

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE CRECIMIENTO Y EVALUACIÓN DE  
VARIANZA Y HEREDABILIDAD EN FAMILIAS DE MEDIOS HERMANOS EN  
SOTOL (*Dasyllirion cedrosanum Trel.*)

Tesis

Que presenta GUSTAVO TRINIDAD VELAZQUEZ CRUZ  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE CRECIMIENTO Y EVALUACIÓN DE  
VARIANZA Y HEREDABILIDAD EN FAMILIAS DE MEDIOS HERMANOS EN  
SOTOL (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.)

Tesis

Elaborada por GUSTAVO TRINIDAD VELAZQUEZ CRUZ como requisito  
parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con  
la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



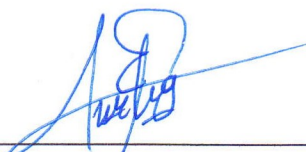
Dr. Manuel Humberto Reyes Valdés  
Director de Tesis




Dra. Adriana Antonio Bautista  
Asesor



Dr. Fernando Borrego Escalante  
Asesor



Dra. Ana Luisa Gómez Espejo  
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado

UAAAN

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme dado fortaleza y guía en cada paso de este camino académico, por iluminar mis decisiones y permitirme culminar esta etapa de formación.

A mi familia, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante, quienes han sido mi mayor motivación para alcanzar mis metas.

Expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. M. Humberto Reyes Valdés, por su excepcional liderazgo, guía y generosidad al compartir su vasto conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco profundamente a la Lic. Dulce V. Mendoza Rodríguez cuyo profesionalismo y colaboración enriquecieron este proyecto de manera significativa y al Ing. Cesar J. Vargas Cepeda por su profesionalismo, apoyo y disposición incondicional en el apoyo del proyecto.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo financiero para el desarrollo del proyecto 38111425105001-2503. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por su apoyo a través de una beca de maestría.

A mis asesores, gracias por su invaluable orientación y consejos durante todo este proceso. Su experiencia y perspectiva fueron esenciales para el logro de los objetivos planteados en esta investigación.

Finalmente, a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de esta tesis, reciban mi más sincero reconocimiento y gratitud.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi luz en los momentos de incertidumbre y mi guía en cada paso de este camino.

A mi familia, quienes, con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido el pilar fundamental en mi vida. Este logro es tanto suyo como mío, porque siempre creyeron en mí.

A todas aquellas personas que me inspiraron a no rendirme, que con sus palabras de aliento y su ejemplo me enseñaron que los sueños se alcanzan con esfuerzo, perseverancia y fe.

Con gratitud, a ustedes les dedico este esfuerzo culminado.

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación.....	3
Hipótesis.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Descripción de la especie.....	4
Importancia ecológica.....	6
Importancia económica.....	7
Relevancia del estudio de crecimiento.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
Análisis retrospectivo de crecimiento.....	11
Estimación de varianzas genéticas y heredabilidades.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Análisis retrospectivo de crecimiento.....	24
Estimación de componentes de varianza y heredabilidades.....	27
CONCLUSIONES.....	42
LITERATURA CITADA.....	43

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Localidades de recolección de semillas de <i>D. cedrosanum</i> .....	15
Cuadro 2. Resultados de validación cruzada para modelos de crecimiento de <i>D. cedrosanum</i> .....	25
Cuadro 3. Promedios de crecimiento en milímetros por mes de las familias de <i>D. cedrosanum</i> .....	28
Cuadro 4. Análisis de varianza (ANOVA) para los efectos de las familias con y sin fecha de siembra de las familias de <i>D. cedrosanum</i> .....	33
Cuadro 5. Comparación de modelos método de criterio de Akaike (AIC).....	34
Cuadro 6. Estimación de parámetros con modelos mixtos para la velocidad de crecimiento de hojas y tallo en <i>D. cedrosanum</i> . Los efectos fijos son relativos a la primera fecha (2023-06-14).....	35
Cuadro 7. Prueba de hipótesis sobre efectos aleatorios con máxima verosimilitud restringida.....	36
Cuadro 8. Estimaciones de varianzas y heredabilidades para crecimiento en <i>D. cedrosanum</i> .....	37
Cuadro 9. Predictor relativo de la tasa de crecimiento del tallo en familias de <i>D. cedrosanum</i> mediante BLUPs.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colecta de semilla.....	16
Figura 2. Semillas de sotol lavadas y desinfectadas.....	16
Figura 3. Germinación de semilla de sotol.....	17
Figura 4. Plantas colocadas en invernadero.....	18
Figura 5. Toma de datos en plantas de sotol para longitud de hojas y diámetro de tallo.....	19
Figura 6. Curvas de ajuste de modelos de crecimiento monomolecular fijo, monomolecular flexible y logístico en <i>D. cedrosanum</i> . A) Crecimiento longitud de hojas. B) Crecimiento diámetro de tallos.....	24
Figura 7. Diagrama de cajas de la velocidad de crecimiento de longitud de hoja y diámetro de tallo entre familias de <i>D. cedrosanum</i> .....	29
Figura 8. Gráficos de ajuste de crecimiento del modelo monomolecular con $\beta = 1$ y con $\beta$ flexible: A) Longitud de hojas y B) Diámetro del tallo.....	31
Figura 9. Efectos aleatorios para velocidad de crecimiento en tallo de <i>D. cedrosanum</i> .....	40

## RESUMEN

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE CRECIMIENTO Y EVALUACIÓN DE  
VARIANZA Y HEREDABILIDAD EN FAMILIAS DE MEDIOS HERMANOS EN  
SOTOL (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.)

POR

GUSTAVO TRINIDAD VELAZQUEZ CRUZ  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. MANUEL HUMBERTO REYES VALDÉS  
ASESOR

Saltillo, Coahuila

Febrero 2025



Los sotoles son plantas típicas de las regiones áridas de México. Son de lento crecimiento y su aprovechamiento se realiza casi exclusivamente en poblaciones naturales. Esto genera una presión que pone en peligro su abundancia y diversidad, de aquí que sea importante conocer los patrones de crecimiento de la planta y su variación genética, para la implementación de proyectos de plantación. El estudio tuvo como objetivo evaluar el crecimiento de familias de medios hermanos de *D. cedrosanum* en condiciones controladas en etapas tempranas. Se evaluaron diversos modelos de crecimiento, y el modelo monomolecular con parámetro fijo ( $\beta=1$ ) mostró ser el más apropiado para la longitud de hojas y diámetro de tallo. Con base en análisis de familias de medios hermanos se demostró la existencia de variación genética para velocidad de incremento en longitud de hojas y diámetro de tallo. Las heredabilidades fueron altas y significativas para ambos rasgos: 0.708 para la longitud de hojas y 0.681 para el diámetro de tallo, lo que indica que estos rasgos tienen un grado considerable de control genético y hace viable el mejoramiento genético a través de la selección. El análisis BLUP es un método que utiliza datos fenotípicos de crecimiento junto con información sobre la estructura genética de las familias de sotol para estimar valores genéticos, permitió identificar las familias con mayor potencial de crecimiento en el tallo, e identificar 10 genotipos destacados. Se evaluaron 31 familias de sotol, entre las cuales el genotipo testigo (RP1) mostró un desempeño inferior en comparación con los otros genotipos evaluados. Estos resultados son clave para la selección de genotipos en futuros programas de mejoramiento genético de *D. cedrosanum*, con fines de plantaciones comerciales.

Palabras clave: *Dasyllirion cedrosanum*, heredabilidad, modelo monomolecular, validación cruzada, varianza.

## **ABSTRACT**

RETROSPECTIVE GROWTH ANALYSIS AND EVALUATION OF VARIANCE  
AND HERITABILITY IN HALF-SIB FAMILIES OF SOTOL (*Dasyllirion*  
*cedrosanum* Trel.)

BY

GUSTAVO TRINIDAD VELAZQUEZ CRUZ  
MASTER IN SCIENCE IN PLANT BREEDING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. MANUEL HUMBERTO REYES VALDÉS  
ADVISOR

Saltillo, Coahuila

February 2025

Sotol plants are typical in the arid lands of Mexico. They are slow growing plants and their exploitation is practiced almost exclusively in natural populations. This generates a pressure that endangers their abundance and diversity. Hence, it is important to study their growing patterns and genetic variation, in order to develop planting projects. The objective of this research was to study the growth of half-sibling families of *Dasyllirion cedrosanum* in controlled conditions and early stages to analyze the genetic variation of growth rate. Several growth models were tested, with the monomolecular model with fixed parameter ( $\beta = 1$ ), being the most appropriate for leaf length and stem diameter. Based on half-sib families, existence genetic variation for growth rate was demonstrated. Heritabilities were high and significant for both traits: 0.708 for leaf length and 0.681 for stem diameter, indicating that these traits have a high degree of genetic control and that breeding through selection is feasible. The BLUP analysis, a method that uses phenotypic growth data along with information about the genetic structure of sotol families to estimate genetic values, allowed for the identification of families with the highest potential for stem growth and the selection of 10 outstanding genotypes. A total of 31 sotol families were evaluated, among which the control genotype (RP1) showed inferior performance compared to the other genotypes evaluated. These results are crucial for the selection of genotypes in future genetic improvement programs of *D. cedrosanum* for commercial plantations.

Key words: Cross-validation, *Dasyllirion cedrosanum*, heritability, monomolecular model, variance.

## INTRODUCCIÓN

El sotol (*Dasyliirion spp.*) es una planta nativa del norte de México y el sur de Estados Unidos que ha sido aprovechada por su uso tradicional en la producción de una bebida espirituosa del mismo nombre. El género *Dasyliirion* pertenece a la familia de las Asparagáceas, comprende 23 especies reconocidas, distribuidas principalmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Sonora, Arizona y Texas (Royal Botanic Gardens, Kew, 2023; Reyes-Valdés *et al.*, 2019). En las últimas décadas, la creciente demanda de sotol ha generado una sobreexplotación de las poblaciones silvestres, especialmente en los estados mexicanos de Chihuahua y Durango (Becerra-López *et al.*, 2020). Esta sobreexplotación ha causado una preocupante disminución de las poblaciones naturales, lo que ha generado llamados urgentes para desarrollar alternativas sostenibles que permitan la producción continua de materia prima sin comprometer la biodiversidad de la especie. A diferencia de otros recursos vegetales utilizados en la industria de bebidas espirituosas, *Dasyliirion* presenta características únicas, como su policarpia, es decir, la capacidad de florecer y fructificar en repetidas ocasiones durante su vida (López Barbosa, 2005). Esta característica, combinada con su capacidad para producir entre 100 y 45,708 frutos con semillas por inflorescencia, resalta su potencial como recurso genético (Ortiz-López *et al.* 2023).

