^a	86 ^b	25 ^a	3.5 ^a	2.64	41 ^a	21	9.9	0.52
SEM	0.2	0.4	0.7	0.1	0.02	1.0	0.7	0.5	0.07
Provenance (P)									
Colima	93	87	23 ^a	2.6 ^{bc}	2.61 ^b	39	21.8 ^a	10.5 ^a	0.41
Cunningham	94	87	22 ^a	2.9 ^{ab}	2.66 ^{ab}	38	20.4 ^{abc}	9.3 ^a	0.46
Morelos	93	88	22 ^a	3.2 ^a	2.61 ^b	37	21.7 ^{ab}	10.8 ^a	0.43
Nuevo León	94	88	21 ^{ab}	2.1 ^c	2.74 ^a	37	17.6 ^c	7.9 ^b	0.34
Veracruz	93	87	21 ^b	2.8 ^{ab}	2.73 ^a	36	18.2 ^{bc}	8.5 ^a	0.41
SEM	0.4	0.6	0.8	0.2	0.04	1.6	1.1	0.8	0.12
p-value									
G	<0.05	0.09	0.02	0.01	0.09	0.04	0.10	0.02	0.13
S	0.06	0.01	<0.01	<0.01	0.11	0.01	0.11	0.20	0.10
P	0.51	0.57	0.06	<0.01	0.04	0.87	0.04	0.08	0.97
G×S	0.01	<0.01	0.02	0.01	0.33	0.75	0.33	0.34	0.34
G×P	0.18	0.53	0.02	<0.01	0.33	0.71	0.33	0.30	0.52
S×P	0.29	0.30	0.12	0.37	0.17	0.16	0.17	0.20	0.85
G×S×P	0.26	0.97	0.53	0.72	0.07	0.35	0.05	0.13	0.99

^{abc} Different letters in the same column for each factor are significantly different ($P < 0.05$; Tukey). SEM = standard error of the mean. DM = dry matter (%), OM = organic matter (%), CP = crude protein (%), EE = ethereal extract (%), ME = metabolizable energy (Mcal kg⁻¹ DM), NDF = neutral detergent fiber (%), ADF = acid detergent fiber (%), LIG = lignin acid detergent (%) and SIL = silica (%).

Macro and trace elements

Macro and trace elements content were affected by growing season ($p < 0.07$), growing site ($p < 0.03$) and provenance ($p < 0.04$) factors, and the G×S ($p < 0.07$), G×P ($p < 0.09$), S×P ($p < 0.02$) and G×S×P ($p < 0.05$) interactions (Table 5).

The concentrations of Ca, P, Mg, K, Cu, Fe and Zn were 0.21, 1.75, 0.29, 0.45, 2.93, 1.27 and 1.44 times higher during the drought, contrary to what was observed for the Ca:P ratio that was 1.08 times higher in the rainy than drought season. The concentrations of K, Fe

and Zn were 45, 12 and 11% higher for Veracruz, contrary to what was observed for Mg, which was 82% lower for Morelos. The Ca content for Colima provenance was 21 and 13% higher than Nuevo León and Veracruz. Colima, Morelos and Nuevo León provenances had 40 and 19% higher average P content than Veracruz and Cunningham provenances. Colima, Cunningham and Morelos provenances had 52% higher average Na content than Nuevo León provenance. The average content for Fe of Morelos and Nuevo León provenances were 24% higher than Cunningham and Veracruz provenances. The average content for Zn of Morelos and Nuevo León provenances were 17% higher than Cunningham and Veracruz provenances.

Morelos provenance during the drought season and the grown in Morelos stood out with the highest Ca content (4.6 and 4.3%), while Nuevo León during the rainy season and the grown in Veracruz stood out with the lowest Ca content (2.9 and 3.0%). Morelos provenance grown in Morelos during the drought season stood out with the highest Ca content (5.3%), while Nuevo León provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the lowest Ca content (2.8%).

Morelos and Veracruz plantations during the drought season stood out with the highest P content (0.33%), while Morelos plantation (0.09%) and Veracruz plantation (0.15%) both during the rainy season stood out with the lowest P content. Colima, Morelos and Nuevo León provenances during the drought season stood out with the highest P content compared to Cunningham and Veracruz which excelled with lowest P content in the same growing season (0.37 vs. 0.27%), while all the provenances during the rainy season stood out with the lowest P content (0.12%). Colima and Morelos provenances grown in Morelos during the drought season, and Nuevo León provenance grown in Veracruz during the same growing season stood out with the highest P content (0.39%), while Veracruz provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the lowest P content (0.04%).

Nuevo León provenance grown in Veracruz stood out with the highest K content (1.7%), while Cunningham provenance grown in Morelos stood out with the lowest K content (1.0%).

Morelos and Veracruz plantation during the drought season stood out with the highest Na content (0.04%), while Veracruz plantation during the rainy season stood out with the lowest Na content (0.01%).

