

## PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACEITE ESENCIAL DE *DALEA BICOLOR* EN DIFERENTES REGIONES DE CHIHUAHUA, MÉXICO

## PRODUCTION AND CHEMICAL COMPOSITION OF *DALEA BICOLOR* ESSENTIAL OIL IN DIFFERENT REGIONS OF CHIHUAHUA STATE, MEXICO

SAÚL VÁSQUEZ-MONTES<sup>1,2\*</sup>, FEDERICO VILLARREAL-GUERRERO<sup>2</sup>, NUBIA IVETTE AMAYA-OLIVAS<sup>3</sup>,  
LEÓN R. HERNÁNDEZ-OCHOA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación para los Recursos Naturales. Salaires, Chihuahua, México

<sup>2</sup>Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México

\*Autor de correspondencia: [saulvasquezmontes@gmail.com](mailto:saulvasquezmontes@gmail.com)

### Resumen

**Antecedentes:** *Dalea bicolor* se desarrolla en el Desierto Chihuahuense. Es una fuente importante de forraje para el ganado y fauna silvestre y, se recomienda para biorremediación y restauración ecológica. Éste es el primer estudio sobre su aceite esencial.

**Preguntas y/o hipótesis:** ¿Cuánto aceite esencial produce *D. bicolor* al final de la floración? ¿Es la producción de aceite igual en regiones con diferentes condiciones ambientales? ¿Cuáles variables de clima y suelo influyen en la producción? ¿Qué compuestos tiene el aceite esencial?

**Especie en estudio:** *Dalea bicolor*.

**Sitio de estudio y fechas:** Cuatro regiones del estado de Chihuahua, en un rango latitudinal de 26° 34' 12" N a 28° 47' 24" N. El muestreo fue en noviembre de 2017.

**Métodos:** Extracción del aceite esencial por hidrodestilación. Análisis de varianza de la producción de aceite esencial entre regiones. Análisis de correlación entre la producción de aceite y variables de clima y suelo. Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para determinar los compuestos más probables del aceite esencial.

**Resultados:** La producción de aceite esencial fue diferente entre regiones, siendo significativamente mayor en Aldama con  $5.18 \pm 0.64 \text{ g Kg}^{-1}$  de materia seca. La producción está correlacionada positivamente con la temperatura y con la concentración de boro y zinc en el suelo. Se detectaron 17 compuestos en el aceite esencial.

**Conclusiones:** Altas temperaturas y suelos ricos en boro y zinc favorecen la producción de aceite esencial de *D. bicolor*. El principal compuesto del aceite esencial fue 3-careno, seguido por limoneno, ocimeno y  $\beta$ -felandreno.

**Palabras clave:** componentes bioactivos, limoneno, ocimeno,  $\beta$ -felandreno, 3-careno.

### Abstract

**Background:** *Dalea bicolor* grows in the Chihuahuan Desert. It is an important fodder source for cattle and fauna, and its recommended for bioremediation and ecological restoration. This is the first study about its essential oil.

**Questions and / or hypotheses:** How much essential oil produces *D. bicolor* at the end of flowering stage? Is the oil production equal under different environmental conditions? What climate and soil variables influence oil production? What compounds are found in the essential oil?

**Species under study:** *Dalea bicolor*.

**Study site and dates:** Four regions in the state of Chihuahua, within the latitudes of 26° 34' 12" N and 28° 47' 24" N. The sampling was carried out during November of 2017.

**Methods:** Extraction of the essential oil by hydrodistillation. Analysis of variance of essential oil production among the regions. Correlation analysis between oil production and climate, as well as soil variables. Gas-mass chromatography coupled with mass spectrometry for the determination of the most likely essential oil compounds.

**Results:** Essential oil production was different among the regions. In Aldama region it was significantly higher with  $5.18 \pm 0.64 \text{ g Kg}^{-1}$  of dry matter. Essential oil production was correlated positively with air temperature and the concentration of boron and zinc in the soil. Seventeen compounds were detected in the essential oil.

**Conclusions:** High air temperatures and soils rich in boron and zinc favor the production of *D. bicolor* essential oil. The main compound of the essential oil was 3-carene, followed by limonene, ocimene and  $\beta$ -phellandrene.

**Key words:** bioactive compounds, limonene, ocimene,  $\beta$ -phellandrene, 3-carene.

En las zonas áridas y semiáridas del planeta existe la tendencia de una transición de la vegetación hacia un estado dominado por arbustos (Estell *et al.* 2012). En el Desierto Chihuahuense, los arbustos representan una parte importante de la dieta del ganado vacuno y caprino en pastoreo extensivo (Estell *et al.* 2012). Para las cabras, los arbustos representan más del 50 % de la dieta en algunos casos (Warren *et al.* 1984, Mellado *et al.* 2003). Entonces, el incremento de la superficie ocupada por arbustos sugiere el uso cada vez mayor de éstos como forraje para el ganado, así como el buscar usos alternativos potenciales de los mismos.

En la región centro-sur del estado de Chihuahua, la especie arbustiva *Dalea bicolor* Humb. & Bonpl. ex Willd es de importancia para la ganadería por su calidad nutricional. Investigaciones reportan promedios de proteína cruda de 15.26 %, con 65 % de digestibilidad (Gutiérrez-Luna *et al.* 2012). Otro uso potencial de *Dalea bicolor* es la restauración de zonas áridas y semiáridas (Gelviz-Gelvez *et al.* 2015), lo que incluye su uso en fitorremediación y fitoestabilización de suelos (Noguez-Inesta *et al.* 2017, Sánchez-López *et al.* 2015, González-Chávez *et al.* 2015, Carrillo-González & González-Chávez 2006), mientras produce forraje para el ganado y fauna silvestre (Guefrachi *et al.* 2013).

*Dalea bicolor* es una especie aromática y su selección para consumo por el ganado y fauna silvestre pudiera estar relacionada tanto a su valor nutricional como a compuestos del aceite esencial (AE) (Markó *et al.* 2008). Además, existe un creciente interés en los aceites esenciales y en compuestos específicos de las plantas para su uso comercial en diversas áreas productivas (Pavarini *et al.* 2012). Esto resalta un uso potencial adicional de *D. bicolor*. Sin embargo, no existen estudios previos sobre la producción y composición del AE en esta especie.

Los AEs están constituidos en mayor parte por metabolitos secundarios (MS) en forma de terpenos (Benchaar *et al.* 2008). Estos compuestos volátiles protegen a la planta ante condiciones de estrés biótico y abiótico (Baldwin 2010) y actúan como moléculas de señalización cruciales en la defensa de las plantas, la polinización y la comunicación planta-planta (Dudareva *et al.* 2013). Por otra parte, los terpenos de las plantas son de importancia económica por representar una fuente de materia prima química renovable (Tsolakis *et al.* 2019).

Los AEs son alternativos como antibióticos y como aditivos para mejorar el aprovechamiento del nitrógeno y/o energía en rumiantes. Compuestos específicos de los AEs disminuyen la formación de metano en el rumen (Benchaar *et al.* 2008). La investigación futura debiera dirigirse a la identificación de compuestos específicos de AEs y su actividad en la fisiología del ganado (Cobellis *et al.* 2016).

Por otra parte, los compuestos producidos por el metabolismo secundario y sus concentraciones difieren temporal y espacialmente entre especies y dentro de una misma especie (Estell 2010, Pavarini *et al.* 2012). Su presencia y concentración están determinadas por la genética, así como por factores bióticos y abióticos (Verma & Shukla 2015). La investigación acerca de la influencia del medio ambiente sobre la producción de AE y la concentración de sus metabolitos secundarios en las plantas es aún escasa (Pavarini *et al.* 2012). Por lo anteriormente expuesto, los objetivos del presente estudio fueron: a) determinar la producción de AE de *Dalea bicolor* Humb. & Bonpl. ex Willd. y los compuestos principales más probables cuando la planta se encuentra en la etapa final de floración en cuatro regiones del Estado de Chihuahua, México con diferentes condiciones de clima y suelo y, b) determinar las variables de clima y suelo que se correlacionan con la producción de AE de *D. bicolor*.