La principal preocupación sobre el futuro de la producción de sotol radica en la falta de plantaciones comerciales que puedan complementar la extracción de las plantas silvestres. Hasta ahora, los esfuerzos por satisfacer la creciente demanda han dependido casi exclusivamente de la recolección de plantas silvestres, lo que ha ejercido una presión insostenible sobre las poblaciones naturales (Ramírez-Gottfried *et al.*, 2021). Para enfrentar esta problemática, se ha propuesto el establecimiento de plantaciones comerciales de sotol como una solución viable que permita reducir la sobreexplotación y al mismo tiempo garantizar un

suministro continuo de piñas (Juárez-Morales *et al.*, 2023). Entre las iniciativas para restaurar y proteger las poblaciones de *Dasyllirion*, se han implementado programas de reforestación basados en la germinación y cultivo de plántulas en condiciones de laboratorio e invernadero (Madrid Solórzano, 2021). Estos esfuerzos buscan regenerar áreas degradadas y restablecer la diversidad genética de la especie. Sin embargo, aún faltan estudios detallados que optimicen estos procesos y permitan una producción más eficiente de plántulas con mayores tasas de crecimiento.

Estudios recientes sugieren que el análisis de datos de crecimiento de *Dasyllirion* bajo condiciones controladas puede proporcionar información valiosa sobre los patrones de desarrollo de la planta (Di-Benedetto y Tognetti, 2016). Estos análisis permiten evaluar la longitud de las hojas y el diámetro del tallo de la planta, proporcionando una base sólida para la selección de genotipos superiores. Esto es fundamental, ya que las plantas más productivas no solo garantizarían un mayor rendimiento, sino que también podrían reducir el tiempo necesario para que la planta alcance su madurez, lo que a su vez incrementaría la sostenibilidad de las plantaciones comerciales. La estrategia podría aumentar la productividad en las plantaciones y reducir la presión sobre las poblaciones silvestres (Villavicencio Gutiérrez, 2007).

Debido a esto, el objetivo principal es proponer el inicio de un programa de mejoramiento genético en sotol (*D. cedrosanum*), a través de la selección de medios hermanos para velocidad de crecimiento en etapas tempranas, con estimación de varianza genética y heredabilidad en sentido estricto. La meta es acortar el tiempo de crecimiento bajo condiciones de cultivo, para su mejor aprovechamiento.

## **Justificación**

El sotol (*Dasylirion spp*) es un recurso forestal no maderable de gran valor, por ser la materia prima de un destilado llamado sotol con denominación de origen. Su demanda va en aumento, lo cual impone una fuerte presión a las poblaciones naturales, comprometiendo su abundancia y diversidad genética. Por ello se requiere el establecimiento de plantaciones bajo la correcta selección y mejoramiento genético de poblaciones sobresalientes.

## **Hipótesis**

Existe variación genética para la velocidad de crecimiento temprano en sotol.

## **Objetivo general**

Iniciar un programa de mejoramiento de sotol (*Dasylirion cedrosanum*) a través de la selección de familias de medios hermanos para velocidad de crecimiento en etapas tempranas.

## **Objetivos específicos**

1. Analizar retrospectivamente la velocidad de crecimiento de tallos y hojas en una población de plantas de sotol desarrolladas en invernadero con fines de experimentos de plantación.
2. Evaluar familias de medios hermanos para velocidad de crecimiento de tallo y hojas durante el lapso de un año.
3. Estimar los componentes de varianza y heredabilidad en familias de medios hermanos.
4. Seleccionar las familias de medios hermanos con la mayor velocidad de crecimiento.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Descripción de la especie

*D. cedrosanum* Trel., comúnmente conocido como sotol, es una planta perteneciente a la familia Asparagaceae que se encuentra principalmente en Coahuila y Zacatecas. Presenta una notable adaptabilidad a las condiciones áridas de su hábitat, donde se desarrolla en suelos bien drenados y en áreas de exposición directa al sol. Su morfología distintiva incluye una roseta de hojas largas y estrechas que pueden alcanzar hasta 2 metros de longitud. Las hojas, de color verde grisáceo, son rígidas y se disponen en espiral, con bordes dentados que les ayudan a reducir la pérdida de agua por evaporación, una adaptación esencial para sobrevivir en ambientes áridos (Cano *et al.*, 2011).

El tallo de *D. cedrosanum* es erecto y puede variar en altura dependiendo de las condiciones ambientales, siendo más pronunciado en áreas óptimas, donde el acceso a agua y luz es favorable. Además, es importante destacar que esta planta no siempre se presenta con un solo tallo; algunas pueden desarrollar hasta tres tallos, lo que contribuye a una mayor flexibilidad en su adaptación al entorno. Esta variación en el crecimiento es importante, ya que permite a la planta ocupar distintos nichos dentro de su ecosistema (Serafín-Higuera *et al.*, 2022).

La inflorescencia de esta especie se presenta en forma de panícula, que puede alcanzar alturas de hasta tres metros. De esta estructura, emergen pequeñas flores cuya polinización obedece al viento e insectos. Esta interacción con polinizadores no solo favorece la reproducción de la planta, sino que también refuerza su papel ecológico al contribuir a la biodiversidad local (Reyes-Valdés *et al.*, 2019).

Una de las características más sobresalientes de *D. cedrosanum* es su capacidad para almacenar agua en sus tejidos, lo que le permite sobrevivir en climas extremos y en escasez de recursos hídricos. Esta adaptación, no solo es fundamental para la supervivencia de la planta, sino que también la convierte en

un recurso valioso para las comunidades locales, que a menudo dependen de su uso para la producción de bebidas tradicionales como el sotol, contribuyendo así a la cultura y economía de la región (Cano *et al.*, 2011; Flores Gallegos *et al.*, 2019).

*D. cedrosanum*, conocido como sotol, es una planta endémica del norte de México, distribuida predominantemente en los estados de Coahuila y Zacatecas (Bogler, 1995). Esta especie es característica de zonas áridas y semiáridas, donde juega un papel importante en la composición de los ecosistemas xerófilos. Cano *et al.* (2011) reportan que el sotol se encuentra principalmente en altitudes que oscilan entre los 1,200 y 2,200 metros sobre el nivel del mar, prefiriendo suelos bien drenados y con exposición directa al sol, factores clave para su desarrollo en hábitats donde el acceso a agua es limitado. Estas áreas incluyen pendientes rocosas y planicies con poca vegetación, lo que subraya la adaptabilidad de la especie a condiciones extremas de sequía.

De acuerdo con Francisco-Francisco *et al.* (2016), la distribución de *D. cedrosanum* está vinculada a la región del Desierto Chihuahuense, donde las condiciones climáticas son óptimas para su crecimiento. Este desierto, que se extiende desde el norte de México hasta el suroeste de Estados Unidos, provee un ambiente adecuado para el sotol, ya que las precipitaciones son bajas y la temperatura diurna es elevada, favoreciendo a las plantas que han desarrollado mecanismos de almacenamiento de agua. Los autores también destacan que esta planta puede tolerar suelos pobres en nutrientes, lo que facilita su dispersión en terrenos marginados.

Reyes-Valdés *et al.* (2013) añaden que la especie es común en regiones semiáridas con una estacionalidad marcada, donde la mayor parte de la lluvia se concentra en cortos periodos. Su presencia en estos ecosistemas, además de ser un indicativo de adaptabilidad, también tiene implicaciones ecológicas importantes, ya que sirve como hábitat para diversas especies de fauna y contribuye a la estabilidad de los suelos en zonas propensas a la erosión.



Chihuahua, Durango y Coahuila son los estados mexicanos con las mayores poblaciones naturales de *Dasyllirion*, donde se han reportado diferentes especies de *Dasyllirion*. Entre ellas, las especies *D. cedrosanum* y *D. duranguensis* son de las más atractivas para la producción del destilado (Flores-Gallegos *et al.*, 2019), lo que destaca la importancia de conocer la especie.

El conocimiento de las áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones es esencial no solo para su conservación, sino también para el manejo sostenible de sus poblaciones naturales. Según Cano y Martínez (2007), la expansión de las áreas donde se puede cultivar sotol de manera controlada es clave para mitigar la presión sobre las poblaciones naturales y asegurar la sostenibilidad de la especie a largo plazo.

### **Importancia ecológica**

El género *Dasyllirion* desempeña un papel crucial en los ecosistemas áridos y semiáridos del norte de México, especialmente en el desierto Chihuahuense. Su capacidad para adaptarse a condiciones extremas, como la escasez de agua y las altas temperaturas, le permite ser un elemento vital en la vegetación nativa de estas zonas. Su resistencia a la sequía y habilidad para almacenar agua en sus tejidos contribuyen a la estabilidad de suelos frágiles, ayudando a prevenir la erosión en terrenos expuestos. Estas características convierten al *Dasyllirion spp.*, en un grupo clave para la conservación del ecosistema en áreas donde otras formas de vegetación no pueden sobrevivir fácilmente (Cano *et al.*, 2011). Desde un punto de vista ecológico, *Dasyllirion* también ofrece refugio y alimento a diversas especies de fauna local, incluyendo aves, pequeños mamíferos y algunos insectos polinizadores. La inflorescencia del sotol atrae a polinizadores como abejas y mariposas, reforzando su papel en el ciclo reproductivo de otras especies vegetales. Además, su estructura densa y espinosa brinda protección a pequeñas especies animales frente a depredadores, aumentando así la biodiversidad en su entorno (Reyes- Valdés *et al.*, 2013).

Un aspecto destacado de la ecología de *Dasyllirion* es su variación morfológica, la cual le permite adaptarse a diferentes condiciones microambientales. Serafín-Higuera *et al.* (2022) analizaron la morfología de la planta en diversas localidades del sureste de Coahuila, y resaltaron que las diferencias en la morfología foliar entre las poblaciones sugieren una adaptabilidad significativa a las condiciones locales. Esta plasticidad fenotípica es importante no solo para su supervivencia, sino también para mantener la estabilidad del ecosistema en zonas afectadas por el cambio climático.

### **Importancia económica**

El género *Dasyllirion* es conocido por su papel en la producción de la bebida espirituosa tradicional llamada sotol, y tiene un valor económico significativo para las comunidades del norte de México. Esta bebida ha sido parte de la cultura y tradiciones locales durante siglos, pero en las últimas décadas ha ganado reconocimiento y demanda en los mercados internacionales. Según Flores-Gallegos *et al.* (2019), el sotol ha experimentado un aumento en su popularidad a nivel global, lo que ha impulsado su comercialización y generado importantes oportunidades económicas para los productores locales.

El sotol no solo es una fuente de ingresos directos a través de la producción de la bebida, sino que también fomenta el desarrollo del turismo en las regiones donde se produce. Las rutas del sotol, similares a las rutas del vino o del tequila, atraen a turistas interesados en la historia, cultura y proceso de fabricación de esta bebida única. Esto no solo beneficia a los productores, sino también a otras industrias locales como el turismo, la gastronomía y la hotelería, creando un impacto económico positivo en las comunidades rurales (Anchondo, 2014).

La importancia del sotol fue reconocida oficialmente por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), que en 2002 otorgó la protección de la denominación de origen al sotol en los estados de Coahuila, Chihuahua y Durango (IMPI, 2002). Este reconocimiento garantiza que la producción de sotol

cumpla con estándares de calidad y que solo las bebidas producidas en ciertas regiones y bajo condiciones específicas puedan utilizar dicho nombre. Este sistema de protección no solo salvaguarda la autenticidad del producto en el mercado global, sino que también ayuda a proteger el patrimonio cultural de las regiones productoras, garantizando que las ganancias económicas beneficien principalmente a las comunidades locales.