Morelos and Veracruz plantations during the rainy season stood out with the highest Ca:P ratio (27:1), while the same plantations during the drought season stood out with the lowest Ca:P ratio (13:1). Cunningham provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the highest Ca:P ratio (38:1), while Nuevo León grown in Veracruz during the drought season stood out with the lowest Ca:P ratio (7:1).

Morelos and Veracruz plantations during the drought stood out with the highest Cu content (17.3 ppm), while the same plantations during the rainy stood out with the lowest

Cu content (4.4 ppm). Morelos provenance grown in Morelos during the drought (21.1 ppm), and Morelos and Veracruz grown in Veracruz during the drought (14.0 ppm) stood out with the highest Cu content, while all provenances in both growing sites during rainy season stood out with the lowest Cu content (4.4 ppm).

Table 5. Macro (%) and trace (ppm) elements content of *Leucaena leucocephala* edible foliage samples in response to different environmental factors.

Factor	Macro element					Trace element			
	Ca	P	Mg	K	Na	Ca:P	Cu	Fe	Zn
Growing season (G)									
Rainy	3.3 ^b	0.12 ^b	0.62 ^b	1.1 ^b	0.02	27 ^a	4.4 ^b	63 ^b	16 ^b
Drought	4.0 ^a	0.33 ^a	0.80 ^a	1.6 ^a	0.04	13 ^b	17.3 ^a	143 ^a	39 ^a
SEM	0.1	0.01	0.04	0.05	0.003	1.2	0.4	2.6	0.6
Growing site (S)									
Morelos	3.7	0.22	0.91 ^a	1.1 ^b	0.03	22	10.5	97 ^b	26 ^b
Veracruz	3.6	0.23	0.50 ^b	1.6 ^a	0.03	18	11.5	109 ^a	29 ^a
SEM	0.1	0.01	0.04	0.05	0.003	1.2	0.4	2.6	0.6
Provenance (P)									
Colima	3.9 ^a	0.24 ^a	0.70	1.4	0.04 ^a	21	11.5	103 ^b	28 ^b
Cunningham	3.7 ^{ab}	0.21 ^b	0.65	1.3	0.03 ^a	22	11.0	91 ^c	25 ^c
Morelos	3.9 ^{ab}	0.26 ^a	0.73	1.4	0.03 ^a	19	10.9	118 ^a	30 ^a
Nuevo León	3.2 ^c	0.23 ^a	0.72	1.4	0.02 ^b	17	10.9	111 ^{ab}	29 ^{ab}
Veracruz	3.5 ^{bc}	0.18 ^c	0.71	1.3	0.03 ^{ab}	22	9.9	92 ^c	25 ^c
SEM	0.2	0.01	0.05	0.06	0.004	1.8	0.5	3.5	0.7
p-value									
G	0.05	<0.01	0.07	0.03	0.13	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
S	0.77	0.42	<0.01	<0.01	0.50	0.13	0.33	0.03	0.03
P	<0.01	<0.01	0.70	0.69	0.04	0.23	0.31	<0.01	<0.01
G×S	0.30	<0.01	0.25	0.22	0.19	0.04	0.04	0.02	0.09
G×P	0.07	<0.01	0.31	0.13	<0.01	0.76	0.43	<0.01	<0.01
S×P	<0.01	0.02	0.72	<0.01	0.65	0.70	0.29	<0.01	<0.01
G×S×P	<0.01	0.05	0.94	0.13	0.99	0.04	0.03	<0.01	0.41

^{abc} Different letters in the same column for each factor are significantly different (P < 0.05; Tukey). SEM = standard error of the mean.

Morelos (129 ppm) and Veracruz (157 ppm) plantations during the drought season stood out with the highest Fe content, while the same plantations during the rainy season stood out with the lowest Fe content (63 ppm). Morelos and Nuevo León provenances during the drought season stood out with the highest Fe content compared to Cunningham which excelled with lowest Fe content in the same growing season (163 vs. 121 ppm), while all the provenances during the rainy season stood out with the lowest Fe content (63 ppm). Morelos provenance grown in Morelos, and Colima, Morelos and Nuevo León grown in

Veracruz stood out with the highest Fe content (119 ppm), while Cunningham and Veracruz provenances grown in Veracruz, and Colima, Cunningham, Nuevo León and Veracruz grown in Morelos stood out with the lowest Fe content (92 ppm). Nuevo León provenance grown in Veracruz during the drought season stood out with the highest Fe content (192 ppm), while Colima provenance grown in Morelos during the rainy season stood out with the lowest Fe content (54 ppm).

Morelos and Veracruz plantations during the drought season stood out with the highest Zn content (39 ppm), while the same plantations during the rainy season stood out with the lowest Zn content (16 ppm). Colima, Morelos and Nuevo León provenances during the drought season stood out with the highest Zn content (43 ppm), followed by Cunningham and Veracruz provenances during the same growing season that had an intermediate performance (34 ppm), while all provenances in both growing sites during rainy season stood out with the lowest Zn content (16 ppm). Nuevo León provenance grown in Veracruz stood out with the highest Zn content (32 ppm), while Cunningham and Veracruz provenances grown in Morelos, and Veracruz grown in Veracruz stood out with the lowest Zn content (25 ppm).

