

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Identificación de ecotipos de *Agave maximiliana* Baker y su diferencia en la producción de biomasa y azúcares reductores totales

Identification of ecotypes of *Agave maximiliana* Baker and their differences in biomass production and total reducing sugars

Authors/Autores: Cachúa-Torres, A., Andrade-González, I., Chávez-Rodríguez, A., López Muraira, I.G.

ID: e1725

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1725>

Received/Fecha de recepción: August 21th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: December 05th 2024

Available online/Fecha de publicación: January 7th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Cachúa-Torres, A., Andrade-González, I., Chávez-Rodríguez, A., López Muraira, I.G. (2025). Identification of ecotypes of *Agave maximiliana* Baker and their differences in biomass production and total reducing sugars. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1725. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1725>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Identificación de ecotipos de *Agave maximiliana* Baker y su diferencia en la producción de biomasa y azúcares reductores totales

Identification of ecotypes of *Agave maximiliana* Baker and their differences in biomass production and total reducing sugars

Ecotipos de Agave maximiliana, biomasa y azúcares reductores/ Agave maximiliana ecotypes, biomass, and reducing sugar

Cachúa-Torres, A.¹ (ORCID), Andrade-González, I.¹ (ORCID), Chávez-Rodríguez, A.² (ORCID), López Muraira, I.G.^{1*} (ORCID)

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México/ I.T. Tlajomulco Km 10, Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán. C.P. 45645 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México.

²Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara. C. P. 45641, Km 3.5 Carretera Tlajomulco a Santa Fé, No. 595, Lomas de Tejeda, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México

*Corresponding Author:

Irma G. López Muraira, Isaac Andrade González. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México/ I.T. Tlajomulco Km 10, Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán. C.P. 45645 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. Phone: (+52) 333 1064265. E-mail: irma.lm@tlajomulco.tecnm.mx.

RESUMEN

La raicilla es un destilado, producto del fermento de jugos de piñas de *Agave maximiliana*, que se encuentran en forma silvestre en las Sierras Occidental del Estado de Jalisco. Por lo que el objetivo de este trabajo consistió en la identificación de los diferentes ecotipos de *Agave maximiliana* existente en la sierra Occidental del Estado de Jalisco, con su diferenciación en la producción de biomasa y azúcares reductores. El trabajo se desarrolló en el 2020 en Mascota, Jalisco a 195 km al poniente de Guadalajara, México. Se cuantificó la producción de biomasa de cada ecotipo identificado, llevando a cabo, colectas de cuatro ejemplares, de crecimientos de 2 a 8 años, pesando cada piña, donde cada peso representa una repetición. La cuantificación de los azúcares reductores se realizó por la técnica DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico). Se identificaron 7 variantes, en los cuales la biomasa entre ellos no muestra diferencia estadística los primeros 3 años. A los 8 años el rendimiento promedio varió de 14.25 kg hasta 47.87 kg según el ecotipo. La producción de azúcares reductores mostró rangos de 32 % hasta 83 %. Los mejor ecotipos según su producción de biomasa y azúcares reductores totales fueron los ecotipos denominados Típica y Costillona.

PALABRAS CLAVE:

Agave maximiliana, Biomasa, Ecotipos, Azúcares reductores.

BSTRACT

Raicilla is a distilled beverage made from the fermented juice of *Agave maximiliana* pineapples, which grow wild in the Sierra Occidental of the Jalisco state. This study aimed to identify the different ecotypes of *Agave maximiliana* present in the Sierra Occidental of the Jalisco state and distinguish their biomass production and reducing sugar content. This work was carried out in 2020 in Mascota, Jalisco, located 195 km west of Guadalajara, Mexico. Biomass production was measured for each identified ecotype by collecting samples from four plants, aged between 2 and 8 years. Each agave pineapple was weighed, with each weight representing one replicate. Reducing sugars were quantified using the DNS (3,5-dinitrosalicylic acid) technique. Seven variants were identified, with no significant statistical difference in biomass between them in the first three years. By eight years, the average yield ranged from 14.25 kg to 47.87 kg, depending on the ecotype. Reducing sugar production ranged from 32 % to 83 %. The ecotypes identified as Typical and Ribbed were the best regarding biomass production and total reducing sugars.

KEYWORDS:

Agave maximiliana, Biomass, Ecotypes, Reducing sugars.