Por otro lado, la producción de sotol también está vinculada a consideraciones ecológicas y de sostenibilidad. Madrid Solórzano *et al.* (2021) realizó un análisis del ciclo de vida de *Dasyilirion*, evaluando el impacto ambiental de su producción. Sus hallazgos subrayan la necesidad de implementar prácticas agrícolas sostenibles que aseguren que la explotación de *Dasyilirion* no cause un deterioro significativo en los ecosistemas donde crece. Esto es crucial, ya que la recolección intensiva sin estrategias de manejo sostenible, podría poner en riesgo la supervivencia de la planta en su entorno natural, comprometiendo no solo su valor ecológico, sino también su capacidad de generar beneficios económicos a largo plazo.

En términos de política económica y comercial, el sotol ha sido un producto estratégico para México, especialmente en los últimos años. Reyes-Valdés *et al.* (2019) enfatizan que la sostenibilidad de su producción es vital no solo para asegurar la conservación de los ecosistemas locales, sino también para mantener su competitividad en el mercado internacional. La demanda creciente por productos tradicionales y orgánicos ha colocado al sotol en una posición privilegiada, pero también plantea retos en términos de cómo balancear su producción con la conservación de la biodiversidad.

### **Relevancia del estudio de crecimiento**

El estudio del crecimiento de *D. cedrosanum* es esencial para comprender sus patrones de desarrollo y su capacidad para adaptarse a diversos ambientes, especialmente en condiciones áridas y semiáridas.

Francisco-Francisco *et al.* (2016) han señalado la importancia de analizar la morfología y anatomía foliar del sotol en diferentes etapas de su desarrollo, ya que estos estudios proporcionan información valiosa sobre la adaptación de la planta a factores ambientales como la disponibilidad de agua y nutrientes. Estos aspectos son críticos para comprender las necesidades de la especie y, en última instancia, para mejorar las prácticas de cultivo y conservación. Además, estos estudios morfológicos pueden ayudar a identificar las fases más vulnerables del desarrollo de la planta, permitiendo a los productores locales optimizar su manejo.

Por otro lado, Reyes-Valdés *et al.* (2013) destacan la necesidad de una aproximación ecofisiológica en el estudio del crecimiento de esta planta. La ecofisiología permite una mejor comprensión de efectos de los factores ambientales como la luz, la temperatura y el estrés hídrico sobre el desarrollo de la planta. Esta perspectiva es especialmente útil en regiones áridas, donde las variaciones climáticas pueden influir significativamente en el rendimiento de las plantaciones de *Dasylirion*. A través del uso de modelos de crecimiento y el análisis de factores limitantes, se pueden diseñar estrategias de manejo que garanticen un equilibrio entre la explotación de este recurso y la preservación del entorno.

La investigación de Di-Benedetto y Tognetti (2016) ha aportado herramientas metodológicas para analizar el crecimiento de plantas en sistemas agrícolas, subrayando la importancia de aplicar técnicas como el cálculo de la tasa de crecimiento relativo (RGR) y la tasa de asimilación neta (NAR). Estas técnicas permiten cuantificar cómo *D. cedrosanum* utiliza los recursos disponibles en su ambiente para crecer, lo que resulta esencial para el desarrollo de prácticas agrícolas que maximicen el rendimiento de la planta sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema.

El análisis del crecimiento es vital en el contexto de la producción de sotol, ya que el manejo eficiente de la planta puede tener un impacto directo en la calidad y

cantidad de la bebida producida. Cabe destacar que las plantas de sotol se cosechan de forma silvestre, lo que implica que su crecimiento y maduración dependen de factores naturales. Para que estas plantas estén listas para ser utilizadas en la producción del destilado, se requiere aproximadamente 15 años de crecimiento, lo que hace que su manejo y conservación sean aún más cruciales (Reyes-Valdés *et al.*, 2019).

La creciente popularidad del sotol en mercados internacionales, como lo mencionan Flores-Gallegos *et al.* (2019), ha incrementado la necesidad de desarrollar técnicas de cultivo más eficientes y sostenibles. Al comprender mejor los patrones de crecimiento de la planta, se puede optimizar su manejo en plantaciones controladas y evitar la sobreexplotación de las poblaciones naturales. La evaluación de la varianza aditiva y la heredabilidad en sentido estricto en esta especie es esencial para optimizar su manejo en plantaciones controladas y fomentar su mejoramiento genético.

Actualmente, no existen investigaciones específicas que analicen la varianza aditiva y la heredabilidad en sentido estricto en cualquier especie de *Dasyilirion spp.*, lo que representa una oportunidad importante para futuros estudios. Si bien se han realizado investigaciones en otras especies forestales, como *Agave angustifolia* (Barraza-Morales *et al.*, 2006) y *Pinus pseudostrobus* (Chávez-García *et al.*, 2022), la evaluación de estos parámetros en este grupo sigue sin explorarse. Esto podría ser el punto de partida para investigaciones que busquen comprender la capacidad de mejora genética de *Dasyilirion* y su potencial en la producción de sotol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Análisis retrospectivo de crecimiento.**

En el análisis retrospectivo se utilizaron datos obtenidos en un proyecto de desarrollo de un paquete tecnológico aplicado al establecimiento de plantaciones de sotol (*D. cedrosanum*) en condiciones controladas de invernadero y vivero. El estudio incluyó el registro de la longitud de hojas y el diámetro del tallo en un total de 700 plantas. Estos datos permitieron llevar a cabo un análisis inicial del crecimiento, proporcionando información clave sobre el desarrollo de las plantas bajo las condiciones mencionadas. Con estos datos se realizó un primer análisis de crecimiento.

La semilla de sotol (*D. cedrosanum*) de la que se generaron las plantas fue colectada en dos sitios diferentes, el ejido San Martín de las Vacas (familia SV1) en las coordenadas 25° 32' de latitud norte y 101° 11' de longitud oeste, con una elevación de 1793 metros sobre el nivel del mar (msnm), dentro del municipio de Saltillo, Coahuila, México. El segundo sitio fue el Ejido Lucio Blanco (familia RP1), en las coordenadas 26° 09' de latitud norte y 102° 11' de longitud oeste, con una elevación de 1456 metros sobre el nivel del mar (msnm), dentro del municipio de Cuatro Ciénegas en la Subprovincia Laguna de Mayrán.

Registro de los datos. Se midieron la longitud de las dos hojas más largas con una regla estándar y el diámetro del tallo en dos direcciones perpendiculares usando un vernier digital. Las mediciones se realizaron cada dos meses durante 600 días, registrando de forma precisa el crecimiento. Cada planta fue marcada y numerada para asegurar la consistencia de los datos.

Análisis exploratorio. Se realizó un análisis exploratorio detallado de los datos, utilizando gráficos de dispersión para representar la relación entre el diámetro medio del tallo (mm), la longitud media de las hojas (mm) y el tiempo de

crecimiento (días). Estos gráficos permitieron visualizar patrones y tendencias de crecimiento, facilitando la interpretación de la dinámica de las variables a lo largo del período de estudio.

Evaluación de modelos de crecimiento. Con base en observaciones previas de plantas adultas se establecieron asíntotas para los límites superiores: 120 cm para longitud de hojas y 600 mm para el diámetro de tallo. Los modelos probados para el crecimiento de las plantas fueron:

Modelo de Brody (Kaps, Herring, y Lamberson, 2000).

$$y(t) = \alpha - (\alpha - w_0) \exp(-kt)$$

Donde:

$y(t)$  = Tamaño en el tiempo  $t$ ,  $\alpha$  = Valor asintótico,  $w_0$  = Tamaño inicial,  $k$  = Tasa de crecimiento.

Modelo de Mitcherlitch (Fekedulegn *et. al.*, 1999).

$$y(t) = (\alpha - \beta kt)$$

Donde:

$y(t)$  = Tamaño en el tiempo  $t$ ,  $\alpha$  = Valor asintótico,  $\beta$  = Rango de crecimiento,  $k$  = Tasa de crecimiento.

Modelo de Gompertz (Gompertz, 1825).

$$y(t) = \alpha \exp(-\beta \exp(-kt))$$

Donde:

$y(t)$  = Tamaño en el tiempo  $t$ ,  $\alpha$  = Valor asintótico,  $\beta$  = Constante relacionada con el tamaño inicial,  $k$  = Tasa de crecimiento.

Modelo Monomolecular (Von-Bertalanffy, 1957).

$$y(t) = \alpha(1 - \beta \exp(-kt))$$

Donde:

$y(t)$ = Tamaño en el tiempo  $t$ ,  $\alpha$ = Valor asintótico,  $\beta$ = Rango de crecimiento,  $k$ = Tasa de crecimiento.

Modelo Logístico (Fekedulegn *et. al.*, 1999).

$$y(t) = \alpha / [1 + \beta \exp(-kt)]$$

Donde:

$y(t)$ = Tamaño en el tiempo  $t$ ,  $\alpha$ = Capacidad máxima,  $\beta$ = Valor inicial,  $k$ = Tasa de crecimiento.

Los modelos fueron seleccionados por su capacidad probada para calcular las tasas de crecimiento y rendimiento de cultivos en diferentes especies vegetales como la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) (Solórzano-Thompson *et. al.* 2021) y en animales (Kaps, Herring, y Lamberson, 2000).

Validación cruzada. La comparación de estos modelos se llevó a cabo mediante validación cruzada, con base en el error de prueba. Este enfoque es crucial para determinar la precisión y la capacidad predictiva de cada modelo en el contexto de los datos observados. El ajuste y la selección de los modelos de crecimiento se realizaron con un conjunto de datos de 1793 observaciones. Estas observaciones fueron divididas en un conjunto de datos de entrenamiento con 1500 observaciones, y un conjunto de datos de prueba con 293 observaciones. Esta división estratégica permitió ajustar inicialmente los modelos de crecimiento con los datos de entrenamiento y luego evaluar su capacidad predictiva con el conjunto de prueba, de acuerdo con las técnicas de aprendizaje estadístico (James, Witten, Hastie y Tibshiriani, 2013). Para cuantificar la precisión de las predicciones de los modelos, se calculó el cuadrado medio del error de prueba (CME), que proporciona una medida de la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los valores observados en el conjunto de prueba. Este enfoque de validación cruzada es fundamental para evitar el sobre ajuste de los modelos a



los datos de entrenamiento y proporcionar una estimación más real de la eficiencia de los modelos con nuevos conjuntos de observaciones. En el proceso de ajuste, los modelos de Brody, Gompertz y Mitcherlitch no tuvieron convergencia; se procedió a la comparación por validación cruzada entre dos modelos monomoleculares y uno logístico. En uno de los modelos monomoleculares se estableció previamente un valor fijo de  $\beta = 1$ , mientras que en el otro se estableció un valor flexible para dicho parámetro.

Este análisis permitió elegir el mejor modelo, para aplicarlo en los análisis de las familias de medios hermanos de sotol.

### **Estimación de varianzas genéticas y heredabilidades.**

Para la estimación de varianzas genéticas y heredabilidades se evaluó una muestra de familia de medios hermanos, una estructura familiar muy utilizada en plantas anuales para la estimación de parámetros genéticos.