Discussion

The seasonal variation in agronomic performance, *in vitro* methane production, fermentative quality, chemical composition and mineral element contents of *Leucaena leucocephala* edible foliage could be ascribed to the variations in seasonal precipitation and temperature in line with the reports from earlier studies (Radrizzani et al., 2016; López-Vigoa et al., 2019; Vite et al., 2020).

The decrease in the contents of MR, CO₂P, DM, CP, ME, MF and mineral elements in the forage harvested during the rainy season is in harmony with reports that the stage of maturity of the plant influenced the chemical composition and mineral elements of the *Leucaena* species (Akingbade et al., 2001; Radrizzani et al., 2016; López-Vigoa et al., 2019) and cultivars (González-García et al., 2009). The forage harvested in the rainy season had more than double maturity than in the drought harvest, which increased the contents of CH₄P, L, FF, IVDOM72, OM, EE, NDF, LIG, and Ca:P. The CP, NDF, EE, Ca and P (26, 29, 2.8, 1.5 and 0.23%) contents, obtained by Sierra et al. (2017) for edible fodder harvested with a frequency of 38 days, did not differ in the seasons of the year and were similar to those of the present study, except for Ca. In general, the mineral content of this study exceeded the concentrations reported by Sierra et al. (2017), but not for the case of Cu. Gaviria et al. (2015) reported contents of CP (28%), ADF (29%) and OM (92%) higher, ADF (33%) and Ca (1.23%) lower, as well as EE (2.95%) and P (0.24 %) similar to the present study. Worknesh and Getachew (2018) reported similar values to this study for CP (22%) and OM (86%).

Minerals are commonly found in low quantities in forages (Sierra et al., 2017), but in this study, sufficient amounts were contained in the forage that would cover a large proportion of the nutrients required by the ruminant (McDowell and Arthington, 2005; NRC, 2016). González-García et al. (2009) found differences between *L. leucocephala* cultivars and season (rainy and drought) of the year. The CNIA-250 cultivar exceeded by more than 12% in CP, NDF, and ADF to Cunningham; although CP was 6% higher in rainy than in drought, ADF was 7% higher in drought than in rainy, and NDF without effects of the season of the year. While, Cunningham cultivar exceeded by more than 8% in Ca and P to CNIA-250 and this same variable was at least 11% higher in the drought than in rainy.

The disappearance of the degraded substrate in terms of DM and OM is complementary information to the kinetics of gas production that helps to describe the fermentative quality of the edible forage of *Leucaena* (Naranjo et al., 2016). López-Vigoa et al. (2019) found no effect of the season of year for DM digestibility at 96 h in tropical climate, who obtained 65%, similar to that obtained in the present study (61%) at 72 h, values considered as optimal within the recommended range for *L. leucocephala* (46-65%; Barahona and Sánchez, 2005; Naranjo et al., 2016; Sierra et al. 2017; López-Vigoa et al., 2019), these authors also report optimal ranges of OM digestibility from 48 to 76%. The high values of ruminal degradability of the DM and OM indicate a high nutritional quality of the edible forage of *Leucaena*, a situation that allows the contribution of nutrients necessary for the functioning of the ruminal microorganisms (Preston and Leng, 1990).

The ME in this study was affected by the season of the year, contrary to the energy content observed by López-Vigoa et al. (2019) which was lower in drought than in rainy (1.7 vs. 1.9 Mcal kg⁻¹ DM), and similar to observed (2.0 vs. 2.1 Mcal kg⁻¹ DM) by González-García et al. (2009) at 60 days of regrowth; however, the values in the present study were higher than those of these authors and the 2.0 Mcal kg⁻¹ DM reported by Heuzé and Tran (2005), both estimated by *in vitro* gas production for edible biomass. The energy content of the edible forage in the present study was similar (2.64 Mcal kg⁻¹ DM) to that reported by Sierra et al. (2017) for successive harvests every 38 days and greater than 2.24 Mcal kg⁻¹ DM for *Leucaena* grown in Mexico (Peniche-González et al., 2014), both estimated from the gross energy content. ME in the present study were also higher than 2.36 (Gaviria et al., 2015) and 2.44 Mcal kg⁻¹ DM (Worknesh and Getachew, 2018), both estimated from the reported ADF.

The NDF (50%) and ADF (30%) contents obtained for edible fodder by López-Vigoa et al. (2019) were not affected by the season of the year, although these values, as well as those reported by Piñeiro-Vázquez et al. (2017) in a warm climate were higher (58 and 42%, respectively) than those obtained in this study. The NDF and ADF in this study were superior to those obtained by Naranjo et al. (2016) for the tropics of Colombia (32 and 27%), and Cuartas et al. (2014) that reported values of 42 and 32% for NDF and ADF, respectively. Worknesh and Getachew (2018) reported similar content in this study of

NDF (34%) and ADF (27%) in *Leucaena* harvested with a cutoff frequency of 45 days, as well as Sierra et al. (2017) that obtained values of 28 and 25%.