## Materiales y métodos

*Generalidades de la especie en estudio.* *Dalea bicolor* Humb. & Bonpl. ex Willd (Fabaceae) (Figuras 1, 2) es un grupo de variedades adaptadas a un amplio rango altitudinal y climático, el cual presenta diversidad en forma y detalles. Esta especie tiene hábito de crecimiento arbustivo y tallos verrugosos. Sus ramas son prominentes, densamente tuberculadas con glándulas (celdas de aceite) aromáticas. Las abejas encuentran muy atractiva a esta especie debido al néctar y polen que producen. *D. bicolor* se desarrolla en el Desierto Chihuahuense, principalmente en México, y se extiende con menor intensidad al Suroeste de Estados Unidos y América Central (Barneby 1977). En México, *D. bicolor* se desarrolla principalmente desde los estados de Chihuahua y Coahuila en el norte, hasta el Estado de México y Puebla en el sur. El rango de altitudes donde se encuentra *D. bicolor* va de los 800 a los 2,800 m, donde cohabita en diversos tipos de vegetación como pastizales, encinar arbustivo, matorral desértico rosetófilo, matorral crasicaule y matorral desértico micrófilo (Gutiérrez-Luna *et al.* 2012). En los ecosistemas de matorrales de las zonas semiáridas de la región central de México (San Luis Potosí, Aguascalientes, Hidalgo, Zacatecas, Guanajuato y Querétaro) *D. bicolor* es un arbusto con valores altos de cobertura, densidad y frecuencia (Siqueiros-Delgado *et al.* 2016).

*Regiones de estudio.* Con base en la variabilidad de condiciones ambientales y en la existencia tanto de poblaciones naturales como de plantaciones de *D. bicolor*, se seleccionaron cuatro regiones. Éstas se encuentran ubicadas en los municipios de Aldama, Allende, Coronado



**Figura 1.** *Dalea bicolor* en plena floración en la región de Allende, Chihuahua, México.

y Satevó, en el estado de Chihuahua, México y se usarán los nombres de los municipios para cada una de las poblaciones estudiadas. Para cada región, de forma documental se investigaron las variables climáticas normales de precipitación media anual, temperatura media anual, temperatura media anual de máximas y de mínimas (SMN 2018), así como las coordenadas geográficas y altitud (Google Earth Pro® Google) (Tabla 1). Para determinar las variables del suelo de cada región, en noviembre de 2016 se obtuvo una muestra de suelo del perfil de 0 a 60 cm de profundidad. Las muestras se enviaron a laboratorio para su análisis (Fertilab®, Fertilidad de suelos S. de R.L., ISO 9001: ECMX-0932/13) en marzo de 2018. Las variables determinadas fueron: materia orgánica (MO), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), azufre (S), potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) (Tabla 2).

En Aldama y Allende, las poblaciones de *D. bicolor* fueron establecidas por medio de trasplante en 2008 mientras que en Coronado y Satevó las poblaciones son naturales. En Aldama, la población se encuentra cercada y sin pastoreo; en las otras tres las poblaciones se encuentran con acceso al ganado de pastoreo. Para correlacionar la intensidad de pastoreo con la producción de AE, se asignaron valores de intensidad de pastoreo de 0 (cero) para Aldama, 0.5 para Satevó y 1.0 para Allende y Coronado. Los valores fueron asignados con base en la intensidad de pastoreo observada en los arbustos al momento del muestreo.

**Muestreo.** La toma de muestras de material vegetal se realizó del 4 al 6 de noviembre de 2016 (Figura 3). En cada región, dentro de aproximadamente 1.0 ha, se seleccionaron 10 plantas con las que se integró una muestra compuesta de aproximadamente 2.5 Kg de material vegetal. La muestra contuvo ramas delgadas, hasta de 5 mm de grueso, así como hojas e inflorescencias. Después de colectar la muestra, el material vegetal se colocó en bolsas de plástico resellables (ziplock®) y éstas a su vez, en recipientes de poliestireno con hielo para mantenerlas en estado fresco. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en refrigerador a 5 °C de noviembre 2016 a enero 2017.

**Producción de aceite esencial (AE).** Para la extracción del AE de las muestras, se utilizó el método de hidrodestilación (Coutinho *et al.* 2009, Hernández-Ochoa *et al.* 2014). Las muestras se procesaron por triplicado. En cada proceso, se colocaron 0.5 Kg de material vegetal en un matraz de bola con capacidad de 12 L al que se añadieron 6 L de agua que se mantuvo en ebullición durante 5 h. Durante este tiempo, el agua y el AE evaporados se condensaron al pasar por un enfriador de serpentín con flujo constante de agua fría. El AE y el agua condensados se capturaron en un embudo de separación. Después de cada proceso, se obtuvo el aceite producido y se registró su peso (g) con una balanza analítica (Ohaus, Adventure, 0.0001 g; Pine Brook NJ, USA). Posteriormente, el AE se colocó en un vial de 20 ml dentro de un refrigerador a 5 °C.





**Figura 2.** Detalle de la inflorescencia, flor y hojas de *Dalea bicolor*. Se ilustra también, el fomento de la biodiversidad.

Una vez extraído el aceite, el material vegetal contenido en el matraz, se colocó durante 15 días al aire libre sobre papel secante hasta llevarlo a sequedad. Después de ese periodo, se registró el peso seco (g) de la muestra y con el dato de la cantidad de AE (g) que se obtuvo de esa muestra, se calculó la producción de AE en gramos por kilogramo de materia seca ( $\text{g} \cdot \text{Kg}^{-1}$  MS) de *D. bicolor* de cada muestra.

**Determinación de compuestos.** Para la determinación de los compuestos más probables presentes en el AE, se aplicó el método de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas. Con la cromatografía de gases, los compuestos de la muestra de AE se separan en diferentes tiempos de acuerdo con sus características moleculares, lo que permite obtener el tiempo de retención (TR) de cada compuesto. Con la espectrometría de masas, los compuestos que salen del cromatógrafo se ionizan y los iones se separan en función de sus diferentes relaciones masa/carga ( $m/z$ ). La detección y el análisis de iones se realiza con el TR de los picos de los compuestos que aparecen en función de sus relaciones  $m/z$ . Finalmente, la identificación y cuantificación de compuestos desconocidos se realiza mediante la comparación de los fragmentos de masa obtenidos de cada compuesto, con la base de datos del NIST y entonces se determina su identidad. El equipo utilizado fue un cromatógrafo de gases y un espectrómetro de masas (Turbo Mass Gold, Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA.), así como el software GC/MS (Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA.). Para la separación de los componentes del aceite, se usó una columna capilar PE-5 de  $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ , con un espesor de película de  $0.25 \mu\text{m}$  (Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, CA). La temperatura del inyector se mantuvo a  $250^\circ\text{C}$ . El proceso fue: Temperatura1 =  $50^\circ\text{C}$ , Tiempo1 =

2 min, Rampa1 =  $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Temperatura2 =  $130^\circ\text{C}$ , Tiempo2 = 0 min, Rampa2 =  $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Temperatura3 =  $150^\circ\text{C}$ , Tiempo3 = 0 min, Rampa3 =  $30^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Temperatura4 =  $250^\circ\text{C}$ , Tiempo4 = 8 min, Rampa4 =  $0^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ . La duración total del proceso fue de 18 min. Para la preparación de las alícuotas de cada muestra, se empleó 1 mL de AE de *D. bicolor*, aforado con hexano a 20 mL. Para el análisis, se utilizó una alícuota de 1  $\mu\text{L}$ . Los análisis de las cuatro muestras (regiones) se realizaron por triplicado para comparar y verificar la homogeneidad de los tres cromatogramas de cada muestra.