Introducción

La raicilla es una bebida alcohólica tradicional de México, específicamente originaria del Estado de Jalisco. Se produce mediante la destilación de los jugos fermentados de varias especies de agave, principalmente del *Agave maximiliana*. Esta bebida se elabora en 16 municipios del Estado de Jalisco y uno de Nayarit según la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-257-SE-2021. Al igual que las otras especies de *Agave* spp., empleadas para producir bebidas espirituosas, el *Agave maximiliana* a través del tiempo produce alta concentración de fructanos que están constituidos por cadenas de monosacáridos fermentables como la glucosa y la fructosa (Mancilla & López, 2006). Sin embargo, desde la creación del Consejo Regular de la raicilla instituido el año 2000 y el reconocimiento de la denominación de origen (DO) alcanzado el 28 de junio del 2019, la importancia de establecer las características del *A. maximiliana*, toma gran importancia para los productores de la raicilla, que podrían alcanzar una ventaja competitiva en el mercado (López-Santiago *et al.*, 2023). El *A. maximiliana* es conocido por presentar diferentes ecotipos o variantes adaptadas a distintas condiciones ambientales dentro de su área de distribución en México. Sin embargo, no existe un número específico y fijo de ecotipos reconocidos oficialmente, ya que la variabilidad puede ser bastante amplia y la clasificación puede depender de criterios específicos utilizados por botánicos y especialistas en agaves. Los ecotipos suelen distinguirse por características como la forma y coloración de las hojas, el tamaño de la planta y adaptaciones específicas al clima y al suelo de diferentes regiones. Estas variaciones adaptativas permiten que el *Agave maximiliana* prospere en una variedad de condiciones ecológicas, desde zonas semiáridas hasta áreas más áridas o montañosas. En términos generales, se reconoce que el *A. maximiliana* muestra una notable diversidad genética y fenotípica a lo largo de su rango de distribución, lo que subraya su importancia ecológica y potencial para la conservación y el uso sostenible (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2007). En la actualidad, solo existen cinco especies reconocidas para la elaboración de raicilla, dos corresponden a la zona costa y tres a la zona sierra; de estas últimas el *A. maximiliana* es la principal fuente de materia prima ya que con ella se produce el 90 % de la raicilla de la sierra en México y es endémica de nuestro país (García-Mendoza, 1995), se distribuye en Durango, Sinaloa, Nayarit,

Jalisco, Zacatecas y Colima (Mc Vaugh, 1989; González *et al.*, 2009). *A. maximiliana* hasta el 2003, era catalogada como especie forestal no maderable, y su uso y aprovechamiento, estaban regulados por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, donde se establecía que en el bosque se podía cosechar solo el 80 % de plantas maduras, dejando florecer el 20 % de la población para fines de conservación de la especie, factor muy importante, debido que históricamente la bebida de la raicilla de la Sierra Occidental, se elaborara mediante la colecta de plantas maduras que crecen principalmente de manera silvestre. Los productores de la bebida de raicilla aprovechan solo las plantas maduras cuyo indicador es la presencia del escapo floral que de acuerdo con Santacruz-Ruvalcaba (2022) se alcanza entre los 12 y 14 años, ya que se desarrolla bajo condiciones de sombreado de los árboles principalmente de *Quercus*. Cuando la planta se produce en condiciones de cultivo a cielo abierto, el ciclo puede reducirse a una edad de 5 a 7 años. Por su forma de multiplicación por semilla, el *A. maximiliana* manifiesta una alta variación intraespecífica (Valenzuela & Gaytan, 2012) y, como consecuencia, presenta alta variabilidad fenotípica en formas y tamaños de plantas. Sin embargo, se ha observado que la bebida de raicilla producida por *Agave maximiliana* producen una variedad de aromas y tipos de alcoholes que las diferencian e identifican, ya que la producción de metanol en los destilados de *A. maximiliana* son significativamente menores que en los destilados obtenidos de *A. tequilana* (De León-Rodríguez *et al.*, 2008). Por tal motivo, el objetivo del presente estudio, fue identificar los diferentes ecotipos de *Agave maximiliana* existente en la Sierra Occidental del Estado de Jalisco, con su diferenciación en la producción de biomasa y azúcares reductores.

Material y Métodos

Área de estudio.

El trabajo se desarrolló en el municipio de Mascota ubicado en la Región Sierra Occidental en el Estado de Jalisco a 195 km de la Ciudad de Guadalajara, México. Se localiza a los 20° 32' de latitud N y 104° 48' de longitud W. El clima de acuerdo con la clasificación de Köepen modificado por Ruiz-Corral *et al.* (2021) es (A) C (wo)(w) a es semicálido de baja humedad, precipitaciones en verano, escasa en invierno con temperatura media de 21.8 °C y la altitud es 1401 masl. El tipo de vegetación es bosque de pino-encino, y cuenta con especies como *Pinus oocarpa*, *P. lumholtzii*, *P. douglasiana*, *P. devoniana* (Mc Vaugh, 1992) *Quercus excelsa*, *Q. laeta*, *Q. magnifolia*, *Q. obtusata* (González, 1986).

Identificación de ecotipos.