The higher LIG content in the rainy season was a consequence of a higher age of regrowths than in drought, coinciding with López-Vigoa et al. (2019) who reported the influence of the season of the year on this variable, with values of 12.9 vs. 10.0% that were slightly higher than in this study. The LIG values of our study were also lower than those reported by Worknesh and Getachew (2018) under the conditions described above (9.4 vs. 10.6%).

The reduction of the forage quality in the rainy season was due to favorable conditions for the further growth of fodder and increased the number of stems with a consequent increase in NDF (cellulose, hemicellulose, lignin and cutin), which are components of the cell wall (Muñoz-González et al., 2016).

There was no effect of the growing season on forage yield or other variables of the agronomic performance of the *Leucaena* crop (FA, SD, RH, PD and SV), which coincided with López-Vigoa et al. (2019) for the case of the fodder yield. However, Maya et al. (2005a) and Sánchez et al. (2005) concluded that the age of cut and the season of the year are part of the modeling factors in the production of DM. Maya et al. (2005a) in a warm climate and Sánchez et al. (2005) in a semi-arid climate, obtained six and eight times higher yields in the rainy and drought seasons, with a plant density five times higher and relief irrigation, compared in this study. López-Vigoa et al. (2019) achieved the same edible forage yield in a warm climate with a density of 533 plants ha⁻¹ than in this study. On the other hand, Sierra et al. (2017) concluded that *L. leucocephala* availability differed among grazing strips (82 to 939 kg DM·ha⁻¹) with density upper 10,000 plants ha⁻¹. Under this same plant density, Radrizzani et al. (2016) obtained the highest total DM yield in 8-year-old than with 38-year-old stands (978 vs. 2128 kg total DM ha⁻¹) during the higher rainfall season, this was associated with a decline in stem number per plant and *leucaena* plant density due to observed plant mortality, which was the case of Morelos plantation. González-García et al. (2009) only reported the advantage of Cunningham variety during the rainy season, exceeding 4.5 times the edible forage yield of the CNIA-250 variety (13.2 vs. 8.7 t DM ha⁻¹), while both cultivars produced an average of 2.0 t DM ha⁻¹ during drought.

The forage availability of native Mexican *Leucaena* during rainy and drought seasons coincided with the reports of Maya et al. (2005a) and Sánchez et al. (2005), who concluded that the diversity of genetic materials was available throughout the year. Furthermore, early reports of Sánchez et al. (2005) showed that CP content of edible fodder (leaves and stems smaller than 6 mm in diameter) at an early age of *Leucaena* species was greater than that of forage harvested at the older age of the plant (cuts at 60, 75, 90, 105 and 120 days), contrary to what was observed by Maya et al. (2005b), who observed that CP, EE, NDF, IVDDM and ME were stable at cutting ages from 28 to 42 days, although higher mineral content and ADF, and lower OM. Nyathi et al. (1995) in a semi-arid climate also found

no effect of the growing season or harvest frequency on DM yield, but they reported effect for P and gross fiber in successive cuts every four months.

The high response in foliar area accumulation, regrowth height, plant density, forage yield and survival in the Morelos plantation with respect to Veracruz was a reflection that all the provenances of *Leucaena* showed capacity to adapt better to low altitude conditions and high precipitation in a warm climate, that is the case of Veracruz. Maasdorp (1991) found no differences in DM yields of *Leucaena* cultivars harvested at summer and grown under high altitude (1475 m) and high annual rainfall (850 mm) conditions; contrary to what was observed by Nyathi et al. (1995) who reported variability between cultivars to adapt to conditions of low annual rainfall (600 mm) and medium altitude (1200 m) in a semi-arid climate. Plant mortality was observed in the Morelos plantation, where plant density had declined to low levels compared with Veracruz site; similar situation was observed by Radrizzani et al. (2016) in a 38-year-old *Leucaena* plantation. Despite the variability of the ME generated by the provenance of the genetic material, all provenances showed high energy content that would cover much of the requirements for grazing ruminants of SPS (Sierra et al., 2017). González-García et al. (2009) found differences between *L. leucocephala* cultivars and season (rainy and drought) of the year, CNIA-250 surpassed on average 8.5% the energy content of Cunningham (2.13 vs. 1.96 Mcal kg⁻¹ DM) at both seasons of the year.