Debido a que no se encontró información antecedente de la composición del AE de *D. bicolor*, para determinar los compuestos correspondientes a los picos en los cromatogramas, se utilizó como referencia el TR de cada pico y se consultó la base de datos NIST del software del equipo utilizado. Para cada TR se seleccionó el compuesto con el más alto grado de similitud (SR) de los que arrojó la consulta; siempre y cuando el SR fuera mayor al 70 %. De esta forma se determinó el compuesto más probable para cada pico. Para cuantificar el porcentaje de concentración de cada compuesto, se eligió un cromatograma de cada región y se cuantificó el porcentaje del área bajo la curva de cada pico con respecto al área total del cromatograma. Este método se ha utilizado en diversos estudios; entre ellos [Coutinho et al. \(2009\)](#), [Liu et al. \(2014\)](#), [Zahid et al. \(2017\)](#), [Wesolowska et al. \(2019\)](#).

**Análisis estadístico.** Para detectar diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) de la producción de aceite entre regiones, se realizó un análisis de varianza de una vía en el que se consideró la producción de aceite como variable dependiente de la región. La separación de medias se realizó

**Tabla 1.** Ubicación geográfica, altitud (m), precipitación (mm), temperatura media y temperaturas medias de máximas y mínimas anuales (°C) de las cuatro regiones de estudio, ubicadas en el Estado de Chihuahua, México.

Región	Latitud	Longitud	Altitud m	PP mm	Tmed °C	Tmax °C	Tmin °C
Aldama	28° 47' 24" N	105° 55' 48" O	1,310	330.5	20.07	27.6	12.3
Satevo	27° 35' 24" N	106° 15' 36" O	1,613	455.3	18.2	27.2	9.6
Allende	26° 58' 12" N	105° 29' 24" O	1,658	440.8	17.3	26.0	8.6
Coronado	26° 34' 12" N	105° 15' 00" O	1,516	305.0	17.4	27.0	8.0

N = Latitud norte, O = Longitud oeste, Tmed, Tmax y Tmin= temperatura media, media de máximas y media de mínimas anuales, respectivamente.

con el método de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Los datos de las variables geográficas, climáticas, intensidad de pastoreo (Cuadro 1) y variables edáficas (Cuadro 2) se utilizaron para realizar un análisis de correlación (Pearson,  $P \leq 0.05$ ) con la producción de aceite de las cuatro regiones. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS 2006 Ver. 9.1.3.

## Resultados

**Producción de aceite esencial (AE).** El análisis de varianza detectó diferencias significativas ( $P < 0.0001$ ) de la producción de AE entre regiones. En Aldama, *D. bicolor* produjo  $5.18 \pm 0.64$  g·Kg<sup>-1</sup>MS y esta producción fue significativamente mayor (Tukey,  $P < 0.05$ ) a las registradas en Allende, Coronado y Satevó (Tabla 3).

**Correlación con variables climáticas.** El análisis de correlación de Pearson ( $P \leq 0.05$ ) determinó que las variables temperatura media anual y media anual de temperaturas mínimas (Tabla 4), presentan correlación positiva con la producción media de AE de *D. bicolor*. Los valores de estas dos variables (Tabla 1), así como la producción de AE (Tabla 3), fueron mayores en Aldama que en las demás regiones.

**Correlación con variables del suelo.** La concentración de boro y de zinc en el suelo (Tabla 5) presentaron correlación positiva (Pearson,  $P \leq 0.05$ ) con la producción media de AE de *D. bicolor*. Los valores de estas dos variables (Tabla 2), así como la producción de AE (Tabla 3) fueron mayores en Aldama que en las otras tres regiones (Tabla 2). Así, los resultados indican que una mayor producción de AE de *D. bicolor* está ligada a concentraciones altas de boro y zinc en el suelo, como las registradas en la región de Aldama. Además, la Figura 4 muestra que en las regiones con suelos de baja concentración de boro y zinc (Satevó, Allende y Coronado) la producción de AE también fue baja.

Los elementos mayores (N, P, K) no tuvieron correlación con la producción de AE. Aunque la concentración de nitratos (NO<sub>3</sub>) fue cerca de 4 veces mayor en Coronado que en Satevó y Allende, y que la concentración de fósforo fue alrededor de 3 veces mayor en Allende que en Satevó y Coronado, en éstas tres regiones la producción de AE fue igual ( $P > 0.0001$ ). Estos resultados sugieren que la producción de AE de *D. bicolor* no está determinada por los nutrientes mayores, los cuales son considerados como criterios principales para determinar la fertilidad de suelos. Por otra parte, se registraron valores muy altos de Mg y Fe en Allende y de Mn en Satevó; sin embargo, esto no influyó en la producción de AE.

**Tabla 2.** Contenido de materia orgánica (MO), nitratos (NO<sub>3</sub>), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), azufre (S), potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) del suelo de cuatro regiones de estudio.

Región	MO %	NO <sub>3</sub> ppm	P ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	Cu ppm	B ppm	S ppm	PH	CE ds/m
Aldama	0.93	7.00	1.80	406	4,017	165	46.7	1.89	0.61	1.04	0.26	0.55	10.60	8.50	0.55
Satevo	0.96	3.64	1.10	419	4,745	107	117	1.81	0.19	3.25	0.11	0.29	7.55	8.07	1.57
Allende	1.28	4.81	3.29	245	5,355	519	45.1	5.64	0.10	1.28	0.31	0.30	9.06	7.96	0.43
Coronado	2.93	26.7	0.80	124	5,553	89.7	75.0	2.66	0.10	0.89	0.73	0.38	7.55	7.98	1.42



**Figura 3.** Muestreo de material vegetal en la región de Aldama, Chihuahua, México.

**Compuestos del aceite esencial (AE).** Los cromatogramas de las cuatro regiones estudiadas se muestran en la [Figura 5](#). En dichos cromatogramas se ilustran los TR de los compuestos detectados en el AE de *D. bicolor*. En la [Figura 6](#) se presentan tres cromatogramas (réplicas) para la región de Aldama, los cuales muestran picos y TR similares. Dentro de cada una de las otras tres regiones estudiadas, los cromatogramas también mostraron picos y TR similares. En total, se detectaron 17 compuestos como los más probables (porcentaje de similitud > 80 %) en el AE. El principal componente fue 3-careno, con una variación de 21.67 a 39.53 % entre las cuatro regiones. Limoneno, ocimeno y  $\beta$ -felandreno también presentaron altas concentraciones en comparación con el resto de los compuestos, pero en concentraciones considerablemente menores a 3-careno ([Tabla 6](#)).

**Tabla 3.** Medias  $\pm$  desviación estándar de la producción de aceite esencial, en g·Kg<sup>-1</sup> de materia seca (MS) de *Dalea bicolor* al final de la floración en cuatro regiones del Estado de Chihuahua, México.

Región	Media	Desviación estándar
Aldama	5.18 <sup>a</sup>	$\pm 0.64$
Satevo	1.43 <sup>b</sup>	$\pm 0.06$
Allende	1.82 <sup>b</sup>	$\pm 0.32$
Coronado	2.05 <sup>b</sup>	$\pm 0.46$

Letras diferentes indican diferencia estadística significativa, Tukey ( $P < 0.05$ ).