Material biológico. Se establecieron 31 familias de medios hermanos de sotol (*D. cedrosanum*) provenientes de diversas localidades del sureste del estado de Coahuila, México.

Cuadro 1. Localidades de recolección de semillas de *D. cedrosanum*.

Localidad	Nomenclatura de familias	Ciudad o Municipio	Coordenadas (Latitud, Longitud)
Ejido San Miguel	SM	Ramos Arizpe	25° 35' N, 101° 5' W
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro	UA	Saltillo	25° 21' N, 101° 1' W
Tanque Nuevo	TN	Parras	26° 37' N, 102° 12' W
Palma Gorda	PG	Saltillo	25° 23' N, 101° 4' W
El Carmen	CA	Ramos Arizpe	25° 39' N, 101° 54' W
General Cepeda	GC	General Cepeda	25° 19' N, 101° 42' W
Ejido Lucio Blanco	RP1	Cuatro Ciénegas	26° 09' N, 102° 11' W
Ejido San Martin de las Vacas	SV1	Saltillo	25° 32' N, 101° 11' W



Figura 1. Colecta de semilla.

Lavado de la semilla cosechada. Fue almacenada en frascos herméticos para su conservación a una temperatura de 8°C. Previo a su germinación fue sometida a un proceso de lavado y desinfección con hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) al 1% (Cloralex) durante 1 minuto, seguido de una inmersión en alcohol al 70% por 1 minuto, y finalmente enjuagadas con agua destilada dos veces por 1 minuto cada una.



Figura 2. Semillas de sotol lavadas y desinfectadas.

Prueba de germinación. Con las semillas desinfectadas se hicieron pruebas de germinación bajo condiciones controladas en experimentos replicados. Se colocaron 10 semillas en cajas de Petri con papel filtro (Whatman 41) y se mantuvieron en una cámara de crecimiento (LAB-LINE BIOTRONETTE) a temperatura de 24°C a 26°C, con un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de sombra durante un período de 21 días para evaluar su capacidad de germinación. Se establecieron dos repeticiones por cada uno de los dos materiales. Para mantener las semillas en condiciones óptimas de sanidad, se aplicó una solución de Captan al 1% (INTERCAPTAN 50 PH) tres veces por semana. La germinación de las semillas fue evaluada periódicamente y una vez determinada la capacidad de germinación, se procedió al desarrollo de las plántulas.



Figura 3. Germinación de semilla de sotol.

Desarrollo de plántulas. Se desarrollaron en charolas de poliestireno (con 180 cavidades), con un sustrato compuesto por Peat Moss (turba de Sphagnum) para cultivos orgánicos y vermiculita (grado 1) en una proporción de 3:1. Las charolas con sustrato se mantuvieron en una cámara de crecimiento (LAB-LINE BIOTRONETTE), a una temperatura de 24°C a 26°C, con un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de sombra. Una vez que las plántulas alcanzaron aproximadamente 10 cm de altura, fueron trasplantadas a bolsas de vivero y llevadas al invernadero.

Diseño experimental. Las 31 familias fueron dispuestas en el invernadero bajo un arreglo completamente al azar, con 21 plantas por familia, en condiciones ambientales y manejo uniforme para todas las muestras. El riego controlado se aplicó tres veces a la semana, asegurando que cada planta recibiera una cantidad adecuada de agua para mantener su sanidad y crecimiento óptimo. Además, se verificó regularmente el estado sanitario de las plantas para detectar y prevenir posibles plagas. En algunos casos se recurrió a la resiembra, por lo que además de la fecha principal se tuvieron dos fechas adicionales.



Figura 4. Plantas colocadas en invernadero.

Fertilización. Se llevó a cabo cada 6 meses, con pastillas fertilizantes (Nitro Tabs) que contienen Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Azufre, Fierro y Zinc, para proporcionar los nutrientes necesarios en el desarrollo de las plantas.

Registro de datos. En un total de 663 plantas se midió la longitud de las hojas y el diámetro del tallo. Para la medición de la longitud de las hojas, se seleccionaron las dos hojas más largas de cada planta mediante una identificación visual. Posteriormente, se procedió a medir la longitud de las hojas utilizando una regla estándar, desde la base del tallo hasta la punta de la planta, registrando sus medidas.

El diámetro del tallo se midió en dos direcciones perpendiculares con un vernier digital. Primero, se midió el diámetro en el sitio más ancho del tallo, luego se procedió a medir el diámetro en el sitio más angosto, asegurando que el vernier estuviese firmemente ajustado alrededor del tallo en ambos puntos de medición. Estas mediciones se realizaron a intervalos aproximados de dos meses a lo largo de un período de 12 meses desde la fecha de siembra, para contar con una evaluación detallada y continua sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Para asegurar la precisión y consistencia de los datos, cada planta fue marcada y registrada individualmente, obteniendo un total de 3,311 observaciones.



Figura 5. Toma de datos en plantas de sotol para longitud de hojas y diámetro de tallo.

Análisis exploratorio. Se emplearon gráficos de cajas para mostrar la variación en velocidad de incremento del diámetro medio del tallo (mm) y la longitud media de las hojas (mm) por planta con base en las familias. Estos gráficos permiten visualizar las diferencias en la velocidad de crecimiento de las distintas familias y la variación dentro de cada una de ellas.

Comparación de modelos lineales clásicos. Se utilizaron ANOVA's clásicos para comparar el crecimiento entre las diferentes familias, agregando una covariable (la fecha de siembra). Este enfoque permitió evaluar si existían diferencias significativas en el crecimiento de las plantas entre las familias.

Los modelos probados fueron:

Modelo sin covariable.

$$V_{ij} = \mu + f_i + e_{ij}$$

Donde:

$V_{ij}$  = observación de la j-ésima planta en la i-ésima familia,  $\mu$  = media general,  $f_i$  = efecto de la i-ésima familia,  $e_{ij}$  = Error experimental.

Modelo con covariable

$$V_{ijk} = \mu + f_i + s_k + e_{ijk}$$

Donde:

$V_{ijk}$  = observación de la j-ésima planta en la k-ésima fecha de siembra y la i-ésima familia,  $\mu$  = media general,  $f_i$  = efecto de la i-ésima familia,  $s_k$  = efecto de la k-ésima fecha de siembra,  $e_{ijk}$  = error experimental.

Modelos mixtos. Se ajustaron dos modelos, donde las familias constituyen efectos aleatorios. En primer lugar, se ajustaron modelos lineales mixtos básicos para las variables de longitud de altura y diámetro del tallo ( $V_{ij} = \mu + f_i + e_{ij}$ ).

Posteriormente, se ajustaron modelos ampliados al incluir las fechas de siembra como efecto fijo. Esto permitió evaluar si las diferencias en las fechas de siembra contribuían a explicar la variación observada en las respuestas a las variables, además de la variabilidad atribuible a las familias ( $V_{ijk} = \mu + f_i + s_k + e_{ijk}$ ).

La ecuación del modelo mixto es (Correa J. y Salazar J., 2016)

$$y = x\beta + z\gamma + \epsilon$$

Donde:

$y$  = vector de respuestas de la  $i$ -ésima unidad,  $x$  = la matriz diseño de los efectos fijos, esta matriz es conocida,  $\beta$  = vector de parámetros de los efectos fijos,  $z$  = la matriz diseño de los efectos aleatorios, también conocida y de rango completo,  $\gamma$  = vector de variables latente denominadas efectos aleatorios, los cuales reflejan el efecto individual de la  $i$ -ésima unidad,  $\epsilon$  = vector de errores aleatorios.

Comparación de modelos mediante el criterio de Akaike (AIC). La comparación entre los modelos con y sin covariables se realizó con el criterio de información de Akaike (Akaike, 1974). Este método mide la calidad relativa de los modelos ajustados teniendo en cuenta tanto el ajuste a los datos como la penalización por complejidad (número de parámetros incluidos). La fórmula del AIC es:

$$AIC = -2 \log(L(\theta)) + 2K$$

Donde:

$\log(L(\theta))$  = logaritmo de la verosimilitud del modelo estadístico, y  $K$  = número de parámetros libres del modelo.

Prueba de hipótesis con máxima verosimilitud restringida (REML). Se sometió a prueba la hipótesis de presencia de variación entre familias a través de la prueba de razón de verosimilitud de Likelihood Ratio Test (RLRT), que evalúa la mejora en el ajuste al comparar el modelo completo (con efectos aleatorios) con el modelo nulo (sin efectos aleatorios). La estadística de razón de verosimilitud se calcula como:

$$\Lambda = -2 \cdot (\text{LogL nulo} - \text{LogL completo})$$

Donde:

$\text{LogL nulo}$  = verosimilitud del modelo nulo y  $\text{LogL completo}$  = verosimilitud del modelo que incluye los efectos aleatorios. La estadística  $\Lambda$  sigue una distribución



chi-cuadrada con grados de libertad equivalentes al número de parámetros adicionales incluidos en el modelo completo (los efectos aleatorios de las familias).

Los resultados de razón de verosimilitud se corroboraron con prueba exacta basada en máxima verosimilitud restringida (REML).

Estimación de varianza genotípica (VG). Se estimó como el componente asociado al efecto aleatorio de las familias. Posteriormente, la varianza aditiva (VA) se estimó considerando que las familias son medios hermanos, se utilizó la relación:

$$VA = 4 \cdot VG$$

Donde:

VA= varianza aditiva estimada, VG= varianza estimada del efecto aleatorio de las familias.

Estimación de la heredabilidad con base en familias. Se estimó utilizando los componentes de varianza obtenidos, utilizando la media armónica del número de plantas por familia ( $n$ ) para ajustar las diferencias en tamaño muestral entre familias. Esta media se calculó mediante la fórmula:

$$M = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{ni}}$$

Donde:

$n$ = número de familias,  $ni$ = número de plantas únicas por familias.

Con este valor, la heredabilidad se estimó como:

$$h^2 = \frac{\sigma^2_{familia}}{\sigma^2_{familia} + \frac{\sigma^2_{\epsilon}}{M}}$$

Donde:

$\sigma^2_{familia}$ = varianza genética entre familias y  $\sigma^2\epsilon$ = varianza residual. Esta aproximación permite obtener una estimación robusta de la heredabilidad, considerando el diseño desbalanceado del experimento.

Por otro lado, una estimación a nivel individual considera la relación genética entre individuos de medios hermanos.

La heredabilidad en base individual se calculó mediante la fórmula:

$$h^2 = \frac{4 \cdot \sigma^2_{familia}}{4 \cdot \sigma^2_{familia} + \sigma^2\epsilon}$$

Donde:

$\sigma^2_{familia}$ = varianza de las familias,  $\sigma^2\epsilon$ = varianza residual.