Por su forma de reproducción *A. maximiliana* presenta una alta variabilidad genética y fenotípica, manifestándose en la zona de estudio como un compuesto de distintos tipos de individuos, por lo que se planteó como necesidad distinguir y diferenciar los distintos ecotipos que conforman dicha especie considerando las características morfológicas pertinentes y estables que fueron:

1. Longitud, anchura, consistencia y forma de las hojas.
2. Forma del corte transversal de la base de las hojas.
3. Curvatura, borde, textura, glaucescencia e intensidad del color de las hojas.

4. Forma, color y uniformidad de las espinas laterales de las hojas.
5. Forma y longitud de las espinas terminales

Para la asignación de nombres a cada ecotipo se efectuaron entrevistas abiertas en el campo en forma de mesa redonda que sirvieron para definirlos por consenso participando productores, colectores de plantas, maestros raicilleros (personas que aprendieron el oficio de generación en generación) y académicos.

Botánicamente los ejemplares colectados fueron identificados usando las claves taxonómicas de Gentry (1982) y por comparación se corroboraron con ejemplares depositados en el Herbario IBUG. Una copia de las pencas de cada ejemplar fue depositada en el Herbario del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco (CREG) con el número de registro 9761, 9765, 9766, 9767, 9768, 9774, 9775.

Todas las muestras, colectadas para la identificación de los ecotipos, se definieron plantas de 6 años de edad, identificadas por los productores de la región.

Biomasa aprovechable.

Para el estudio de la producción de biomasa aprovechable se consideró la “piña” que está conformada por el tallo y los segmentos basales de las hojas o pencas adheridos al mismo después de la jima o cosecha, (Figura 1) (Rendon-Salcido, 2007). Se pesaron en una báscula de piso con precisión de 0.5 g (marca Ohaus, modelo, Estados Unidos) cuatro individuos por cada uno de los ecotipos identificados a edades desde dos hasta ocho años reportándose el peso en kilogramos. Las plantas cosechadas se eligieron al azar en función de su fenotipo.



Figura 1. Imagen de la biomasa aprovechable o “piña”, que está conformada por el tallo y la base de las hojas de *Agave maximiliana*.

Azúcares reductores.

La determinación de azúcares reductores, se llevó a cabo en la planta piloto del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, donde se extrajeron los jugos del tallo y de los segmentos basales de las hojas que conforman la piña utilizando un extractor de jugo casero para acumular un volumen de entre 200 y 250 mL. Dicha acción se realizó en cada ecotipo desde los dos hasta los ocho años.

La técnica usada para la determinación de azúcares reductores fue mediante la utilización del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) (Bello *et al.* 2006), cuya preparación consistió en lo siguiente: se pesaron 5 g de ácido 3,5 dinitrosalicílico, 150 g de tartrato de Na-K y 8 g de NaOH en 200 mL de agua destilada. Inicialmente se añadió lentamente en agitación constante el tartrato de Na-K, después se aforó con agua destilada hasta 400 mL y finalmente se añadió lentamente el ácido 3,5 dinitrosalicílico. Se dejó en agitación constante toda la noche y se aforó a 500 mL.

La preparación de las muestras para la determinación de azúcares reductores totales mediante la técnica por DNS fue la siguiente:

Se tomó 1mL de jugo y se llevó a 100 mL de agua destilada, se le adicionó 5 mL de ácido clorhídrico al 50 % y se llevó a baño maría a temperatura de 65 °C durante 10 minutos para realizar la hidrólisis de los azúcares; posteriormente se dejó enfriar y se hizo reaccionar con el reactivo de DNS.

Para la curva de calibración se prepararon soluciones de glucosa a concentraciones de 60, 80, 100, 120 y 140 g/L.

En tubos de cristal de 10 mL se adicionaron 0.5 mL de muestra y 0.5 mL del reactivo de DNS. Los tubos se colocaron en baño maría a 100 °C por 5 minutos, se enfrían hasta temperatura ambiente y se les añaden 5 mL de agua destilada. Se agitan y se realiza la lectura en un espectrofotómetro digital Vis (Milton Roy, Espectronic 21, Estados Unidos) a 540 nm usando como blanco la mezcla del reactivo de DNS con agua destilada.

Las lecturas de azúcares reductores totales se midieron en miligramos por gramo de materia prima y se reportaron en porcentaje (p/p).

Análisis Estadístico

Se realizaron los análisis estadísticos con el paquete Statgraphics centurión XVI, utilizando un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones, donde los tratamientos fueron los ecotipos identificados desde los dos hasta los ocho años, cuyas variables de estudio fueron la producción de azúcares reductores totales en tallo y en los segmentos de las pencas adheridas al mismo y el peso de la biomasa. La identificación de las diferencias significativas se realizó mediante un análisis de varianza por Tukey, con un nivel de confianza del 95 %.

Resultados y Discusión

Identificación de los ecotipos.