## Discusión

**Producción de aceite esencial y variables ambientales.** La producción AE de *D. bicolor* está correlacionada positivamente con las temperaturas media anual y media anual de mínimas. Resultados similares fueron reportados por [Delazar et al. \(2011\)](#) para *Thymus fedtschenkoi* Ronniger; en esta especie, la altitud y la temperatura tienen efecto en la producción de AE. El efecto de la altitud es negativo y el de la temperatura es positivo; de cuatro sitios de estudio, la mayor producción de AE en las flores de *T. fedtschenkoi* se registró en el lugar con la altitud más baja y con la mayor temperatura máxima. Se infiere entonces que la temperatura influye en la producción de AE y que *D. bicolor* produciría más AE cuando se desarrolla en regiones con una mayor temperatura media anual y media anual de mínimas. También se esperaría una mayor producción de AE durante años más calientes que lo normal, así como durante periodos más calientes que coincidan con el desarrollo del arbusto (abril-noviembre).

En este estudio, no se encontró evidencia suficiente para afirmar que la altitud está correlacionada significativamente con la producción de AE de *D. bicolor*; sin embargo, esta variable está directamente ligada a la temperatura. A menor altitud, mayor temperatura y viceversa. El efecto de la altitud se ve reflejado en la temperatura de las regiones de estudio. En Aldama, la región con la menor altitud registró las mayores temperaturas media anual y media anual de mínimas que el resto de las regiones.

Como en el caso de la altitud, no se encontró evidencia suficiente para afirmar que la intensidad de pastoreo está correlacionada significativamente con la producción de AE ([Tabla 4](#)); sin embargo, su valor de correlación fue alto y estudios anteriores han reportado la influencia de ésta variable sobre la producción de AE. [Markó et al. \(2008\)](#) reportan que los arbustos de *Juniperus communis* L. con una mayor producción de AE y alta concentración de careno tuvieron la menor intensidad de pastoreo de ganado ovino. [Bidgoli et al. \(2014\)](#) encontraron que los arbustos de *Artemisia sieberi* Besser produjeron la mayor producción de AE bajo pastoreo moderado en comparación con pastoreo intenso y sin pastoreo. En el presente estudio, la mayor producción de AE de *D. bicolor* ([Tabla 3](#)), mayor cantidad de compuestos (14 de los 17 detectados) y mayor concentración de 3-careno,  $\beta$ -felandreno, limoneno y 1-Metilideno-2b-hidroximetil-3,3-dimetil ([Tabla 6](#)) se registró en la región de Aldama, donde no hubo pastoreo. Los resultados de estos trabajos sugieren que la producción de AE en plantas, los compuestos producidos y sus concentraciones, como respuesta al pastoreo, es específica de cada especie. Se sugiere realizar estudios más específicos con *D. bicolor* para determinar el efecto de la intensidad de pastoreo en las variables anteriormente mencionadas.



**Tabla 4.** Coeficientes de Correlación de Pearson entre la producción de aceite esencial (g·Kg<sup>-1</sup>MS) de *Dalea bicolor* al final de la floración y las variables climatológicas normales y, el Coeficiente de Correlación de Spearman para la intensidad de pastoreo.

Variable	Coefficiente de correlación	P
Latitud	0.92	0.08
Altitud	-0.60	0.40
PP media anual	-0.46	0.54
T °C media anual	0.98	0.02
T °C máxima media anual	0.74	0.26
T °C mínima media anual	0.95	0.05
Intensidad de pastoreo	-0.82	0.18

La producción de AE de *D. bicolor* está correlacionada positivamente con la concentración de boro y zinc y se infiere que estas variables influyen en la producción de AE. Así, *D. bicolor* tendría una mayor producción de AE cuando se desarrolla en regiones que tienen mayor contenido de boro y zinc en el suelo.

**Tabla 5.** Coeficientes de Correlación de Pearson entre la producción de aceite esencial (g·Kg<sup>-1</sup> MS) de *Dalea bicolor* al final de la floración y las variables edáficas.

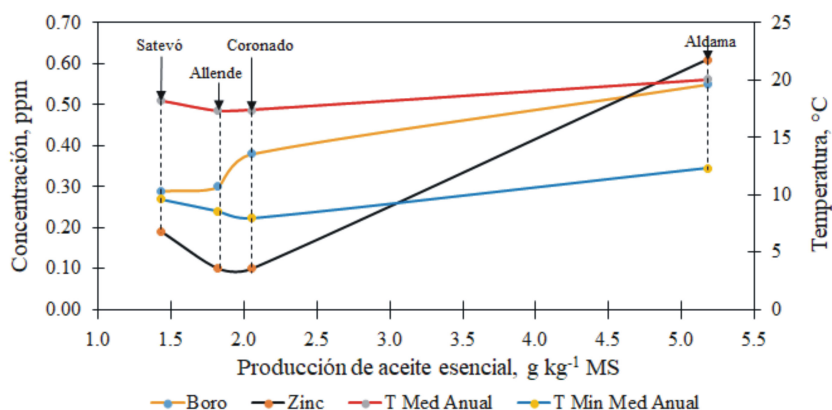
Variable	Coefficiente de correlación	P
MO	-0.30	0.70
NO <sub>3</sub>	-0.10	0.90
P	0.04	0.96
K	0.38	0.62
Ca	-0.79	0.22
Mg	-0.16	0.84
Na	-0.57	0.43
Fe	-0.36	0.64
Zn	0.95	0.05
Mn	-0.48	0.52
Cu	-0.09	0.91
B	0.97	0.03
S	0.87	0.13
pH	0.94	0.06

En las regiones de estudio, la producción de AE de *D. bicolor* al final de la floración tiene una alta variabilidad. La producción de AE registrada varió desde  $5.18 \pm 0.64$  hasta  $1.43 \pm 0.06$ , g·Kg<sup>-1</sup> de materia seca. Esto se atribuye a la variabilidad de las condiciones de clima y suelo entre las cuatro regiones, especialmente a las variables que presentaron correlación con la producción de aceite.

La temperatura tiene una función determinante en la emisión de terpenos. Estos compuestos volátiles pueden ser almacenados en estructuras como los tricomas (Besser *et al.* 2009) y en el tejido de la corteza de las gimnospermas (Ghirardo *et al.* 2010). Cuando la planta se encuentra en un ambiente con alta temperatura, los terpenos son emitidos a la atmósfera para liberar energía y así alcanzar una presión de vapor adecuada (Pavarini *et al.* 2012). Aunque lo anterior se refiere a la emisión de los terpenos, condiciones con altas temperaturas también podrían estar ligadas a la producción y almacenamiento de estos compuestos para que exista la disponibilidad de ellos cuando la planta los requiera para regular procesos fisiológicos ante condiciones de estrés por calor (Ormeño *et al.* 2007). En la región con la mayor temperatura evaluada en este estudio (Aldama), la respuesta fisiológica de *D. bicolor* fue producir más AE, esto probablemente como un mecanismo de sobrevivencia ante condiciones extremas de calor.

Dada la influencia de la temperatura en la producción de AE de *D. bicolor*, es importante considerar las proyecciones sobre el futuro del clima del planeta tierra elaborados por el IPCC (IPCC 2014). Si la concentración de CO<sub>2</sub>, y en general de los gases de efecto invernadero, continúan elevándose, se predice un incremento de la temperatura media del planeta. Asimismo, se esperan anomalías en los patrones de precipitación, con tendencia a periodos más prolongados de sequía para la región del Desierto Chihuahuense. Bajo estas condiciones climáticas, las respuestas fisiológicas de *D. bicolor* serían difíciles de predecir por la complejidad de las interacciones entre las variables climáticas y la planta. Se podría suponer que al haber un incremento en la temperatura se tendría un incremento en la producción de AE de *D. bicolor*; sin embargo, se desconoce la respuesta fisiológica debida al incremento de CO<sub>2</sub> y su interacción con el incremento en la temperatura y anomalías en la precipitación. Gelviz-Gelvez *et al.* (2015) mencionan que la composición de la vegetación nativa puede cambiar y su distribución geográfica puede afectarse como consecuencia del cambio climático.