Mejores predictores lineales insesgados (BLUP's). Se obtuvieron de los modelos lineales mixtos que permitieron predecir los efectos aleatorios asociados a las familias sobre la velocidad de crecimiento de los tallos ya que esta es la variable de mayor relevancia para los productores, dado que influye directamente en el proceso productivo para la elaboración del destilado. Los BLUP's representan el efecto genético de cada familia sobre la velocidad de crecimiento después de descontar los efectos fijos. Además, se estimaron las varianzas condicionales asociadas a los BLUP's, para construir intervalos de confianza al 95% para cada predicción:

$$IC = \ddot{u} \pm 1.96 \sqrt{Var(\ddot{u})}$$

Con esto se ofrece una medida de la precisión de las estimaciones de los efectos aleatorios y ayudando a seleccionar los mejores genotipos en base en el crecimiento del diámetro de los tallos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis retrospectivo de crecimiento

La Figura 6 presenta los ajustes de los modelos logístico y monomolecular al crecimiento de *D. cedrosanum* en condiciones controladas. La Figura 6A muestra la relación entre la longitud de las hojas (mm) y el tiempo (días), y la Figura 6B representa la relación entre el diámetro del tallo (mm) y el tiempo (días). Las líneas corresponden a los ajustes de los modelos logístico y monomolecular con parámetros flexibles y con parámetro fijo ( $\beta = 1$ ).

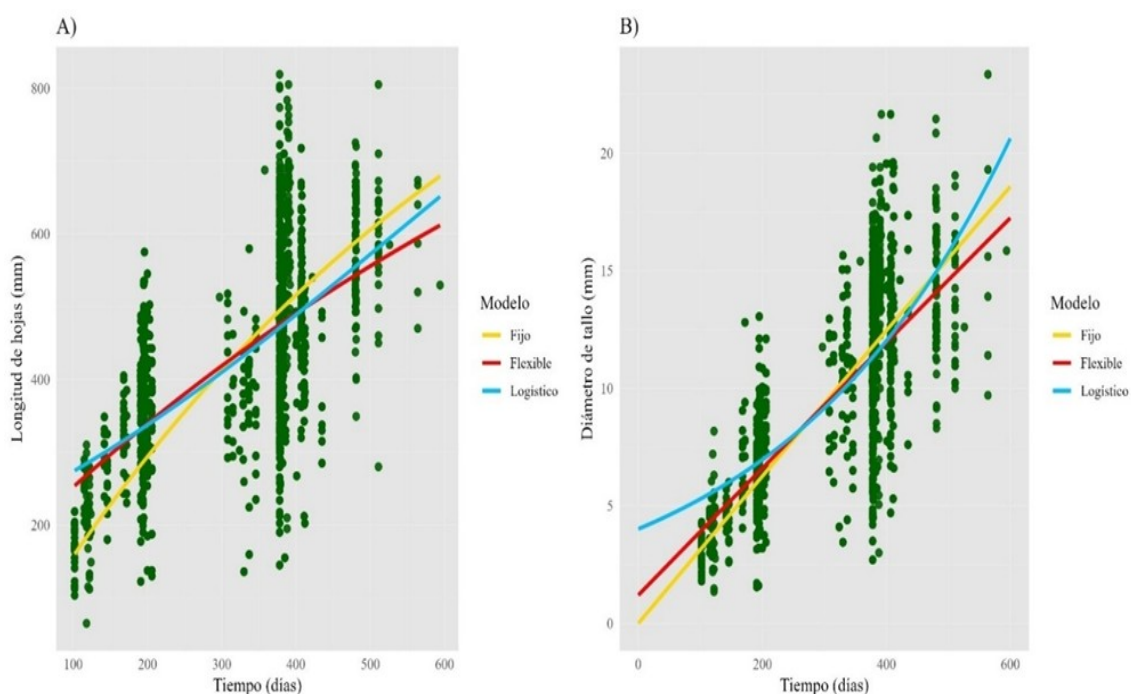


Figura 6. Curvas de ajuste de modelos de crecimiento monomolecular fijo, monomolecular flexible y logístico en *D. cedrosanum*. A) Crecimiento longitud de hojas. B) Crecimiento diámetro de tallos.

La Figura 6A muestra un crecimiento progresivo en longitud de hojas y la Figura 6B el diámetro de tallo, con una fase inicial lineal de los primeros 200 días

seguida por una desaceleración en las tasas de crecimiento en los períodos posteriores. La longitud de hojas aumentó de un promedio de 326 mm en los primeros 200 días a 510 mm al final del estudio, mientras que el diámetro del tallo pasó de 6.1 mm a 13.1 mm en el mismo periodo. Estos resultados destacan un crecimiento continuo, aunque más lento en las etapas finales.

El comportamiento del crecimiento fue heterogéneo, probablemente debido a la diversidad genética de las plantas, pese a las condiciones homogéneas de manejo. Se sugiere que el uso de fertilizantes y un manejo ambiental controlado podrían mejorar significativamente el crecimiento, de acuerdo con estudios de Sánchez *et al.* (2020) en *Agave angustifolia* y Vega-Cruz *et al.* (2006) en *D. leiophyllum*.

En el Cuadro 2 se muestran los errores de prueba obtenidos de la validación cruzada, para la comparación entre los distintos modelos de crecimiento aplicados a los datos de longitud de hoja y diámetro de tallo.

Cuadro 2. Resultados de validación cruzada para modelos de crecimiento de *D. cedrosanum*.

Modelo	Error de prueba	
	Altura	Diámetro
Brody	No converge	No converge
Mitcherlitch	No converge	No converge
Gompertz	No converge	No converge
Monomolecular ( $\beta=1$ )	118.9	7.6
Monomolecular ( $\beta$ flexible)	103.2	7.3
Logístico	134.4	7.9

Los modelos de Brody, Mitscherlich y Gompertz no lograron converger, lo que indica que no fueron capaces de ajustarse adecuadamente a los datos observados en ambas variables de crecimiento (longitud de hojas y diámetro del tallo). En cambio, el modelo monomolecular con un parámetro flexible se destacó al generar los menores valores de error de prueba, por lo que resulta más adecuado para describir el crecimiento temprano de *D. cedrosanum*. Este modelo ofrece una representación más precisa de las dinámicas de crecimiento inicial, especialmente para la longitud de las hojas y el diámetro del tallo.

Al comparar la capacidad predictiva para el diámetro del tallo, no se observan grandes diferencias entre el modelo monomolecular con parámetro flexible y la versión con un parámetro fijo ( $\beta = 1$ ). Aunque el modelo logístico ha mostrado ser adecuado para describir el crecimiento de frutos de anacardo (Muianga *et al.*, 2016), en *D. cedrosanum* presentó un desempeño moderado, sin lograr un ajuste tan preciso como el monomolecular.

El modelo monomolecular emergió, por lo tanto, como una opción más precisa para modelar el crecimiento temprano de *D. cedrosanum*. En particular, la versión con parámetro flexible alcanzó un error de prueba de 103.2 para la longitud de hojas y de 7.3 para el diámetro del tallo, valores que superaron a los obtenidos con la versión de parámetro fijo ( $\beta = 1$ ), que tuvo errores de 118.9 para la longitud de hojas y 7.6 para el diámetro. Muniz *et al.* (2017) señalaron que la flexibilidad en los parámetros del modelo es fundamental para capturar la variabilidad en los datos de crecimiento, especialmente en especies que no cumplen estrictamente con los supuestos de algunos modelos.

Aunque el modelo monomolecular con parámetro flexible mostró el mejor ajuste, las diferencias en el error de prueba con respecto al modelo con  $\beta = 1$  no son grandes. Esto nos dice que la versión con  $\beta = 1$  también puede ser utilizada de manera efectiva para describir el crecimiento de *D. cedrosanum*, representando una alternativa más simple sin comprometer sustancialmente la precisión del ajuste.

En el análisis del ajuste de modelos de crecimiento, el modelo monomolecular destacó por su capacidad para representar de manera precisa las tendencias observadas, especialmente en las fases iniciales e intermedias del crecimiento. La versión con parámetros flexibles permitió un ajuste más exacto tanto para la longitud de las hojas como para el diámetro del tallo, capturando con mayor precisión las dinámicas de crecimiento lento características de esta especie. Por otro lado, el modelo logístico, aunque adecuado para describir ciclos de vida más cortos, subestimó el crecimiento durante las etapas intermedias y finales. Esto evidenció sus limitaciones para reflejar la variabilidad inherente al desarrollo de *D. cedrosanum*. En términos comparativos, el modelo monomolecular flexible se presenta como la mejor opción para analizar especies de crecimiento prolongado como *Dasyllirion*. Su capacidad de adaptarse a las complejidades del crecimiento lo hace especialmente útil para describir las dinámicas en sistemas controlados, donde se busca capturar tanto las fases iniciales como las intermedias de manera precisa.

### **Estimación de componentes de varianza y heredabilidades**

En el Cuadro 3 se describe los valores promedio de crecimiento en longitud de altura y diámetro de tallo en milímetros por mes (mm/mes) en las diferentes familias de *D. cedrosanum*

Cuadro 3. Promedios de crecimiento en milímetros por mes de las familias de *D. cedrosanum*.

Familias	Longitud de altura (mm)	Diámetro de tallo (mm)	Familias	Longitud de altura (mm)	Diámetro de tallo (mm)
UA2002	43.28	0.74	CA02	34.32	0.50
UA2006	41.39	0.63	UA2004	33.25	0.52
UA1100	40.73	0.77	GC12	32.45	0.53
SM175	40.39	0.70	PG06	31.98	0.49
GC57	40.31	0.61	GC32	30.81	0.46
UA2007	39.67	0.63	TN02	29.21	0.50
UA1097	39.65	0.56	UA2003	25.60	0.46
PG05	39.25	0.58	RP1	25.33	0.34
UA1103	39.16	0.67	PG02	37.88	0.67
UA1089	38.85	0.61	SM140	37.49	0.57
CA04	38.61	0.63	PG04	37.10	0.65
TN04	38.43	0.55	PG07	36.48	0.60
UA2005	35.12	0.58	CA03	35.97	0.51
UA2001	34.46	0.60	TN01	35.94	0.62
UA1099	34.40	0.64	CA05	35.87	0.62
			SM151	35.27	0.53

La velocidad promedio de crecimiento en longitud de altura, medida en milímetros por mes, varió ampliamente entre las familias. La familia UA2002 mostró el mayor crecimiento promedio, alcanzando 43.28 mm/mes, mientras que RP1 presentó el menor valor, con 25.33 mm/mes.

Por otro lado, la velocidad promedio de crecimiento en diámetro fue más homogénea, aunque igualmente mostró variaciones. La accesión UA2002

destacó nuevamente con uno de los valores más altos (0.74 mm/mes), mientras que RP1 tuvo el menor crecimiento en esta variable (0.34 mm/mes).

El diagrama de cajas (Figura 7) muestra la variación en la longitud de hoja (mm/mes) y el diámetro de tallo (mm/mes) entre las 31 familias de *D. cedrosanum*. En la parte superior, se representa el crecimiento mensual de hojas, mientras que en la parte inferior se observa el crecimiento mensual de tallos.