En la Figura 2, se identifican los diferentes ecotipos encontrados en la región Sierra Occidental del estado de Jalisco.

El ecotipo Típica que se muestra en la Figura 2a., tiene más frecuencia en las poblaciones silvestres con proporciones mayores al 40 %; las hojas son rectas, semi erectas las espinas laterales amarillas a marrón sin protuberancias o mamones entre ellas.

El ecotipo Dientes Negros (Figura 2b), se caracteriza por la marcada coloración negra de las espinas tanto laterales como la apical, distintiva en todas las etapas de la vida de la planta.

El ecotipo Costillona (Figura 2c), presenta las hojas semi erectas y anchas y en paralelo de la longitud de la hoja se forman protuberancias parecidas a costillas que le dan consistencia a las hojas a pesar de ser anchas.

El ecotipo Punta Plegada (Figura 2d), se caracteriza porque la parte cercana a la punta de las hojas se pliega a manera de canaleta y cierra a la hoja hacia la parte distal.

El ecotipo Muesqueada (Figura 2e), presenta como el principal referente, una marcada protuberancia profunda entre espina y espina que se encuentran en la periferia de las hojas.

El ecotipo Lengua de Vaca (Figura 2f), sus hojas presentan una curvatura cóncava después del 50 % de su longitud hacia la punta.

El ecotipo Pencas Caídas (Figura 2g), tiene como particularidad que las hojas no tienen la consistencia para permanecer erectas, dando la impresión de que durante su desarrollo buscan la manera de reposar en el piso.

En cuanto a la presencia de mamones en los márgenes de las hojas, todos los ecotipos los manifestaron, el ecotipo típica, en algunos individuos no lo presentó de manera muy evidente y el muesqueada es el que manifiesta protuberancias más marcadas. Para la coloración de las hojas, se presentó un gradiente de intensidad, el cual va del verde oscuro en Típica hasta verde más claro en Muesqueada.

Cabrera *et al.* (2022), compararon diversas variantes de agaves empleadas en la producción de bebidas alcohólicas y al igual que en el presente estudio se encontraron una gran heterogeneidad en las variantes usadas y más aún cuando emplean variedades silvestres, lo que puede dar pauta para definir una estandarización del proceso de producción de la bebida de raicilla.

Algunos indicadores diferenciados de los ecotipos se presentan en la Tabla 1, donde se observa que existen diferencias importantes en las características; longitud, ancho de hoja y altura de los dientes entre algunos ecotipos. En el caso de las variantes Dientes Negros, Lengua de Vaca y Pencas Caídas son similares no presentan una diferencia significativa en longitud y ancho de las hojas, y estos dos últimos también son similares en altura de los dientes.

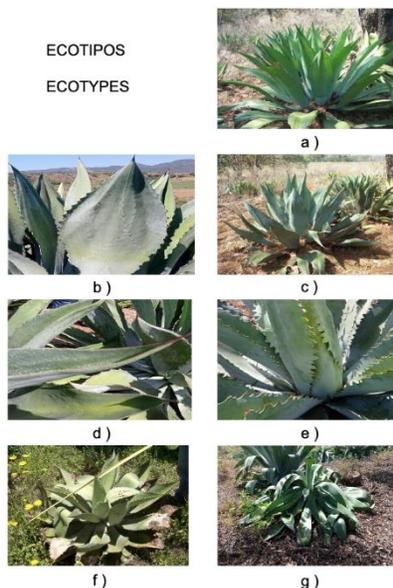


Figura 2. Ecotipos identificados la sierra occidental del estado de Jalisco, empleados para la producción de raicilla: a) Típica, b) Diente Negro, c) Costillona, d) Punta Plejada, e) Muesqueada, f) Lengua de Vaca y g) Pencas Caídas.

Adicionalmente en la Tabla 1 se observan los contrastes en cuanto al largo y ancho de las hojas de los ecotipos evaluados a la edad de 6 años, en donde se observa que el Punta Plegada presentó los valores más grandes en cuanto longitud de la hoja y la Muesqueada las hojas fueron más cortas. Sin embargo, los mayores valores de anchura, lo presentó la Costillona y con el menor valor de anchura la Típica. En lo que respecta, a la altura de los dientes, la Muesqueada mostró la mayor altura y la Típica las más pequeñas. Autores como Nobel (1987), establecen que el ancho es proporcional a los cambios a en el largo de la hoja, lo cual no se observa en el presente estudio. Cabe resaltar que los trabajos realizados por Nobel (1987) fueron en diferentes variedades de agave en desarrollo, lo cual al existir esta gran variabilidad entre las especies siendo una de las razones por la que no se demuestra esta proporcionalidad. Los datos presentados en la Tabla 1 son valores promedio de cuatro plantas por ecotipo.

Producción de biomasa (peso de piñas).