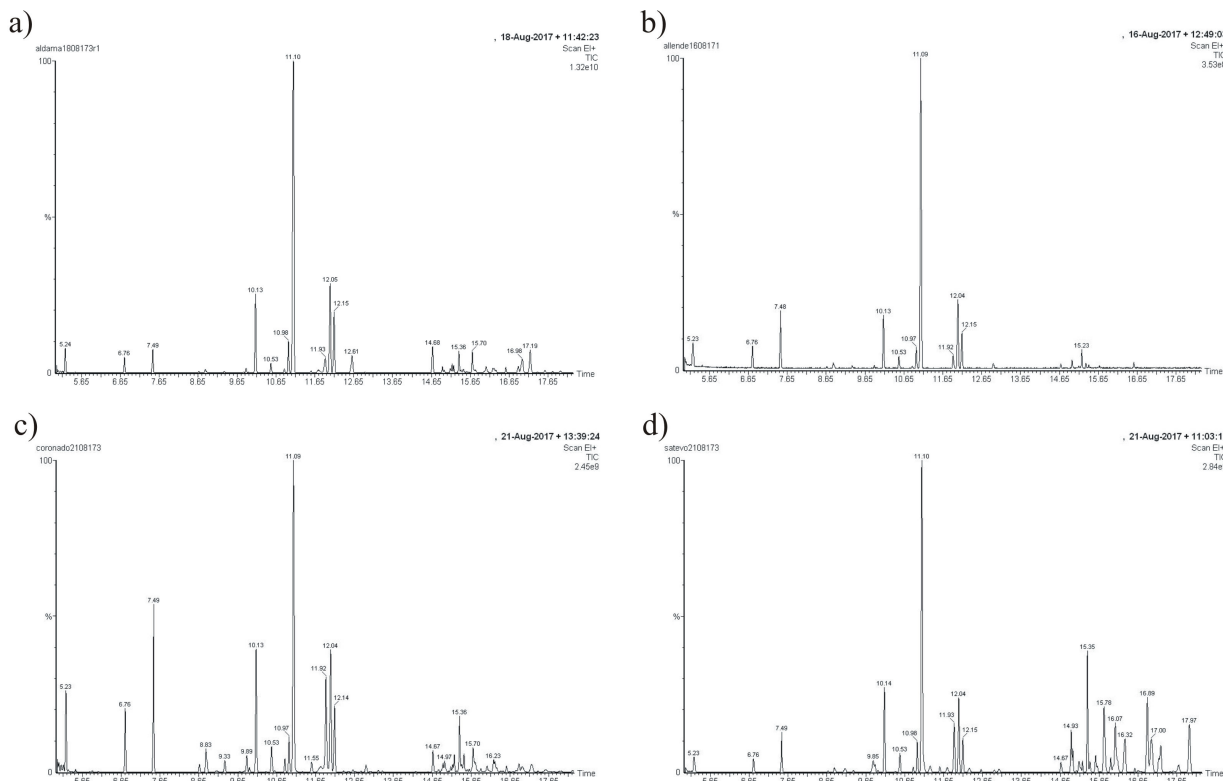
Voxeur & Fry (2014) mencionan que el boro participa en funciones fisiológicas de la planta que incluyen la formación de la pared celular, el transporte y la distribución de carbohidratos, así como la captación de Ca<sup>2+</sup>. La transducción de señales de inductores como los flujos iónicos, especialmente el flujo de Ca<sup>2+</sup> y la señalización de Ca<sup>2+</sup>, conducen a la producción y acumulación de metabolitos secundarios en las plantas (Zhao *et al.* 2005). En *Curcuma longa* L., la deficiencia de boro provoca decremento del área foliar, del peso fresco y seco, de la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub>, del contenido de AE, así como del rendimiento de rizomas y curcumina, debido a que se reduce la formación y translocación de fotosintatos (Dixit *et*



**Figura 4.** Producción de aceite esencial ( $\text{g Kg}^{-1}$  MS) de *Dalea bicolor* y valores de la concentración de boro y zinc en el suelo (ppm), de la temperatura media anual y temperatura mínima media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) de las cuatro regiones de muestreo.

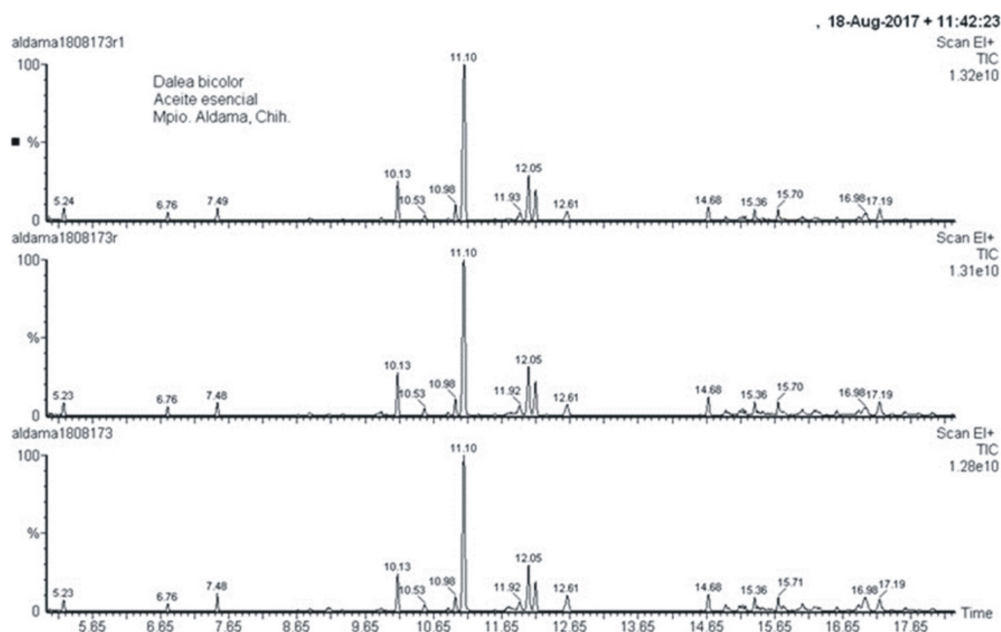
al. 2002). En el cultivo de árnica (*Arnica chamissonis* Lees.), la fertilización foliar con boro influyó en el rendimiento de flores, así como en el contenido y la composición química de su AE. Asimismo, la fertilización con boro contribuyó al incremento del 43 y 35 % en el rendimiento de AE en *A. chamissonis* y *A. montana* L., respectivamente (Sugier et al. 2017). Además, Saadati et al.

(2013) reportaron que la aplicación de boro y zinc mejora tanto la cantidad como la calidad del contenido de AE, el ácido oleico y los compuestos fenólicos en frutos de olivo. Los resultados de las investigaciones anteriores coinciden con los obtenidos en este estudio en los que una mayor producción de AE de *D. bicolor* está asociada a una alta concentración de boro y zinc en el suelo.



**Figura 5.** Cromatogramas del aceite esencial de *Dalea bicolor* en la etapa final de floración, obtenidos para la región de a) Aldama, b) Allende, c) Coronado y d) Satevó, Chihuahua, México.





**Figura 6.** Réplicas de los cromatogramas del aceite esencial de *Dalea bicolor* de la región de Aldama, Chihuahua, México. Se ilustra la homogeneidad de los picos y los tiempos de retención (TR).