Also, the chemical composition and the high mineral content of the forage for the Veracruz plantation during the drought is attributed to the greater wealth of the soil (Muñoz-González et al., 2016) and the regrowth after the rainy season harvest depended on previous season photosynthate reserves stored in plant tissues as a result of the optimum supply of nutrients to *Leucaena* plantation when there was good rainfall (Nyathi et al., 1995). The decline in mineral element contents of edible forage in Morelos plantation was perhaps in part, indicative of impairment of root development and function in response to cutting stress and non-return to the soil of harvested material, as was indicated by Nyathi et al. (1995). In addition, a wide variation in mineral content in soils for tropical regions has been reported (Pereira et al., 1997; Cabrera et al., 2009), with low levels of Cu and Zn and high levels of Fe that is reflected in the composition forage mineral that animals consume (Whitehead, 2000). Radrizzani et al. (2016), they concluded that nutrient deficiencies of P and S in leaf tissue were related to low initial soil fertility, coupled with inherent subsoil constraints (shallow soils, sodicity and high pH), and exacerbated by both long-term removal of nutrients by grazing animals and a reduction in soil P and S availability over time. The relatively low levels of CP and DM yield in the edible forage suggests that inoculation may be necessary for improved growth of *Leucaena* grown under Morelos climatic conditions. Thus, to maintain the productivity of *Leucaena* pastures, plant nutritional status needs to be monitored in order to determine strategic fertilizer application, according to Radrizzani et al. (2016).

The variation between the agronomic performance of the *Leucaena* plantation, methane production, fermentative quality at 72 h, chemical composition and mineral element contents of edible forage between provenances agrees with the reports of other studies (Nyathi et al., 1995) that these parameters vary considerably among species and between cultivars. In this case, Cunningham and Morelos provenances showed that they were quicker to recover from cutting stress, and they were less affected than the other provenances. The harvest each 4-months regrowth in semi-arid climate resulted in Hawaiian giant cultivar producing more than double the DM yield of Cunningham and five times that of Peru, but CP levels were higher in Cunningham and Hawaiian giant than in Peru (Nyathi et al., 1995).

The superiority of *Leucaena* over tropical grasses in the concentration of some minerals is another advantage of incorporating this species into SPS for cattle grazing (Martínez-Hernández et al., 2019). The concentrations of Ca, P, Mg, K, Na and Fe in *Leucaena* are sufficient to ensure the adequate productive performance of the ruminants in grazing SPS, although the forage presents an imbalance in the Ca:P ratio and deficiencies of Cu and Zn as recommended for optimal performance (McDowell and Arthington, 2005; NRC, 2016). These deficiencies partially coincide with McDowell (1985), who has highlighted that there are ample mineral deficiencies, imbalances and toxicities in tropical areas being the deficiencies of Cu and P the most limiting in livestock production. Radrizzani et al. (2016) coincide in the concentrations of P, K, Mg and Zn with our study, although they report lower Ca and Cu contents. Sánchez and Faria (2013) warn that one of the main limitations to the quality of *Leucaena* foliage of advanced maturity is that the Ca:P ratio can be up to 7:1, to avoid this situation the authors recommend that *Leucaena* foliage do not exceed an age of 126 days and levels of inclusion in the diet not exceed 40% dry basis (Martínez-Hernández et al., 2019).

The parameters of the fermentative quality evaluated at 72 h of incubation are characteristics that, of lesser magnitude, are associated with greater efficiency in the processes of forage fermentation (Gaviria et al., 2015; Naranjo et al., 2016). The lag phase or the time to the microbial establishment was lower, and the maximum gas productions were higher than the values reported by Naranjo et al. (2016) for *L. leucocephala* (7 h and 97 mL iDM⁻¹). The maximum gas production rates were also lower than those of these authors, indicating greater efficiency in fermentation as less gas is produced for each unit of fermented DM, which is associated with a higher production of propionate (Ngamsaeng et al., 2006); therefore, high gas production rates are attributed to the fermentation of the substrate to acetate and butyrate (Beever and Mold, 2000). The maximum gas production (156 mL), the time to microbial colonization (7.5 h) and the gas production rate (0.27 mL h⁻¹) reported by Gaviria et al. (2015) were the first similar, and the last superiors, respectively, compared in this study. Therefore, it could be said that low gas production rates are associated with greater fermentation efficiency and consequently with the formation of microbial protein, lower methane production and not with gas production that may be associated with energy losses or inefficiencies in fermentation (Gaviria et al.,

2015; Naranjo et al., 2016; Molina et al., 2016). The low values of gas production, the rate of fermentation and the degradability of the forage of *Leucaena* can be attributed to the high lignin contents (Fondevila et al., 2002) that cause potentially digestible structural polysaccharides to be less available to the access of the rumen microorganisms (Gaviria et al., 2015).