El peso de las piñas de los diferentes ecotipos mostraron un incremento marcado a partir de los 5 años (Tabla 2), aunque se cosecha desde los 6 en adelante que es cuando algunas plantas presentan su madurez (emisión del escapo floral) bajo condiciones de cielo abierto, para la producción de la raicilla.

Las piñas de dos años pesaron en promedio 0.145 kg. Para las de tres años el promedio fue de 1.645 kg. Este patrón indica que las plantas están en una etapa activa de crecimiento. Sin embargo, no se presenta diferencia estadística significativa en ambas edades.

Tabla 1. Características distintivas por tipo de pencas en los siete ecotipos de *Agave maximiliana*.

Ecotipo	Longitud de la hoja (cm)	Ancho de la hoja (cm)	Altura de los dientes (con mamonos) (cm)
Típica	107	14.0	0.3
Dientes Negros	99	16.5	0.9
Costillona	98	28.0	0.8
Punta Plegada	130	19.6	1.3
Muesqueada	63	17.5	1.5
Lengua de Vaca	96	19.7	0.6
Pencas Caídas	94	17.5	0.6

El peso promedio de las piñas a los 4 años fue de 2.607 kg, a los 5 años 13.938 kg, a los 6 años 19.571 kg, a los 7 años 27.679 kg y a los de 8 años 34.125 kg observándose diferencia estadística significativa entre ecotipos dentro de cada edad.

Esto es sumamente importante para la producción de raicilla, ya que se relaciona la cantidad de kilos de biomasa necesarios para la producción de un litro de destilado, que oscila de 10 a 12 kilogramos por litro. Si el enfoque fuera saber cuál ecotipo es más deseable, se elegiría el Punta Plegada, la Costillona o la Típica por ser los que tienen mejores promedios en kg a los 7 y 8 años. Cabe mencionar que la edad de cosecha en el caso de esta especie no es uniforme por edad ya que el indicador es la madurez que se manifiesta cuando se emite el escapo floral y no es homogéneo dentro de estos ecotipos.

Comparado con lo que reportan Corbin *et al.* (2016) el promedio del peso de la piña de *Agave maximiliana* es menor al *A. tequilana*, sin embargo, cabe mencionar que las variedades de agave fueron diferentes y el número de años de crecimiento también. Es bien sabido que el crecimiento de la biomasa, depende de muchos factores entre ellos, edad, nutrición, estrés biótico y abiótico y variedad o ecotipo dentro de la especie como se observa en el presente trabajo. Castillejos-Reyes *et al.* (2023) también encontraron mayor biomasa en un agave coyote de Oaxaca, en un estudio de manejo agronómico para la producción de mezcal, esto significa que el *Agave maximiliana* es pequeño en biomasa que otros agaves empleados para producir bebidas alcohólicas.

Tabla 2. Comparación de medias basada en el peso promedio (kg) de siete ecotipos de *A. maximiliana* a edades de dos a ocho años.

Ecotipos	2	3	4	5	6	7	8
Típica	0.22 ^{a*}	2.03 ^a	4.13 ^a	15.69 ^{ab}	29.75 ^a	40.13 ^b	46.50 ^a

Dientes Negros	0.10 ^a	1.34 ^a	2.68 ^{abc}	7.13 ^b	23.50 ^a	43.1 ^a	37.50 ^{abc}
Costillona	0.12 ^a	1.88 ^a	3.56 ^{abc}	9.13 ^{ab}	28.75 ^a	27.00 ^d	47.88 ^a
Punta Plegada	0.06 ^a	1.25 ^a	1.81 ^c	24.63 ^{ab}	30.00 ^a	21.13 ^e	42.25 ^{ab}
Muesqueada	0.14 ^a	1.69 ^a	1.69 ^c	13.56 ^{ab}	11.50 ^b	26.75 ^d	30.50 ^{abc}
Lengua de Vaca	0.26 ^a	1.48 ^a	1.81 ^c	11.44 ^{ab}	5.75 ^b	30.25 ^c	14.25 ^c
Pencas Caídas	0.15 ^a	1.86 ^a	2.56 ^{bc}	16.00 ^{ab}	7.75 ^b	12.88 ^f	20.00 ^c
Valor de LSD	0.37249	1.0519	2.3354	10.8396	9.8498	20.9046	27.4516

* Letras diferentes muestran diferencia significativa a un $\alpha = 95\%$

Cuantificación de azúcares reductores.

El indicador de azúcares reductores como parte integral de las piñas, para la producción de destilados, es el más importante junto con la producción de biomasa, ya que este par de componentes definen la cantidad de alcohol que se puede obtener por volumen o por unidad de superficie cultivada.