**Compuestos del aceite esencial.** El compuesto que presentó la mayor concentración fue 3-careno, con una variación de 21.67 a 39.53 % entre las cuatro regiones estudiadas. Limoneno, ocimeno y  $\beta$ -felandreno también presentaron altas concentraciones en comparación con los demás compuestos, pero considerablemente menores a 3-careno. Al igual que para la producción de AE, la cual fue mayor en la región de Aldama (Tabla 3), las mayores concentraciones de 3-careno; así como de limoneno, ocimeno y  $\beta$ -felandreno se presentaron también en la misma región (Tabla 6).

El compuesto 3-careno es un monoterpreno bicíclico, uno de los principales componentes de la trementina y puede llegar a contener hasta el 42 %, según la fuente. Este compuesto se utiliza como un ingrediente saborizante y tiene un olor dulce, así como picante, no es soluble en agua, pero miscible con grasas y aceites (Wishart *et al.* 2018). Adal *et al.* (2017) determinaron que 3-careno tiene una potente actividad antimicrobiana e insecticida.

Limoneno es uno de los compuestos más comunes de las plantas, pues el 71 % de las familias lo contiene (Knudsen *et al.* 2006). Lisec *et al.* (2006) reportan que existe gran diversidad de compuestos volátiles florales; y de ellos, benzaldehído, limoneno,  $\beta$ -ocimeno y linalol son los componentes más comunes de los aromas florales de una gran diversidad de especies vegetales. Estos compuestos,

que son casi ubicuos de cualquier aroma floral, tienen la función principal de atraer polinizadores. Erasto & Viljoen (2008) mencionan que la presencia de este hidrocarburo monoterpreno en varios géneros de plantas podría atribuirse a su papel precursor en la biosíntesis de otros monoterpenos, y a su función defensiva contra los herbívoros. Al limoneno se le atribuye una actividad insecticida y es una posible alternativa a los insecticidas naturales para el control de plagas. Este compuesto tiene propiedades farmacológicas que, junto con una baja toxicidad, ofrece la posibilidad de incorporarlo en formulaciones médicas y cosméticas. Además, el limoneno tiene propiedades antimicrobianas, antioxidantes y antiinflamatorias (Wishart *et al.* 2018).

El ocimeno es uno de los monoterpenos más comunes en el reino vegetal, al igual que el limoneno, el 71 % de las familias lo produce (Knudsen *et al.* 2006). Las diferentes formas químicas del ocimeno (entre ellas los isómeros  $\alpha$  y  $\beta$ -ocimeno) tienen un olor agradable y se utilizan en la industria de la perfumería (Wishart *et al.* 2018). Este compuesto es el más comúnmente encontrado en las mezclas volátiles que emiten las hojas en respuesta al daño causado por herbívoros. Estas mezclas volátiles representan una señal química para la atracción de insectos polinizadores y parasitoides o depredadores de herbívoros (Fäldt *et al.* 2003, Lisec *et al.* 2006, Farré-Armengol *et al.* 2017).

**Tabla 6.** Tiempo de retención (TR, min), grado de similitud (R, %), compuestos más probables, número de registro CAS y concentración (área, en %), obtenidos en el aceite esencial de *Dalea bicolor* al final de la floración en cuatro regiones del estado de Chihuahua, México.

TR	R	Compuesto	CAS	Concentración por región			
				Aldama	Allende	Coronado	Satevó
6.76	87.2	Tolueno	108-88-3	1.30	1.78	3.61	0.94
8.83	89.0	<i>p</i> -Xileno	106-42-3	-	-	1.88	-
9.89	85.2	$\alpha$ -Tujeno	2867-05-2	-	-	1.84	-
10.13	88.7	Ocimeno	13877-91-3	7.66	3.69	7.86	-
10.53	85.5	Camfeno	79-92-5	0.87	1.00	1.73	1.20
10.87	86.0	$\beta$ -Tujeno	28634-89-1	-	-	0.83	-
10.98	75.9	Hidrocina-manilida	3271-81-6	0.33	-	-	1.71
11.10	85.6	3-Careno	13466-78-9	39.53	22.47	22.02	21.67
11.55	84.7	$\alpha$ -Felandreno	99-83-2	-	-	0.68	-
11.93	98.1	*	103063-10-1	2.81	1.19	7.46	3.27
12.04	84.3	Limoneno	138-86-3	10.01	5.09	8.93	4.89
12.15	86.5	$\beta$ -Felandreno	555-10-2	6.40	-	4.55	2.25
12.61	79.6	§	1000221-85-9	2.60	-	-	-
14.68	88.0	8-Metilenbicyclo-[5.1.0]octano	54211-15-3	2.97	-	-	-
15.36	80.8	Germacreno D	23986-74-5	2.55	-	2.98	-
15.70	84.3	Humuleno-(V1)	1000159-39-4	2.38	-	2.84	-
17.19	87.4	Φ	1000144-98-2	6.41	-	-	3.25

\* = 3,7,7-Trimetil-[1S-(1- $\alpha$ ,3- $\alpha$ , 6- $\alpha$ )]-bicyclo[4.1.0]hept-4-en-3-ol

§ = 1,4,4a,5,6,9,10,10a-Octahidro-11,11-dimetil-(1. $\alpha$ ,4. $\alpha$ ,4a. $\alpha$ ,10a. $\alpha$ )1,4-metanocicloocta[D]piridazina

Φ = 1-Metilideno-2b-hidroximetil-3,3-dimetil-4a-(3-metilbut-2-enil)-ciclohexano

Además, la emisión de  $\beta$ -ocimeno por parte de plantas dañadas por herbívoros puede inducir la emisión de éste compuesto volátil en plantas vecinas no dañadas a través de señales químicas volátiles, como el *cis*-jasmonato, emitido por la planta dañada (Pickett *et al.* 2003, Birkett *et al.* 2000). Así, el  $\beta$ -ocimeno es fundamental en la comunicación planta-planta mediante la activación de genes implicados en la defensa de las plantas mediante la activación de la vía de señalización del ácido jasmónico. De esta forma, las plantas pueden preparar defensas contra herbívoros antes de ser atacadas. En un estudio realizado por Arimura *et al.* (2000) sobre la interacción de ácaros herbívoros, ácaros depredadores, compuestos volátiles emitidos por las hojas infestadas y su efecto en las hojas no infestadas de “frijol lima” (*Phaseolus lunatus* L. cv. Sieva), descubrieron que en las hojas no infestadas se activan cinco genes de defensa cuando se exponen a compuestos volátiles de hojas infestadas, no así cuando se exponen a volátiles de hojas heridas artificialmente. El patrón de expresión de estos genes es similar al producido por la exposición al

ácido jasmónico. En este proceso, al menos tres terpenoides volátiles son responsables de esta activación génica; uno de ellos es el  $\beta$ -ocimeno, el cual indujo la expresión de los genes PR-2 y PR-3, PAL y FPS 24 h después de que las hojas sanas fueron expuestas a este compuesto.

El felandreno corresponde un par de compuestos orgánicos que tienen una estructura molecular y propiedades químicas similares. El  $\alpha$ -felandreno y el  $\beta$ -felandreno son monoterpenos cíclicos y son isómeros de doble enlace. Los aromas provenientes de estos compuestos se utilizan en fragancias ya que éstas son agradables (Wishart *et al.* 2018). El  $\beta$ -felandreno se encuentra con abundancia en aceites esenciales de algunos géneros (*Angelica* spp., *Eucalyptus* spp., *Lavandula* spp., *Mentha* spp., *Pinus* spp.). La esencia floral de orquídeas alpinas (*Chamorchis alpina* (L.) Rich.) está compuesta principalmente por  $\beta$ -felandreno y otros compuestos volátiles que sirven para atraer hormigas polinizadoras (Schiestl & Glaser 2012).