A factor that should receive increased attention with regards to methane emissions is the implementation of SPS based on *L. leucocephala*, which can reduce the percentage of gross energy lost in the form of methane per each additional kg in DM intake (Molina et al., 2016). The above, generally leads to increments in animal productivity due both to greater DM intake and to better balance of dietary nutrients (Molina et al., 2016). The linear trend obtained for methane production in this *in vitro* study was similar to that reported by Molina et al. (2016) when estimating the emission of CH₄ for 48 h from growing Lucerne heifers fed a diet that included 24% *Leucaena* dry base. The average of 20.5% for methane obtained at 24 h of incubation was higher than the value obtained *in situ* (8%) for 24 h of fermentation in sheep and cattle fed with 24 to 27% inclusion of *Leucaena* foliage in the diet (Molina et al., 2013; 2016) and similar to 20% methane for *Leucaena* foliage obtained at 24 h of incubation by Singh et al. (2012). In this study, the *in vitro* gas production technique allowed to determine the extent and degradation kinetics of the food through the volume of gas produced during the 24 h fermentation process, from which it was deduced that all provenances showed low gas volume ratio by the amount of degraded DM, high DM and OM digestibilities, which would generate a higher DM consumption in ruminants and a lower production of CH₄ in the rumen (Delgado et al., 2013; Molina et al., 2013), especially in medium to high altitude conditions and during drought growing seasons.

Estimation of the nutrient requirements for animals and their difference (balance) with available dietary nutrients is a good practice that can contribute to enhancing the reproductive and productive performance of livestock (Sierra et al., 2017). The results in this study demonstrate the importance of *L. leucocephala* in increasing the nutrient content of the diet offered to grazing ruminants, especially during the dry season, a condition in which legumes provide fodder in greater quantity and quality than grasses. The inclusion of this *Leucaena* edible forage in ruminant diets would imply increases in dietary CP and Ca contents, and reductions in NDF and ADF, accompanied by increased ruminal production of volatile fatty acids (propionic, butyric and acetic), supplying more energy to the ruminants (Saminathan et al., 2015). Besides greater energy intake, the presence of *Leucaena* in the diet often leads to increased diet digestibility, due to greater specific gravity that leads to a faster ruminal rate of passage as *L. leucocephala* has a low content of NDF (29%; Barahona et al., 2005).

This study suggested to Morelos as the provenance with the highest forage potential due to its early harvest, high fast fermentable fraction, and high Ca, Cu and P content, in the specific conditions of Morelos site, mainly during the rainy season. Other less promising

provenances were Colima, Cunningham, and Nuevo León to Morelos plantation, and Morelos, Veracruz, and Nuevo León to Veracruz plantation, in different growing season. The Veracruz site showed the best characteristics related to the maximum leaf area, and DM, CP, Na and Zn contents, mainly during the drought season. Cunningham provenance in Morelos plantation showed the best characteristics related to the maximum leaf area, and minimum CH₄ emissions, while Nuevo León provenance grown in Veracruz showed the best characteristics related to the minimum CH₄ emissions, and maximum K and Zn content. Colima and Nuevo León provenances during the drought season showed the best characteristics related to minimum CH₄ emissions, and maximum CP and Zn contents, while Morelos provenance during the rainy season showed the best characteristics related to maximum IVDDM72.

Conclusions

The Morelos provenance produced forage of higher nutritional quality during the two growing seasons and growing sites than the other provenances. The advantage was associated with its early harvest, high fast fermentable fraction, and high Ca, Cu and P content. However, all provenances of *Leucaena leucocephala* were appropriate and can be propagated at the two plantation sites to properly complement the potential diet, represented by grasses in monoculture and natural grasslands during the year.

References

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International. 18th ed. Gaithersburg, MD, USA.
- Barahona, R., Sánchez, S. 2005. Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. Rev. Corpoica 6(1), 69-82.
- Bhatta, R., Enishi, O., Kurihara, M. 2007. Measurement of methane production from ruminants. Asian-Australasian J. Anim. Sci. 20:1305-18. doi:10.5713/ajas.2007.1049
- Beever, D.E., Mould, F.L. 2000. Forage Evaluation for Efficient Ruminant Livestock Production. In: Forage Evaluation in Ruminant Nutrition. CABI Publishing. Wallingford, UK. p. 15-42.
- Cabrera, T.E.J., Sosa, R.E.E., Castellanos, R.A.F., Gutiérrez, B.A.O., Ramírez, S.J.H. 2009. Comparación de la concentración mineral en forrajes y suelos de zonas ganaderas del estado de Quintana Roo, México. Vet. Méx. 40, 167-179.
- Clesceri, S.L., Greenberg, E.A., Trusseli, R.R. 1992. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Ed. Díaz De Santos. España. 4-187 y 4-195 pp.
- Cuartas, C.C.A., Naranjo, R.J.F., Tarazona, M.A.M., Murgueitio, R.E., Chará, O.J.D., Ku Vera, J., Solorio, S.F.J., Flores, E.M.X., Solorio, S.B., Barahona, R.R. 2014. Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. Rev. Col. Cienc. Pecu. 27, 76-94.