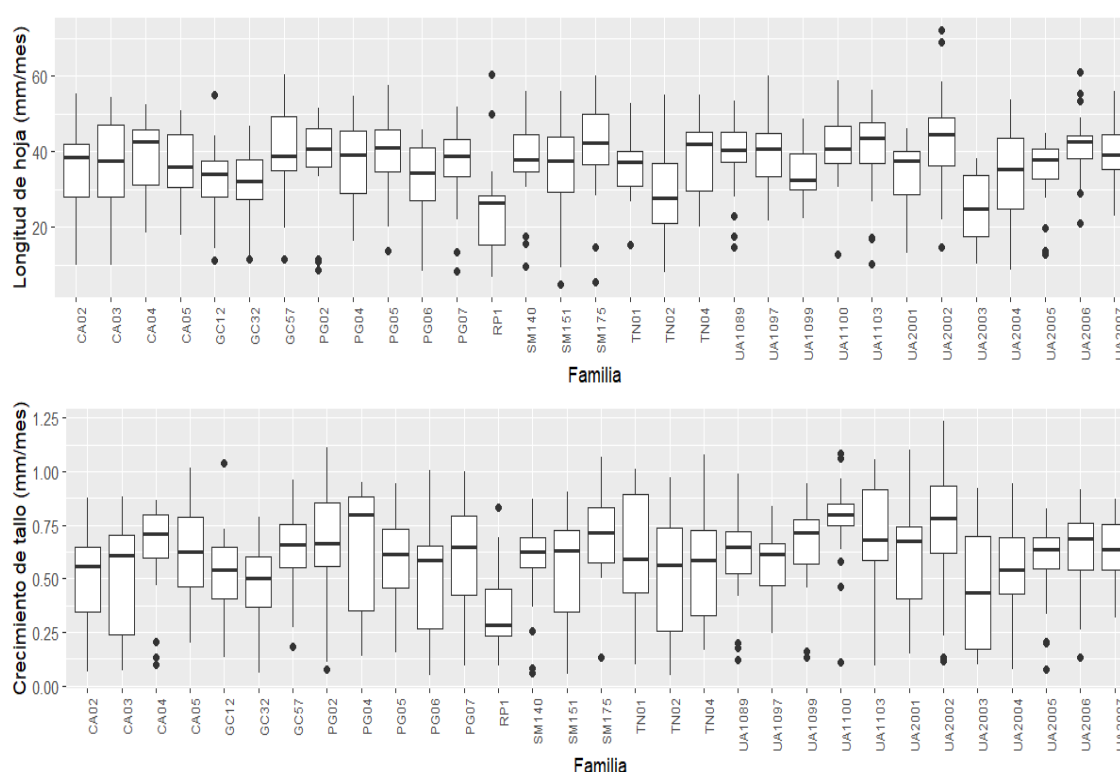


Figura 7. Diagrama de cajas de la velocidad de crecimiento de longitud de hoja y diámetro de tallo entre familias de *D. cedrosanum*.

En cuanto a la velocidad de crecimiento en la longitud de hoja, las familias presentan un comportamiento variado. Entre las familias con mayor crecimiento destacan UA2002 (43.28 mm), UA1103 (39.16 mm) y SM175 (40.39 mm), que mostraron medianas elevadas. En contraste, familias como RP1 (25.33 mm) y



UA2003 (25.60 mm) presentaron tasas de crecimiento en longitud de hoja muy bajas.

Respecto al crecimiento en diámetro de tallo, las familias UA1100 (0.77 mm) y PG04 (0.65 mm) se destacaron por tener los valores más altos y medianas elevadas. Esto nos muestra ventaja genética en el desarrollo del tallo en las condiciones evaluadas. En cambio, las familias RP1 y UA2003 mostraron las tasas de crecimiento de tallo más bajas, con 0.34 mm y 0.46 mm respectivamente con una desventaja para el crecimiento rápido de las plantas en estas familias. Los resultados obtenidos hasta el momento no permiten llegar a conclusiones sobre las causas específicas de estas diferencias. Chávez-García *et al.* (2022) discuten un fenómeno similar al analizar la plasticidad fenotípica en progenies de *Pinus pseudostrobus*. En su estudio, encontraron que la variación genética influye en el crecimiento y la adaptabilidad de los individuos, especialmente en condiciones controladas de vivero.

A continuación, se presentan las gráficas de los ajustes de los dos modelos monomoleculares, con parámetro  $\beta = 1$  y el  $\beta$  flexible, seleccionados en el análisis retrospectivo.

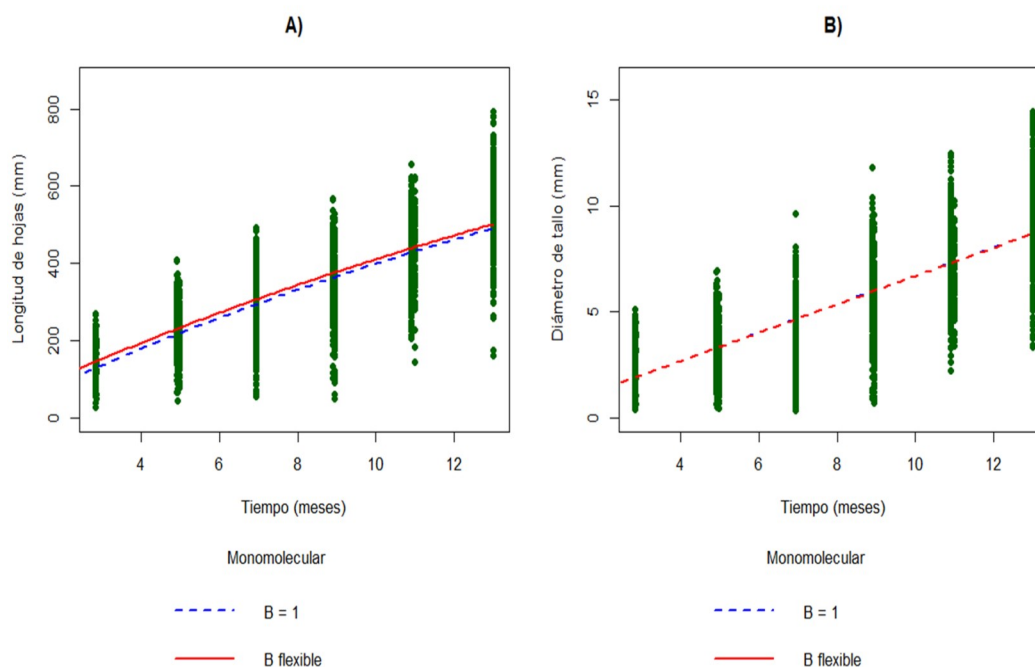


Figura 8. Gráficos de ajuste de crecimiento del modelo monomolecular con  $\beta = 1$  y con  $\beta$  flexible: A) Longitud de hojas y B) Diámetro del tallo.

En las gráficas de ajuste para la longitud de las hojas (Figura 8A), el modelo monomolecular con  $\beta = 1$  arrojó un valor de tasa de crecimiento  $k = 0.0422728$ , mientras que el modelo con  $\beta$  flexible tuvo una tasa de  $k = 0.0405511$  y un parámetro de forma  $\beta = 0.9856198$ . El modelo flexible mostró un valor de  $\beta$  cercano a 1, indicando que el modelo simplificado ( $\beta = 1$ ) captura adecuadamente la dinámica de crecimiento general. La proximidad de  $\beta = 1$  en nuestro análisis nos dice que, para el crecimiento en longitud de las hojas, la diferencia entre ambos modelos es mínima y, en términos prácticos, el modelo con un parámetro fijo proporciona un ajuste adecuado con menos complejidad.

Para el diámetro del tallo (Figura 8B), ambos modelos (con  $\beta = 1$  y  $\beta$  flexible) arrojaron resultados casi idénticos, con  $k = 0.001124$  para el modelo con  $\beta = 1$  y una  $k = 0.001123$  para el modelo flexible. Esta similitud en los valores de  $k$  refleja que el parámetro adicional de  $\beta$  flexible no aporta una mejora significativa en el

ajuste del modelo, lo cual muestra que el crecimiento del diámetro del tallo puede representarse de manera precisa con el modelo monomolecular  $\beta$  fijo a 1. Este resultado coincide con los hallazgos de Panghal *et al.* (2019) en su análisis de tasas de crecimiento de frutos de guayaba, en el cual modelos simplificados resultaron ser efectivos para capturar el crecimiento general sin comprometer la precisión. En nuestro caso, el uso del modelo con  $\beta = 1$  es particularmente útil, ya que proporciona un ajuste adecuado, manteniendo la precisión en la representación del crecimiento del tallo.

Solórzano-Thompson *et al.* (2021), al evaluar el rendimiento de palma aceitera, encontraron que el modelo más simple era suficiente cuando los datos de crecimiento se ajustaban bien a los parámetros. Nuestros resultados para el diámetro del tallo coinciden con esta recomendación, ya que el modelo con  $\beta$  fijo en 1 no solo logra el mejor ajuste, sino que además evita la complejidad añadida de ajustar un parámetro flexible y manteniendo la precisión del ajuste de los datos.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del ANOVA de los modelos clásicos para velocidad global de crecimiento de hojas y tallos

Cuadro 4. Análisis de varianza (ANOVA) para los efectos de las familias con y sin fecha de siembra de las familias de *D. cedrosanum*.

Modelo	FV	CMF	CMS	Valor F	Pr(>F)
$V_{ij}=\mu+fi+e_{ij}$	Velocidad de hoja	4.26	NA	3.48	$2.86 \times 10^{-9}$
$V_{ij}=\mu+fi+e_{ij}$	Velocidad de tallo	0.18	NA	3.07	$1.32 \times 10^{-7}$
$V_{ijk}=\mu+fi+sk+e_{ijk}$	Velocidad de hoja	4.26	30.75	27.24	$4.51 \times 10^{-12}$
$V_{ijk}=\mu+fi+sk+e_{ijk}$	Velocidad de tallo	0.18	1.90	37.05	$6.11 \times 10^{-16}$

FV= Fuente de variación, CMF= Cuadrados medios de familias, CMS=Cuadrados medios de fechas de siembra, Pr(>F) = probabilidad del error tipo I.

La inclusión de la covariable permite analizar de manera más precisa la variación del crecimiento entre las familias, lo cual es respaldado por la disminución en el valor de probabilidad en el ANOVA.

De manera similar, Sari *et al.* (2019) estudiaron el crecimiento y producción de plantas de tomate con el fin de describir la variación en la producción bajo diferentes condiciones. Encontraron que modelos que incorporan factores adicionales como la densidad de siembra y condiciones ambientales como covariables producen un ajuste superior, reflejando mejor las variaciones observadas en el crecimiento de las plantas. Sari *et al.* (2019) muestran que, al agregar estos factores al modelo, no solo se mejora el ajuste, sino que también se logra una representación más detallada de la influencia de las condiciones de crecimiento.

Aplicando este enfoque en *D. cedrosanum*, al incluir la fecha de siembra en el modelo permite capturar el efecto de las condiciones de crecimiento, logrando una mejor representación de la variación entre familias en ambos parámetros, velocidad de crecimiento de las hojas y diámetro del tallo, sugiriendo que este tipo de ajuste es crucial para estudios que buscan modelar el crecimiento bajo condiciones controladas.

Con el método de Akaike se realizó una comparación de los dos modelos de crecimiento uno sin covariable ( $V_{ij}=\mu+\gamma_i+e_{ij}$ ) y otro con covariable ( $V_{ijk}=\mu+s_k+\gamma_i+e_{ijk}$ ) para el crecimiento de hojas y tallos como se muestra en el (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de modelos método de criterio de Akaike (AIC).