En numerosos estudios se han reportado compuestos como los que se encontraron en mayor concentración en *D. bicolor*. Por ejemplo, el hojásen (*Flourensia cernua* DC.), un arbusto del Desierto Chihuahuense, produce  $\alpha$ -pineno, sabineno, 3-careno, p-cimeno, limoneno, canfor, bomeol, *cis*-jasmonato,  $\beta$ -cariofileno,  $\alpha$ -humuleno, ledeno y flourensadiol (Estell *et al.* 1998). Mediante el aislamiento y caracterización de volátiles foliares de *Anemopsis californica* (Nutt.) Hook. ("hierba mansa") se encontraron treinta y ocho compuestos, donde los principales fueron elimicina,  $\alpha$ -pineno, sabineno,  $\beta$ -felandreno, 1,8-cineol, piperitona, metil eugenol y  $\beta$ -cariofileno. Además, el AE de *A. californica* demostró tener propiedades antimicrobianas contra 3 (*Geotrichum candidum*, *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus pneumoniae*) de 11 especies microbianas analizadas. En parte, esta bioactividad podría explicarse por el  $\alpha$ -pineno contenido en el aceite (Medina *et al.* 2005). Los ingredientes principales de las flores cultivadas de *Arnica chamissonis* Less. y *A. montana* L. fueron cumeno,  $\alpha$ -pineno, ocimeno, decanal,  $\beta$ -cariofileno,  $\alpha$ -amorfenol, D-germacreno, alcohol cariofileno y óxido de cariofileno (Sugier *et al.* 2017). 3-Careno, limoneno, ocimeno y  $\beta$ -felandreno fueron los cuatro compuestos más probables presentes en el AE de *D. bicolor*. Para futuros experimentos se sugiere identificar y cuantificar con precisión los compuestos principales del AE de esta especie con el uso de los estándares químicos. Se sugiere también estudiar los compuestos del AE de *D. bicolor* en diferentes épocas del año y determinar su dinámica temporal. Asimismo, se sugiere la realización de estudios similares en otros arbustos forrajeros de zonas áridas y semiáridas.

Con este estudio se generó conocimiento sobre la cantidad de AE que produce *D. bicolor*, sus compuestos químicos y la concentración de estos en diferentes condiciones ambientales. Se considera una contribución útil para aplicarse en proyectos y actividades destinadas a la utilización de esta especie. Esto pudiera motivar la realización de estudios más específicos para un mejor aprovechamiento de este arbusto forrajero, y de otras especies de interés. Finalmente, estos resultados son una aportación al conocimiento del metabolismo secundario de arbustos de zonas áridas y semiáridas.

## Agradecimiento

Al Dr. Jesús Prieto Amparán por su valioso apoyo en la edición de las figuras de este artículo.

## Literatura citada

Adal AM, Sarker LS, Lemke AD, Mahmoud SS. 2017. Isolation and functional characterization of a methyl jasmonate-responsive 3-carene synthase from.

- Lavandula x intermedia*. *Plant Molecular Biology* **93**: 641-657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-017-0588-6>
- Arimura G, Ozawa R, Shimoda T, Nishioka T, Boland W, Takabayashi J. 2000. Herbivory-induced volatiles elicit defense genes in lima bean leaves. *Nature* **406**: 512-515 DOI: <https://doi.org/10.1038/35020072>
- Baldwin IT. 2010. Plant volatiles. *Current Biology* **20**: R392-R397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.02.052>
- Barneby RC. 1977. Daleae Imagines, An illustrated revision of *Errazurizia* Philippi, *Psorothamnus* Rydberg, *Marina* Liebmann, and *Dalea* Lucanus emend. Barneby, including all species of Leguminosae tribe Amorphaeae Borissova ever referred to *Dalea*. New York, USA: Memoirs of the New York Botanical Garden Volume 27. ISBN: 0-89327-001-6
- Benchaar C, Calsamiglia S, Chaves AV, Fraser GR, Colombatto D, McAllister TA, Beauchemin KA. 2008. A review of plant-derived essential oils in ruminant nutrition and production. *Animal Feed Science and Technology* **145**: 209-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.04.014>
- Besser K, Harper A, Welsby N, Schauvinhold I, Slocombe S, Li Y, Dixon RA, Broun P. 2009. Divergent regulation of terpenoid metabolism in the trichomes of wild and cultivated tomato species. *Plant Physiology* **149**: 499-514. DOI: <http://www.plantphysiol.org/cgi/doi/10.1104/pp.108.126276>
- Bidgoli R, Pessarakli M, Ebrahimabadi A, Heshmati G. 2014. Relationship between grazing intensity and qualitative and quantitative changes in *Artemisia sieberi* Besser essential oil compounds in Kashan Province of Iran. *Journal of Plant Nutrition* **37**: 1690-1701. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2014.907423>
- Birkett MA, Campbell CA M, Chamberlain K, Guerrieri E, Hick AJ, Martin JL, Woodcock CM. 2000. New roles for *cis*-jasmonate as an insect semiochemical and in plant defense. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **97**: 9329-9334 DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.160241697>
- Carrillo-González R, González-Chávez MCA. 2006. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental Pollution* **144**: 84-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.006>
- Cobellis G, Trabalza-Marinucci M, Yu Z. 2016. Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: a review. *Science of the Total Environment* **545-546**: 556-568. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.103>
- Coutinho I, Cardoso C, Ré N, Melo A, Vieira M, Honda N, Coelho R. 2009. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and evaluation of antioxidant and antimicrobial activities of essential oil of *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg (Guavira). *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* **45**: 767-776. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1984-82502009000400022>