- Delgado, D.C., Galindo, J., Cairo, J., Orta, I., Domínguez, M., Dorta, N. 2013. Suplementación con follaje de *L. leucocephala*. Su efecto en la digestibilidad aparente de nutrientes y producción de metano en ovinos. Rev. Cub. Cienc. Agr. 47(3), 267-271.
- Estrada, L.I.; Esparza, J.S.; Albarrán, P.B.; Yong, A.G.; Rayas, A.A.A., García M.A. 2018. Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. Cienc. Ergo-Sum 25(3), 1-13.
- Ferreira, G., Mertens, D.R. 2007. Measuring detergent fibre and insoluble protein in corn silage using crucibles or filter bags. Anim. Feed. Sci. Technol. 133, 335-340. doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.04.010
- Fick, K.R., McDowell, L.R., Miles, P.H., Wilkinson, N.S., Funk, J.D., Conrad, J.H., Valdivia, R. 1979. Métodos de Análisis de Minerales para Tejidos de Plantas y Animales. Segunda Edición. (Universidad de Florida, Gainesville, Florida, USA).
- Fondevila, M., Nogueira-Filho, J.C.M., Barrios, A. 2002. *In vitro* microbial fermentation and protein utilization of tropical forage legumes grown during the dry season. Anim. Feed Sci. Tech. 95(1-2), 1-14.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a Edición. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 217 pp.
- Gaviria, X., Naranjo, J.F., Barahona, R. 2015. Cinética de fermentación *in vitro* de *Leucaena leucocephala* y *Megathyrsus maximus* y sus mezclas, con o sin suplementación energética. Pastos y Forrajes 38, 55-63.
- González-García, E., Cáceres, O., Archimède, H., Santana, H. 2009. Nutritive value of edible forage from two *Leucaena leucocephala* cultivars with different habit and morphology. Agrofor. Syst. 77, 131-141. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9188-4>
- Heuzé, V., Tran, G. 2015. *Leucaena (Leucaena leucocephala)*. INRA, CIRAD, AFZ, FAO. <https://www.fee-dipedia.org/node/334> (accessed March 29, 2003).
- IUSS Working Group WRB. 2010. Guidelines for constructing small-scale map legends using the WRB. FAO, Rome. <http://www.fao.org/nr/land/soils/soil/wrb-documents/en/>
- Leng, R.A. 1990. Factors affecting the utilization of “poor-quality” forages by ruminants particularly under tropical conditions. Nutr. Res. Rev. 3(1), 277-303. <http://dx.doi.org/10.1079/NRR19900016>
- López-Vigo, O., Lamela-López, L., Sánchez-Santana, T., Olivera-Castro, Y., García-López, R., Herrera-Villafranca, M., González-Ronquillo, M. 2019. Evaluación del valor nutricional de los forrajes en un sistema silvopastoril. Pastos y Forrajes 42(1), 57-67.
- Martínez-Hernández, P.A., Cortés-Díaz, E., Purroy-Vásquez, R., Palma-García, J.M., Del Pozo-Rodríguez, P.P., Vite-Cristóbal, C. 2019. *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. Tropic. Subtropic. Agroecosyst. 22(2), 331-357.

- Maya, G.E., Durán, C.C.V., Ararat, J.E. 2005a. Altura, disponibilidad de forraje y relación hoja-tallo del pasto estrella solo y asociado con leucaena. *Acta Agron.* 54(2), 37-42. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/111 (accessed December 2, 2019).
- Maya, G.E., Durán, C.C.V., Ararat, J.E. 2005b. Valor nutritivo del pasto estrella solo y en asociación con leucaena a diferentes edades de corte durante el año. *Acta Agron.* 54 (4), 41-46. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/123 (accessed December 2, 2019).
- Minson, D.J. 1990. Forage in ruminant nutrition. San Diego: Academic Press.
- McDowell, L.R., Arthington, J.D. 2005. Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales. 4ª. ed. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA.
- McLeod, M.N., Minson, D.J. 1976. The analytical and biological accuracy of estimating the dry mater digestibility of different legume species. *Anim. Feed Sci. Technol.* 1, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(76\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0377-8401(76)90008-0)
- Molina, B.I.C., Cantet, J.M., Montoya, S., Correa, L.G.A., Barahona, R.R. 2013. Producción de metano *in vitro* de dos gramíneas tropicales solas y mezcladas con *Leucaena leucocephala* o *Gliricidia sepium*. *Rev. CES Med. Vet. Zoot.* 8, 15-31.
- Molina, I.C., Angarita, E.A., Mayorga, O.L., Chará, J., Barahona-Rosales, R. 2016. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of Lucerna heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livest. Sci.* 185, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.009>
- Muñoz-González, J.C., Huerta-Bravo, M., Lara-Bueno, A., Rangel-Santos, R., De la Rosa-Arana, J.L. 2016. Producción y calidad nutricional de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Rev. Mex. Cienc. Agr.* 16, 3315-3327.
- Naranjo, J.F., Ceballos, O.A., Gaviria, X., Tarazona, A.M., Correa, G.A., Chará, J.D., Murgueitio, E., Barahona, R. 2016. Estudio de la cinética fermentativa *in vitro* de mezclas de forrajes que incluyen *Leucaena leucocephala* proveniente de sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en Colombia. *Rev. CES Med. Vet. Zoot.* 11, 6-17.
- Navas, P.A. 2010. Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical. *Rev. Med. Vet.* 19, 113-122.
- Ngamsaeng, A., Wanapat, M., Khampa, S. 2006. Evaluation of local tropical plants by *in vitro* rumen fermentation and their effects on fermentation end-products. *Pakistan J. Nutr.* 5, 414-418. 10.3923/pjn.2006.414.418
- NRC (National Research Council). 2016. Nutrient requirements of beef cattle. 8th ed. National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Palma, J.M. 2006. Los sistemas silvopastoriles en el trópico seco mexicano. *Arch. Latinoam. Prod. Anim.* 14: 95-104.
- Perkin-Elmer. 1996. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy. United States of America. 300 p.