Modelo	AIC
$V_{hoja-ij} = \mu + \gamma_i + e_{ij}$	2059.8
$V_{hoja-ijk} = \mu + s_k + \gamma_i + e_{ijk}$	2009.6
$V_{tallo-ij} = \mu + \gamma_i + e_{ij}$	22.50
$V_{tallo-ijk} = \mu + s_k + \gamma_i + e_{ijk}$	-45.68
<i>AIC= Criterio de Información de Akaike</i>	

En el Cuadro 5 se observa que la inclusión de una covariable mejora significativamente el ajuste de los modelos para ambas variables. Para los datos relacionados con el crecimiento de hojas, el modelo con covariable con un AIC de 2009.6, demuestra ser superior al modelo simple, relevante para describir de manera más precisa el comportamiento de las hojas. La diferencia en los valores de AIC entre ambos modelos indica que el modelo más complejo mejora el ajuste sin añadir demasiada complejidad a los datos.

Por otro lado, para el crecimiento del tallo, el modelo con covariable con un AIC de -45.68, también es claramente el modelo más adecuado, ya que presenta el AIC de menor valor. Este modelo captura la mayor parte de la variación de los datos de tallo, al incluir tanto una covariable como los efectos de los factores aleatorios, lo que permite un mejor ajuste.

Para los modelos mixtos los efectos aleatorios reflejan la variación entre las familias, y los efectos fijos muestran las estimaciones de referencia para el crecimiento (intercepto) y en la velocidad de crecimiento asociadas a las dos fechas adicionales (Cuadro 6). La fecha de referencia (intercepto) es la original, el 14 de junio de 2023.

Cuadro 6. Estimación de parámetros con modelos mixtos para la velocidad de crecimiento de hojas y tallo en *D. cedrosanum*. Los efectos fijos son relativos a la primera fecha (2023-06-14).

Efectos aleatorios			
Modelo	Variable	Grupo	Desviación estándar
$V_{ij}=\mu+\gamma_i+e_{ij}$	Velocidad de hojas	Familias	0.3694
		Residual	1.1051
$V_{tij}=\mu+\gamma_i+e_{ij}$	Velocidad de tallo	Familias	0.0735
		Residual	0.2389
$V_{ijk}=\mu+sk+\gamma_i+e_{ijk}$	Velocidad de hojas	Familias	0.3604
		Residual	1.0619
$V_{ijk}=\mu+sk+\gamma_i+e_{ijk}$	Velocidad de tallo	Familias	0.0722
		Residual	0.2263
Efectos fijos			
Intercepto	2023-07-21	2023-07-22	
3.7816	-0.6989	-2.5193	
0.6301	-0.1773	-0.4352	

En el crecimiento de las hojas las familias presentan una desviación estándar de 0.3604 y un residual de 1.0619, representando la variación no explicada por los efectos de las fechas de siembra y las familias.

Para el efecto fijo de la fecha de siembra, el valor del intercepto es 3.7816. Los coeficientes de las fechas de siembra en relación a la primera fecha son negativos: -0.6989 para el 21 de julio y -2.52 para el 22 de julio de 2023. Estos

valores negativos indican que las plantas sembradas en estas fechas presentaron velocidades de crecimiento de hojas menores en comparación con la primera fecha.

El crecimiento del tallo mostró patrones similares, la desviación estándar de familias fue de 0.0722 con un residual de 0.2263. El intercepto es de 0.6301, y los coeficientes correspondientes a las fechas de siembra también son valores negativos, indicando una disminución en la velocidad de crecimiento del tallo en esas fechas en comparación con la primera fecha.

La prueba de razón de verosimilitud restringida (*Likelihood Ratio Test*, RLRT) evaluó si existe variación significativa entre familias en las variables de velocidad de crecimiento de hojas y de tallo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Prueba de hipótesis sobre efectos aleatorios con máxima verosimilitud restringida.

Modelo	RLRT	Valor P
$V_{hoja-ijk} = \mu + sk + \gamma_i + e_{ijk}$	36.386	$2.20 \times 10^{-16}$
$V_{tallo-ijk} = \mu + sk + \gamma_i + e_{ijk}$	30.013	$2.20 \times 10^{-16}$

*RLRT= Prueba de Razón de la Verosimilitud Restringida; Valor P= Probabilidad del error tipo I.*

Los valores indican una variación altamente significativa ( $p < 0.001$ ) en las velocidades de crecimiento de las hojas y el tallo entre las diferentes familias de medios hermanos.

Los valores bajos de probabilidad respaldan la hipótesis de que existe una variación genética entre las familias en relación con las variables de crecimiento evaluadas e indican que las diferencias en el desempeño de las familias no son atribuibles únicamente al azar o a efectos residuales.

En el Cuadro 8 se presentan las estimaciones de varianza genotípica y heredabilidad para velocidades de crecimiento de hojas y tallo.

Cuadro 8. Estimaciones de varianzas y heredabilidades para crecimiento en *D. cedrosanum*.

Estimaciones	Crecimiento	
	Hoja	Tallo
Varianza genotípica	0.130	0.005
Error estándar varianza genotípica	0.048	0.002
Límite inferior Varianza genotípica	0.060	0.002
Límite superior Varianza genotípica	0.249	0.010
Heredabilidad	0.708	0.681
Error estándar Heredabilidad	0.051	0.064
Límite inferior Heredabilidad	0.607	0.555
Límite superior Heredabilidad	0.808	0.807

Las varianzas genotípicas estimadas para el crecimiento en longitud de hojas (0.130) y diámetro del tallo (0.005) se utilizaron para calcular las varianzas aditivas de la velocidad de crecimiento, obtenidas como cuatro veces la varianza genotípica. Los valores resultantes fueron 0.520 para hojas y 0.021 para tallo. Las estimaciones de heredabilidad para el crecimiento de las hojas y el tallo fueron altas, con valores de 0.708 y 0.681, respectivamente. Estas cifras indican un alto grado de control genético sobre la variación en ambas características de crecimiento, lo cual sugiere que podría ser posible aplicar métodos de mejoramiento genético efectivos para potenciar estas variables en *D. cedrosanum*. Estos valores son consistentes con el hecho de que el material



estudiado proviene de poblaciones naturales, donde se espera una alta variación genética, lo cual facilita la captura de diferencias genéticas significativas en las características de crecimiento.

Para la selección de los mejores genotipos, se utilizaron los resultados obtenidos mediante el Mejor Predictor Lineal Inssegado (BLUP's). La selección de genotipos se basó en los valores de los predictores asociados al diámetro del tallo. Estos predictores permitieron identificar los genotipos con el mayor crecimiento en diámetro, como se muestra en el (Cuadro 9).

Cuadro 9. Predictor relativo de la tasa de crecimiento del tallo en familias de *D. cedrosanum* mediante BLUPs.

.Familias	Desviación		Familias	Desviación	
	Predictor	estándar		Predictor	estándar
UA2002	0.1311	0.0378	UA1089	0.0093	0.0401
UA1100	0.1199	0.0407	PG05	-0.0074	0.0395
SM175	0.0692	0.0437	UA1097	-0.0087	0.0421
PG04	0.0631	0.0421	UA2005	-0.0117	0.0389
UA1103	0.0607	0.0383	TN04	-0.0154	0.0414
PG02	0.0476	0.0421	SM140	-0.0222	0.0414
GC57	0.0329	0.0389	SM151	-0.0333	0.0389
CA05	0.0312	0.0421	UA2004	-0.0385	0.0395
CA04	0.0306	0.0401	TN02	-0.0514	0.0401
UA1099	0.0291	0.0421	CA03	-0.0527	0.0421
TN01	0.0230	0.0473	GC12	-0.0528	0.0421
PG07	0.0227	0.0414	CA02	-0.0533	0.0407
UA2007	0.0191	0.0395	PG06	-0.0583	0.0383
UA2001	0.0173	0.0421	UA2003	-0.0685	0.0389
UA2006	0.0161	0.0407	GC32	-0.1050	0.0383
			RP1	-0.1437	0.0395

Los resultados muestran las predicciones de la velocidad de crecimiento del tallo para cada familia. Las familias con las mejores estimaciones son aquellas que exhiben valores positivos en el predictor, que indica un crecimiento superior. En este sentido, la familia UA2002 se destaca como la más prometedora, con un predictor de 0.1311 y una desviación estándar condicional de 0.0378, de manera similar, la familia UA1100, con un predictor de 0.1199 y una desviación estándar de 0.0407, también muestra un crecimiento favorable. Otras familias que se

destacan son la SM175 (predictor de 0.0692), PG04 (predictor de 0.0631) y UA1103 (predictor de 0.0607), aunque con valores ligeramente más bajos.

Por otro lado, las familias con predictores negativos, como RP1 y GC32, presentan una dinámica de crecimiento inferior en comparación con las mejores familias. En nuestro caso, la familia RP1, con un predictor de -0.1437 y una desviación estándar de 0.0395, representa el genotipo con el menor crecimiento estimado. Igualmente, las familias GC32 (-0.1050) y UA2003 (-0.0685) presentan predictores negativos que reflejan un bajo potencial de crecimiento.

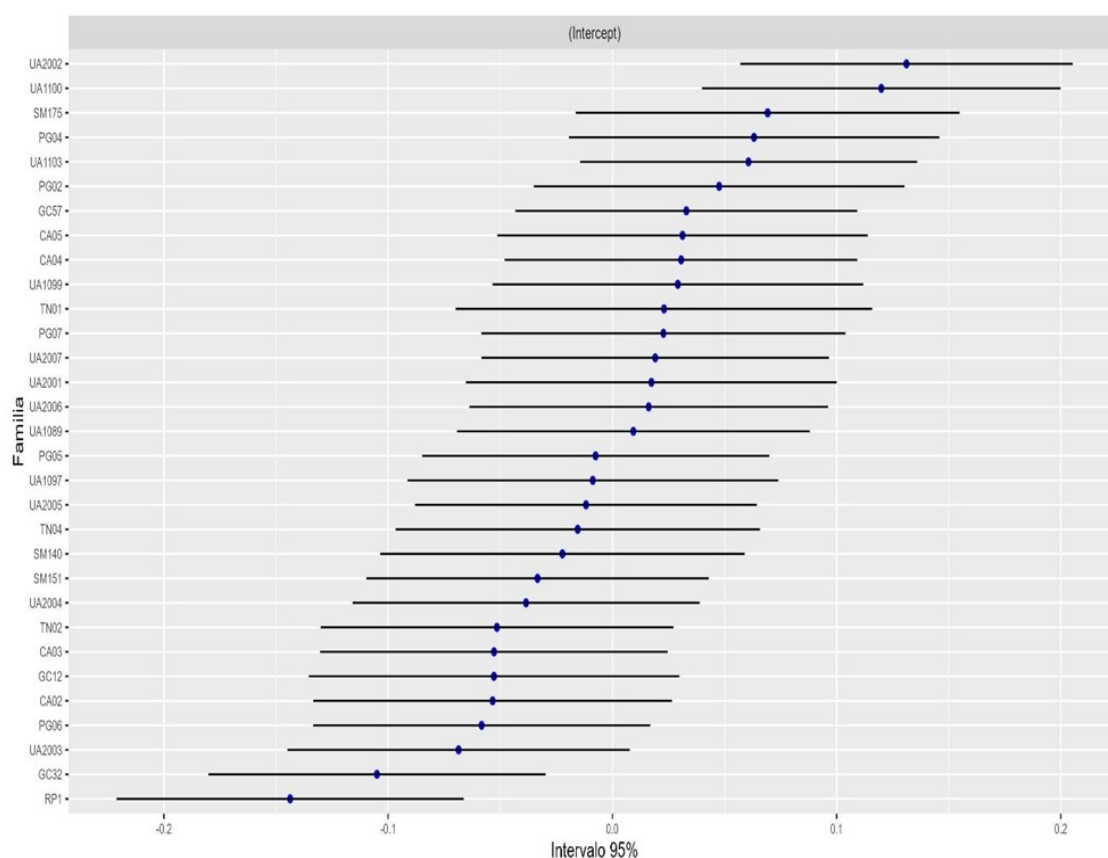


Figura 9. Efectos aleatorios para velocidad de crecimiento en tallo de *D. cedrosanum*.