- Delazar A, Bahmani M, Shoar HH, Tabatabaei-Raisi A, Asnaashari S, Nahar L, Sarker SD. 2011. Effect of altitude, temperature and soil on essential oil production in *Thymus fedtschenkoi* flowers in Osko and surrounding areas in Iran. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* **14**: 23-29 DOI: <https://doi.org/10.1080/0972060x.2011.10643897>
- Dixit D, Srivastava NK, Sharma S. 2002. Boron deficiency induced changes in translocation of  $^{14}\text{CO}_2$ -photosynthate into primary metabolites in relation to essential oil and curcumin accumulation in turmeric (*Curcuma longa* L.). *Photosynthetica* **40**: 109-113. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020118913452>
- Dudareva N, Klempien A, Muhlemann JK, Kaplan I. 2013. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist* **198**: 16-32. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12145>
- Erasto P, Viljoen AM. 2008. Limonene - a review: biosynthetic, ecological and pharmacological relevance. *Natural Product Communications* **3**: 1193-1202.
- Estell RE, Fredrickson EL, Anderson DM, Havstad KM, Remmenga MD. 1998. Relationship of tarbush leaf surface terpene profile with livestock herbivory. *Journal of Chemical Ecology* **24**: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022399426352>
- Estell RE. 2010. Coping with shrub secondary metabolites by ruminants. *Small Ruminant Research* **94**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.09.012>
- Estell RE, Havstad KM, Cibils AF, Fredrickson EL, Anderson DM, Schrader TS, James DK. 2012. Increasing shrub use by livestock in a world with less grass. *Rangeland Ecology & Management* **65**: 553-562. DOI: <https://doi.org/10.2111/REM-D-11-00124.1>
- Farré-Armengol G, Filella I, Llusà J, Peñuelas J. 2017.  $\beta$ -Ocimene, a key floral and foliar volatile involved in multiple interactions between plants and other organisms. *Molecules* **22**: 1148. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules22071148>
- Fäldt J, Arimura G, Gershenzon J, Takabayashi J, Bohlmann J. 2003. Functional identification of AtTPS03 as (E)-beta-ocimene synthase: a monoterpene synthase catalyzing jasmonate- and wound-induced volatile formation in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* **216**: 745-751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0924-0>
- Gelviz-Gelvez SM, Pavón NP, Illoldi-Rangel P, Ballesteros-Barrera C. 2015. Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico. *Ecological Engineering* **74**: 302-309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.082>
- Ghirardo A, Koch K, Taipale R, Zimmer I, Schnitzler JP, Rinne J. 2010. Determination of de novo and pool emissions of terpenes from four common boreal/alpine trees by  $^{13}\text{CO}_2$  labelling and PTR-MS analysis. *Plant, Cell and Environment* **33**: 781-792. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02104.x>
- González-Chávez MCA, Sánchez-López AS, Carrillo-González R. 2015. Arsenic concentration in wild plants growing on two mine tailings. *Pharmacognosy Communications* **5**: 197-206. DOI: <https://doi.org/10.5530/pc.2015.3.5>
- Guefrachi I, Rejili M, Mahdhi M, Mars M. 2013. Assessing genotypic diversity and symbiotic efficiency of five rhizobial legume interactions under Cadmium stress for soil phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation* **15**: 938-951. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751350>
- Gutiérrez-Luna R, Rodríguez-Tenorio D, Martínez-Trejo G, Aguirre-Calderón C, Sánchez-Gutiérrez RA. 2012. Bancos de proteína para rumiantes en el semiárido mexicano. Folleto Técnico Número 47. México, DF: Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC- INIFAP. ISBN: 978-607-425-970-4
- Hernández-Ochoa L, Aguirre-Prieto YB, Nevarez-Moorillon GV, Gutierrez-Mendez N, Salas-Muñoz E. 2014. Use of essential oils and extracts from spices in meat protection. *Journal of Food Science and Technology* **51**: 957-963. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0598-3>
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Knudsen JT, Eriksson R, Gershenzon J, Ståhl B. 2006. Diversity and distribution of floral scent. *The Botanical Review* **72**: 1-120.
- Lisec J, Schauer N, Kopka J, Willmitzer L, Fernie AR. 2006. Gas chromatography mass spectrometry-based metabolite profiling in plants. *Nature Protocols* **1**: 387-396. DOI: <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.59>
- Liu ZL, Yang K, Bai PH, Zhou L, Liu SL, Liu QZ. 2014. Gas chromatography-mass spectrometric analysis of essential oil of aerial parts of *Glycosmis parviflora* (Sims) Little (Rutaceae). *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* **13**: 275-280. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/tjpr.v13i2.17>
- Markó G, Gyuricza V, Bernáth J, Altbacker V. 2008. Essential oil yield and composition reflect browsing damage of junipers. *Journal of Chemical Ecology* **34**: 1545-1552 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10886-008-9557-5>
- Medina AL, Lucero ME, Holguin FO, Estell RE, Posakony J, Simon J, O'Connell MA. 2005. Composition and antimicrobial activity of *Anemopsis californica* leaf oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **53**: 8694-8698. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jf0511244>



- Mellado M, Valdez R, Lara LM, López R. 2003. Stocking rate effects on goats: a research observation. *Journal of Range Management* **56**: 167-173. DOI: <https://doi.org/10.2307/4003901>
- Noguez-Inesta A, López-Sánchez AS, Carrillo-González R, González-Chávez MCA. 2017. Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación. *Agroproductividad* **10**: 57-62.
- Ormeño E, Fernandez C, Mévy J. 2007. Plant coexistence alters terpene emission and content of mediterranean species. *Phytochemistry* **68**: 840-852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.11.033>
- Pavarini DP, Pavarini SP, Niehues M, Lopes NP. 2012. Exogenous influences on plant secondary metabolite levels. *Animal Feed Science and Technology* **176**: 5-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.002>
- Pickett JA, Rasmussen HB, Woodcock CM, Matthes M, Napier JA. 2003. Plant stress signalling: understanding and exploiting plant-plant interactions. *Biochemical Society Transactions* **31**: 123-127. DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0310123>
- Saadati S, Moallemi N, Mortazavi SMH, Seyyednejad SM. 2013. Effects of zinc and boron foliar application on soluble carbohydrate and oil contents of three olive cultivars during fruit ripening. *Scientia Horticulturae* **164**: 30-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.033>
- Sánchez-López AS, González-Chávez MCA, Carrillo-González R, Vangronsveld J, Díaz-Garduño M. 2015. Wild flora of mine tailings: perspectives for use in phytoremediation of potentially toxic elements in a semi-arid region in Mexico. *International Journal of Phytoremediation* **17**: 476-484. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.922922>
- SAS. 2006. SAS software. Version 9.1.3 Cary: SAS. Institute Inc.
- Schiestl FP, Glaser F. 2012. Specific ant-pollination in an alpine orchid and the role of floral scent in attracting pollinating ants. *Alpine Botany* **122**: 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00035-011-0098-0>
- Siqueiros-Delgado ME, Rodríguez-Avalos JA, Martínez-Ramírez J, Sierra-Muñoz JC. 2016. Situación actual de la vegetación del estado de Aguascalientes, México. *Botanical Sciences* **94**: 455-470. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.466>
- SMN [Servicio Meteorológico Nacional]. 2018. Comisión Nacional del Agua. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih> (accessed November 15, 2018).
- Sugier D, Sugier P, Kowalski R, Kołodziej B, Olesińska K. 2017. Foliar boron fertilization as factor affecting the essential oil content and yield of oil components from flower heads of *Arnica montana* L. and *Arnica chamissonis* Less. cultivated for industry. *Industrial Crops & Products* **109**: 587-597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.014>
- Tsolakis N, Bam W, Srai JS, Kumar M. 2019. Renewable chemical feedstock supply network design: the case of terpenes. *Journal of Cleaner Production* **222**: 802-822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.108>
- Verma NY, Shukla S. 2015. Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites. *Journal of Applied Research on Medical and Aromatic Plants* **2**: 105-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.09.002>
- Voxeur A, Fry SC. 2014. Glycosylinositol phosphorylceramides (GIPCs) from rosa cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnogalacturonan II. *Plant Journal* **79**: 139-149. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.12547>
- Warren LE, Ueckert DN, Shelton M, Chamrad AD. 1984. Spanish goat diets on mixed-brush rangeland in the South Texas Plains. *Journal of Range Management* **37**: 340-342.
- Wesołowska A, Jadczyk P, Kulpa D, Przewodowski W. 2019. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of essential oils from AgNPs and AuNPs elicited *Lavandula angustifolia* *in vitro* cultures. *Molecules* **24**: 606. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24030606>
- Wishart DS, Feunang YD, Marcu A, Guo AC, Liang K, Vázquez-Fresno R, Sajed T, Johnson D, Li C, Karu N, Sayeeda Z, Lo E, Assempour N, Berjanskii M, Singhal S, Arndt D, Liang Y, Badran H, Grant J, Serra-Cayuela A, Liu Y, Mandal R, Neveu V, Pon A, Knox C, Wilson M, Manach C, Scalbert A. 2018. HMDB 4.0: The human metabolome database for 2018. *Nucleic Acids Research* **46**: 608-617. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1089>
- Zahid M, Arif M, Rahman MA, Singh K, Mujahid M. 2017. Solvent extraction and gas chromatography-mass spectrometry analysis of *Annona squamosa* L. seeds for determination of bioactives, fatty acid/fatty oil composition, and antioxidant activity. *Journal of Dietary Supplements* **15**: 613-623 DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19390211.2017.1366388>
- Zhao J, Davis LC, Verpoorte R. 2005. Elicitor signal transduction leading to production of plant secondary metabolites. *Biotechnology Advances* **23**: 283-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.01.003>

**Editor de Sección:** Sol Cristians

**Contribución de los autores:** SVM concibió y realizó el estudio, escribió el manuscrito. FVG concibió y participó en el estudio, revisó el manuscrito. LRHO concibió el procedimiento de análisis químico, revisó el manuscrito. NIAO concibió y participó en el proceso de análisis químico.