El contenido de azúcares se observa en la Tabla 3, donde se puede observar que el incremento del contenido de azúcares reductores incrementa conforme va desarrollándose la planta a través de los años, solo del año séptimo al octavo se observó que disminuye significativamente para alguno de los ecotipos, y el posible motivo podría ser, el retiro tardío del escapo floral, perdiendo gran parte de los azúcares para la producción de energía de la misma planta. Estos resultados están de acuerdo con los datos reportados por Arrizon *et al.* (2010) y Mellado-Mojica & López (2012) que también mostraron tendencias similares en la acumulación de carbohidratos solubles en variedades de *Agave spp.*

Además, también se observó que los ecotipos Muesqueada, Costillona y Lengua de vaca exhiben los más altos contenidos de azúcares reductores totales, como se muestra en la Tabla 3. Considerando la producción de biomasa y los azúcares reductores totales de la piña, los ecotipos “Dientes Negros”, “Lengua de Vaca” y “Costillona” pudieran ser las mejores alternativas para obtener la mayor producción de alcohol, seguida por las variedades “Punta Plegada” y “Típica”, siendo esta última la más precoz. La variedad “Lengua de Vaca” es una de las que más azúcares reductores totales produce, pero es la que tiene menos potencial para producir biomasa.

En la Tabla 4 se muestran la distribución de los azúcares reductores de las partes de la piña de agave que esta conformada por el tallo y las pencas basales, observándose que las pencas basales contienen, casi la misma proporción de azúcares reductores que tallo, marcando la pauta de porque se emplean también para la producción de bebidas espirituosas las pencas basales. Sin embargo, se puede determinar también que los azúcares de las pencas basales muestran una diferencia significativa entre los distintos ecotipos. Los valores de las medias de azúcares reductores totales de la piña a los 6, 7 y 8 años de la planta oscilaron entre el 32.20 y 83.07 %; en el caso de *A. tequilana* esa proporción va de los 27.08 y 32.69 % (Bautista-Justo *et al.*, 2001) para los meses de enero a mayo, que es similar a la cosecha de raicilla por ser época de secas. Montañez-Soto *et al.* (2011)

menciona también que el contenido de azúcares reductores totales del *A. tequilana* de 80.20% , es muy parecida a los ecotipos “Lengua de Vaca” y “Dientes Negros”, alcanzando porcentajes de 83.07 y 83.04 % respectivamente como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Contenido de azúcares reductores totales (%) de la piña de 2 a 8 años de los diferentes ecotipos.

Ecotipos	2 años	3 años	4 años	5 años	6 años	7 años	8 años
Típica	37.35 ^{a*}	28.60 ^d	37.31 ^a	26.61 ^d	34.16 ^b	40.27 ^b	39.95 ^d
Dientes Negros	36.70 ^b	36.14 ^a	36.91 ^a	36.16 ^a	30.86 ^c	37.06 ^c	40.74 ^c
Costillona	35.98 ^c	36.99 ^a	26.98 ^d	36.99 ^a	31.38 ^c	57.28 ^a	45.39 ^b
Punta Plegada	31.14 ^d	31.58 ^c	34.93 ^b	36.70 ^a	36.54 ^a	38.85 ^c	37.03 ^e
Muesqueada	32.87 ^d	21.74 ^e	29.37 ^c	31.37 ^c	34.64 ^b	37.32 ^c	49.08 ^a
Lengua de Vaca	34.73 ^c	33.96 ^b	35.45 ^b	35.01 ^b	33.72 ^b	34.50 ^d	46.14 ^b
Pencas Caídas	28.20 ^e	36.22 ^a	36.46 ^a	35.29 ^b	36.99 ^a	38.23 ^c	40.34 ^c

* Letras diferentes muestran diferencia significativa a un $\alpha = 95\%$

Tabla 4. Caracterización de los ecotipos por los azúcares reductores totales de 6 a 8 años en corazón y hoja basales.

	Edad (años)	T ¹	DN ¹	Cost ¹	PP ¹	Mues ¹	LV ¹	PC ¹
(%) Azúcares reductores totales en hojas	6	53.75 ^{a**}	37.71 ^c	40.83 ^b	24.06 ^e	41.42 ^b	37.08 ^d	38.93 ^c
	7	24.10 ^e	41.20 ^a	37.63 ^b	40.67 ^a	29.17 ^d	33.34 ^c	37.94 ^b
	8	51.66 ^b	51.65 ^b	66.21 ^a	41.95 ^d	46.75 ^c	41.67 ^d	30.18 ^e
(%) Azúcares reductores totales en tallo	6	43.34 ^c	53.01 ^a	43.89 ^c	51.52 ^b	42.22 ^d	42.24 ^d	41.59 ^e
	7	45.70 ^c	81.34 ^a	41.04 ^d	37.02 ^e	32.20 ^f	41.40 ^d	57.37 ^b
	8	57.61 ^e	83.04 ^b	79.57 ^c	44.28 ^f	59.75 ^d	83.07 ^a	42.65 ^g

**T =Típica, DN= Dientes Negros, Cost= Costillona, PP= Punta Plegada, Mues= Muesqueada, LV= Lengua de Vaca, PC= Pencas Caídas

* Letras diferentes muestran diferencia significativa a un $\alpha = 95\%$

Conclusiones

Se identificaron siete ecotipos de *Agave maximiliana* en la región de la Sierra Occidental del Estado de Jalisco, etiquetados en este trabajo como: Típica, Dientes Negros, Costillona, Punta Plegada, Muesqueada, Lengua de Vaca y Pencas Caídas.