Las mejores familias identificadas en la Figura 9, UA2002, UA1100, SM175, PG04, UA1103, PG02, GC57, CA05, CA04 y UA1099 son las que presentan

mayor velocidad de crecimiento del tallo, lo que las convierte en las opciones más adecuadas para la selección de genotipos con alto potencial de crecimiento en programas de mejora genética de *D. cedrosanum*.

## CONCLUSIONES

El mejor modelo de crecimiento temprano para *D. cedrosanum* evaluado en este estudio fue el monomolecular con un parámetro fijo ( $\beta = 1$ ). Las varianzas aditivas estimadas 0.52 para hojas y 0.021 para tallo y heredabilidades altas (0.708 para hojas y 0.681 para tallo) indican una significativa aportación del control genético sobre la variación en la dinámica de crecimiento de *D. cedrosanum*. Esto sugiere que los métodos de mejoramiento genético pueden ser efectivos para selección de genotipos de crecimiento rápido. El análisis de BLUP mostró que las familias *UA2002*, *UA1100*, *SM175*, *PG04*, *UA1103*, *PG02*, *GC57*, *CA05*, *CA04* y *UA1099* fueron las más prometedoras en cuanto a crecimiento de tallo, mientras que familias como *RP1* y *GC32* presentaron una dinámica de crecimiento baja. Estos resultados permiten identificar familias con alto potencial de crecimiento, y pueden formar parte de un programa de selección y mejoramiento genético de *D. cedrosanum* para el establecimiento de plantaciones.

## LITERATURA CITADA

- Anchondo E. (2014). La bebida del Sotol, su patrimonio cultural y su vínculo con el papel universitario. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. Recuperado de <http://www.eumed.net/rev/cccss/30/sotol.html>
- Akaike H. (1974). *A new look at the statistical model identification*. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>.
- Barraza-Morales A., Sánchez Teyer F. L., Robert M., Esqueda M., y Gardea A. (2006). Variabilidad genética con *Agave angustifolia* Haw. de la Sierra Sonorense, México, determinada con marcadores AFLP. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 1-8.
- Becerra-López R., Pérez-Moreno R., y Sánchez-López M. (2020). Impact of over exploitation on wild populations of *Dasyilirion spp.* in northern Mexico. *Ecología Aplicada*, 15(3), 211-220.
- Bogler D. J. (1995). Systematics of *Dasyilirion*: taxonomy and molecular phylogeny. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 56:69-76.
- Cano P. A., y Martínez B. O. U. (2007). Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) en el estado de Coahuila. Saltillo, Coahuila México: (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) *INIFAP*. ISBN: 978-970-43-0277-1.

- Cano P., A., Martínez, B., O., Berlanga, R., C., A., Villavicencio, G., E., E., y Castillo, Q., D. (2011). Guía para la evaluación de existencias de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) en poblaciones naturales del estado de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México: INIFAP. ISBN: 978-607-425-593-5.
- Chávez-García A. S., Hernández-Ramos J., Muñoz-Flores H. J., García-Magaña J., Gómez-Cárdenas M., y Gutiérrez-Contreras M. (2022). Plasticidad fenotípica de progenies de árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl. superiores en producción de resina en vivero. *Madera y bosques*, 28(1), e2812381.
- Correa J., y Salazar J. (2016). *Introducción a los modelos mixtos*. Escuela de Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, primera edición.
- Di-Benedetto A., y Tognetti J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(3), 258-282.
- Fekedulegn D., MacSiurtain M., y Colbert J. (1999). Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silva Fennica*, 33(4), 327–336. <https://doi.org/10.14214/sf.650>
- Flores-Gallegos A. C., Cruz-Requena M., Castillo-Reyes F., Rutiaga-Quiñones O. M., Torre L., S., Paredes-Ortíz A., y Rodríguez-Herrera R. (2019). Sotol, an alcoholic beverage with rising importance in the world wide commerce. En Mihai, G. A., & Maria, H.A. (Eds.), *Alcoholic Beverages* (pp. 141-160). *Elsevier* Reino Unido. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815269-0.00005-2>

- Francisco-Francisco N., García-Osuna H. T., Benavides-Mendoza A., Hernández- Juárez A., y Ramírez-Godina F. (2016). Morfología y anatomía foliar de *Dasyilirion cedrosanum* en diferentes etapas de desarrollo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(7), 1679-1687.
- Gompertz B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513–58. <https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>
- IMPI. (2002) Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Declaración de protección a la denominación de origen sotol. <https://www.gob.mx/impi/acciones-y-programas/declaraciones-generales-de-proteccion-de-denominaciones-de-origen> Fecha de consulta: 25 septiembre 2021.
- James G., Witten D., Hastie T., y Tibshirani R. (2013) *An Introduction to Statistical Learning* (Vol. 103). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Juárez-Morales E., Pérez-González J., y Romero-Hernández C. (2023). Cultivating *Dasyilirion*: Commercial plantations as a solution to the overexploitation crisis. *Botanical Review*, 89(2), 134-146.
- López Barbosa L. A. (2005). El sotol en Coahuila, potencialidades y limitaciones. En: Contreras Delgado C y Orega Ridaura I (eds). *Bebidas y regiones, historia e impacto de la cultura etílica en México*. Plaza y Valdés, S.A. México. Pp 63-84.



- Kaps M., Herring W. O., y Lamberson W. R. (2000). Genetic and environmental parameters for traits derived from the Brody growth curve and their relationships with weaning weight in Angus cattle. *Journal of Animal Science* , 78(6), 1436–1442. <https://doi.org/10.2527/2000.7861436x>
- Madrid-Solórzano J. M. (2021). Advances in pre-germination treatments for sustainable *Dasyllirion* cultivation. *Agroforestry Today*, 32(4), 56-67.
- Madrid-Solórzano J. M., García-Alcaraz J. L., Jiménez M. E., Martínez C. E., y Blanco F. J. (2021). Life cycle analysis of sotol production in Mexico. *Sustainable Food Systems*, 5, 769478. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.769478>
- Muianga C. A., Muniz J. A., Nascimento M. da S., Fernandes T. J., y Savian T. V. (2016). Description of the growth curve of cashew fruits in nonlinear models. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(1), 22-32. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-295/14>
- Muniz J. A., Nascimento M. S., y Fernandes T. J. (2017). Nonlinear models for description of cacao fruit growth with assumption violations. *Revista Caatinga*, 30(1), 250-257. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n128rc>
- Ortiz-López A., Velasco-Velasco V. A., Martínez-Gutiérrez G. A., Campos-Angeles G. V., y Rodríguez-Ortiz G. (2023). Morfología de los frutos de *Dasyllirion spp.* procedentes de la Mixteca Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(2): 78–89. DOI: <https://doi.org/10.60158/rma.v10i2.369>

- Panghal P., Kumar M., y Rani S. (2019). Estimation of annual compound growth rates of guava (*Psidium guajava*) fruit in Haryana using nonlinear model. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(4), 778-784.
- Ramírez-Gottfried R., Puente-Valenzuela C. O., Chávez-Simental J. A., Espinosa-Palomeque B., García-Carrillo M., Guillén-Enríquez R., y González-Cervantes G. (2021). Extracto de vermicompost como medio basal en la etapa de multiplicación y enraizamiento in vitro de *Dasyilirion cedrosanum*. *Terra Latinoamericana*, 39, e997. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.997>
- Reyes-Valdés M. H., Benavides-Mendoza A., Ramírez-Rodríguez H., Villarreal-Quintanilla J. A. (2013). Biología e importancia del sotol (*Dasyilirion spp*). Parte II: Ecofisiología, usos e interrogantes. *Planta* 8: 16-20.
- Reyes-Valdés M. H., López-Soto, J., y González-Hernández P. (2019). Genetic variability and sustainability in *Dasyilirion cedrosanum*. *Biodiversity Journal*, 7(4), 123-135.
- Reyes-Valdés MH, Palacios R, Rivas-Martínez EN, Robledo-Olivo A, Antonio-Bautista A, Valdés-Dávila CM, Villarreal-Quintanilla JA, Benavides-Mendoza A. 2019. The sustainability of Mexican traditional beverage sotol: ecological, historical, and technical issues. *Processing and sustainability of beverages* 2: 103-137. DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815259-1.00004-5>
- Royal Botanic Gardens, Kew. (2023). State of the World's Plants and Fungi 2023: What we know, what we don't, and how we find out. Kew Publishing. Recuperado de <https://www.key.org>

- Sánchez A., Coronel-Lara Z., Gutiérrez A., Vargas G., Coronado M. L., y Esqueda M. (2020). Aclimatación y trasplante de vitroplantas de *Agave angustifolia* Haw. en condiciones silvestres. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2403>
- Serafín-Higuera E. L., Antonio-Bautista A., y Benavides-Mendoza A. (2022). Morfología de *Dasylirion cedrosanum* y su correlación con imágenes en localidades del Sureste de Coahuila. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3198>
- Sari B. G., Lúcio A. D., Santana C. S., y Savian T. V. (2019). Describing tomato plant production using models. *Scientia Horticulturae*, 243, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.044>
- Solórzano-Thompson J., Paniagua-Molina J., y Barboza-Navarro D. (2021). Ajuste de diferentes modelos de crecimiento no lineal al rendimiento de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) a lo largo del ciclo de vida del cultivo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 34(1), 115–126. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.5096>
- Vega-Cruz J., Melgoza-Castillo A., y Sierra-Tristán J. S. (2006). Caracterización del crecimiento de dos especies de sotol (*Dasylirion leiophyllum* Engelm. ex Trelease y *D. sereke* Bogler) fertilizadas con nitrógeno y fósforo. *Ciencia Forestal en México*, 31(99), 55-71.
- Villavicencio-Gutiérrez E. (2007). Strategies for the commercial cultivation of *Dasylirion* spp. *Plant Production Science*, 17(4), 211-219.

Von Bertalanffy L. (1957). Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology*, 32(3), 217–231. <https://doi.org/10.1086/401873>