- Nyathi, P., Dhliwayo, H.H., Dzowela, B.H. 1995. The response of three *Leucaena leucocephala* cultivars to a four-cycle cutting frequency under rainfed dryland conditions in Zimbabwe. *Trop. Grassl.* 29, 9-12.
- Peniche-González, I.N., González-López, Z.U., Aguilar-Pérez, C.F., Ku-Vera, J.C., Ayala-Burgos, A.J. Solorio-Sánchez, F.J. 2014. Milk production and reproduction of dual-purpose cows with a restricted concentrate allowance and access to an association of *Leucaena leucocephala* and *Cynodon nlemfuensis*. *J. Appl. Anim. Res.* 42, 345-351. 10.1080/09712119.2013.875902
- Pereira, J.V., McDowell, L.R., Conrad, J.H., Wilkinson, N., Martin, F. 1997. Mineral status of soils, forages and cattle in Nicaragua. I. Micro minerals. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 14, 73-89.
- Piñeiro-Vázquez, A.T., Jiménez-Ferrer, G.O., Chay-Canul, A.J., Casanova-Lugoc, F., Díaz-Echeverría, V.F., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Aguilar-Pérez, C.F., Ku-Vera, J.C. 2017. Intake, digestibility, nitrogen balance and energy utilization in heifers fed low-quality forage and *Leucaena leucocephala*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 228, 191-201. 10.1016/j.anifeedsci.2017.04.009.
- Preston, T.R., Leng, R.A. 1990. Ajustando los sistemas de producción pecuaria a los recursos disponibles: aspectos básicos y aplicados del nuevo enfoque sobre la nutrición en el trópico. Círculo de impresores Ltda.: Cali, Colombia.
- Saminathan, M., Sieo, C.C., Abdullah, N., Wong, C.M.V.L., Ho, Y.W. 2015. Effects of condensed tannin fractions of different molecular weights from a *Leucaena leucocephala* hybrid on *in vitro* methane production and rumen fermentation. *J. Sci. Food Agric.* 95: 2742-2749. 10.1002/jsfa.7016
- Shelton, M., Dalzell, S. 2007. Production, economic and environmental benefits of leucaena pastures. *Trop. Grassl.* 41: 174-190.
- Sierra, M.E., Chará, J.D., Barahona, R.R. 2017. The nutritional balance of early lactation dairy cows grazing in intensive silvopastoral systems. *Ciênc. Anim. Bras.* 18, 1-12. 10.1590/1089-6891v18e-40419
- Singh, S., Kushwaha, B.P., Nag, S.K., Mishra, A.K., Singh, A., Anele, U.Y. 2012. In vitro ruminal fermentation, protein and carbohydrate fractionation, methane production and prediction of twelve commonly used Indian green forages. *Anim. Feed Sci. Technol.* 178, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.08.019>
- Theodorou, M.K., Williams, B.A., Dhanoa, M., McAllan, A.B., France, J. 1994. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48:185-197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Tilley, J.M.A., Terry, R.A. 1963. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forages crops. *Grass Forage Sci.* 18:104-111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Vite, C.C., Martínez, H.P.A., Cortés, D.E., Pérez, H.P., Palma, G.J.M., Escalante, E.J.A.S., Rodríguez, G.M.T. 2020. Modelos cuantitativos desarrollados con variables

- no destructivas para la estimación del área foliar en *Leucaena leucocephala* ((Lam.) de Wit). Av. Investig. Agropecu. (En prensa).
- Whitehead, C.D. 2000. Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationship. CABI Publishing, New York, USA.
- Worknesh, S., Getachew, A. 2018. Digestibility and growth performance of Dorper×Afar F1 sheep fed Rhodes grass (*Chloris gayana*) hay supplemented with alfalfa (*Medicago sativa*), lablab (*Lablab purpureus*), *Leucaena leucocephala* and concentrate mixture. Int. J. Livest. Prod. 9(4), 79-87. <https://doi.org/10.5897/IJLP2016.0335>.