En cuanto a la producción de azúcares reductores totales, los ecotipos Costillona y Lengua de Vaca fueron las que presentaron la mayor concentración de azúcares reductores. Tomando en

consideración la producción de biomasa en la piña completa. Los ecotipos “Dientes Negros”, “Lengua de Vaca” y “Costillona” pudieran ser las mejores alternativas para obtener los mayores rendimientos de la bebida de raicilla, seguidos por los ecotipos “Punta Plagada” y “Típica”, siendo este último el más precoz. El ecotipo “Lengua de Vaca” es uno de los que más azúcares reductores totales produce, pero es el que tiene menos potencial para producir biomasa.

En lo correspondiente a la producción de biomasa, se observaron ecotipos con un crecimiento diferencial, cubriendo el rango desde 14.25 hasta 47.88 kg por piña a la edad de 8 años. Un punto a destacar es que a partir de los 6 años el peso de las piñas en promedio aumenta marcadamente, es decir del año 6 al 7 el peso se incrementó 19 % y de los 6 a los 8 años el peso se incrementó 25 %.

Por la forma en que se produce la raicilla se deben considerar valores promedio pues no se pueden separar ecotipos, ya que esta biodiversidad debe concebirse como una riqueza regional. La caracterización morfológica del presente trabajo puede contribuir a la protección de este tipo de agave endémico de México, y con ello promover su conservación y aprovechamiento sustentable.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, Alfredo Cachúa Torres; desarrollo de la metodología, Isaac Andrade González, Alejandra Chávez Rodríguez; Alfredo Cachúa Torres; escritura y preparación del manuscrito, Alfredo Cachúa Torres, Isaac Andrade González, I.G. López-Muraira; redacción, revisión y edición. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada con fondos propios de los autores

Declaración de consentimiento informado

Esta declaración no aplica para el presente trabajo.

Agradecimientos

Al ITTJ por el apoyo brindado al primer autor para realización de estudios de posgrado. A Manuel Salcedo Gutiérrez, Rubén Peña Fuentes, Oscar Rangel, Oscar Landeros, Apolinar Gómez Núñez, Ana Valenzuela Zapata, Aristeo Macedo por el apoyo en las colectas y proporción de plantas.

Conflicto de interés

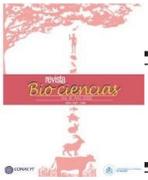
“Los autores declaran no tener conflicto de interés”.

Referencias

- Arrizon, J., Morel S., Gschaedler A., & Monsan P. (2010). Comparison of the water-soluble carbohydrate composition and fructan structures of *Agave tequilana* plants of different ages. *Food Chemistry*, 122(1), 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.028>
- Bautista-Justo, M., García-Oropeza, L., Salcedo-Hernández, R., & Parra-Negrete L.A. (2001). Azúcares en agaves (*Agave tequilana* Weber) cultivados en el Estado de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 11(1), 33-38. <https://doi.org/10.15174/au.2001.325>
- Bello, D., Carrera, E., & Díaz, Y. (2006). Determinación de azúcares reductores totales en jugos mezclados de caña de azúcar utilizando el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40 (2), 45-50. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664006>
- Cabrera-Toledo, D., Mendoza-Galindo, E., Larranaga, N., Herrera-Estrella, A., Vásquez-Cruz, M. and Hernández-Hernández, T. (2022). Genomic and Morphological Differentiation of Spirit Producing *Agave angustifolia* Traditional Landraces Cultivated in Jalisco, Mexico. *Plants*, 11, 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants11172274>
- Castillejos-Reyes, C., Bautista-Cruz, A., Sánchez-Mendoza, S., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2023). Response of agave coyote (*Agave* spp.) to the application of slow-release fertilizers under field conditions. *Revista Bio Ciencias*, 10 e1431. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1431>
- Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D., & Martínez Torres, J. (2007). Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: Una aportación legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. *In En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves* 229-248 pp. Editores. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5192.1441>
- Corbin, K.R., Betts N.S., Holst N., Jiranek V., Chambers D., Byrt C.S., Geoffrey B. Fincher G.B., & Burton R.A. (2016). Low-Input Fermentations of *Agave tequilana* Leaf Juice Generate High Returns on Ethanol Yields. *Bioenergy Research*, 9, 1142-1154. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9755-x>
- De León-Rodríguez, A., Escalante-Minakata, P., Jiménez-García, M., Ordóñez-Acevedo, L., Flores, F.J.L., & Barba, R.A.P. (2008). Characterization of Volatile Compounds from Ethnic *Agave* Alcoholic Beverages by Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Food Technology and Biotechnology*, 46(4), 448-455. <https://www.ftb.com.hr/images/pdfarticles/2008/October-December/46-448.pdf>
- García-Mendoza, A. (1995). Riqueza y endemismo de la familia Agavaceae en México. *In E. Linares, P. Dávila, F. Chiang, R. Bye y T. Elias Ed. Conservación de plantas en peligro de extinción: Diferentes enfoques.*, 51-75 pp. Instituto de Biología UNAM. México DF. https://www.researchgate.net/publication/333982451_Riqueza_y_endemismos_de_la_familia_Agavaceae_en_Mexico_1995
- Gentry, H.S. (1982). *Agaves of Continental North America*. University of Arizona Press.
- González, E.M., Galván, V.R. López E.I., Reséndiz, R.L., & González, E.M.S. (2009). Agaves-Magueyes lechuguillas y noas del Estado de Durango y sus alrededores. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. 163 pp

[https://www.researchgate.net/publication/322243902_Agaves_-
magueyes lechuguillas y noas- del Estado de Durango y sus alrededores](https://www.researchgate.net/publication/322243902_Agaves_-_magueyes_lechuguillas_y_noas_del_estado_de_durango_y_sus_alrededores)

- González, V.L.M. (1986). Contribución al conocimiento del género *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de Jalisco. Colección Flora de Jalisco. Universidad de Guadalajara. 240 pp
- Ley general de Desarrollo Forestal Sustentable. Nueva Ley publicada en el Diario oficial de la Federación el 25 de Febrero del 2003. Última reforma publicada DOF 24-11-2008. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS.pdf>
- López-Santiago, M.A., Sánchez-Toledano, B.I., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., García-Vázquez, R., & Vásquez-Maya, I.I. (2023). Análisis del índice de la ventaja comparativa revelada normalizada para el mezcal, tequila y ron en México, *Revista Bio Ciencias*, 10 e1414. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1414>
- Mancilla-Margalli, N.A., & López, M.G. (2006). Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *Agave* and *Dasyllirion* species. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 54 (20), 7832-7839. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf060354v>
- Mc Vaugh, R. (1989). Flora Novo Galiciana. Bromeliaceae to Dioscoriceae. University of Michigan Herbarium.
- Mc Vaugh, R. (1992). Flora Novo Galiciana. Gymnosperms and Pteridophytes. University of Michigan Herbarium.
- Mellado-Mojica E., & López M.G. (2012). Fructan metabolism in *Agave tequilana* Weber Blue variety along its developmental cycle in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 1704– 1713. <http://doi.org/10.1021/jf303332n>.
- Montañez-Soto J., Venegas-González J., Vivar-Vera M., & Ramos-Ramírez E. (2011). Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber azul. *Bioagro*, 23(3), 199-206. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85721149007>
- Nobel P.S., & Valenzuela A.G. (1987). Environmental responses and productivity of the CAM plant, *Agave tequilana*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(4),319–334. [https://doi.org/10.1016/01681923\(87\)90024-4](https://doi.org/10.1016/01681923(87)90024-4)
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-257-SE-2021, Bebidas alcohólicas Raicilla-Denominación, especificaciones, información comercial y métodos de prueba. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650295
- Rendon-Salcido, L.A. (2007). Relación entre la edad del Henequén (*Agave fourcroydes* Lem) y la estacionalidad climática anual en la producción de destilado alcohólico, Tesis, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. 99 pp. file:///C:/Users/lopez/Downloads/PCBP_D_Tesis_2007_Luis_Rendon_Salcido.pdf
- Ruiz-Corral, J. A., Contreras Rodríguez, S. H., García Romero, G. E., & Villavicencio García, R. (2021). Climas de Jalisco según el sistema Köppen-García con ajuste por vegetación potencial. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 12(5), 805–821. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2988>
- Santacruz-Ruvalcaba F., Castañeda-Nava J.J., Villanueva-González J.P., García-Sahagún M.L., Portillo L., & Contreras-Pacheco M.L. (2022). Micropropagación de *Agave maximiliana* Baker por proliferación de yemas axilares. *Polibotánica*, 1(54), 139-151. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.9>



Valenzuela Z.A.G., & Gaytán, MS. (2012). Sustaining Biological and Cultural Diversity, *Revue d'ethnoécologie*, (2). <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.990>

ARTÍCULO EN PRENSA