

Análisis de crecimiento temprano en plantas de sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.) en condiciones de invernadero

Early growth analysis in sotol plants (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.) under greenhouse conditions

Gustavo Trinidad Velázquez-Cruz¹ , Dulce Victoria Mendoza-Rodríguez¹ , Ana Luisa Gómez-Espejo¹ , M. Humberto Reyes-Valdés^{1*} 

¹Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: mathgenome@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 11 de febrero 2026

Aceptado: 11 de mayo 2026

RESUMEN. Las especies del género *Dasyllirion* (sotol) son plantas nativas de las zonas áridas y semiáridas del norte de México y del sur de Estados Unidos. Su importancia económica y cultural radica principalmente en su utilización para la elaboración de la bebida alcohólica conocida como sotol. Sin embargo, su aprovechamiento está afectando las poblaciones naturales, lo que demanda alternativas de producción de planta. El presente estudio tuvo como finalidad describir el crecimiento temprano de *D. cedrosanum* mediante el análisis de la longitud de las hojas y el diámetro del tallo. Para ello, se empleó información retrospectiva obtenida a partir de 600 plantas mantenidas bajo condiciones controladas de invernadero. Con los datos obtenidos, se evaluaron cinco modelos de crecimiento: a) Brody, b) Mitcherlitch, c) Gompertz, d) Monomolecular y e) Logístico, de los cuales únicamente los modelos Monomolecular y Logístico convergieron. Ambos fueron comparados entre sí mediante validación cruzada, donde el modelo Monomolecular flexible tuvo un mejor desempeño con los datos observados. El modelo evidenció un patrón de crecimiento activo durante las etapas iniciales, seguido de una desaceleración tanto en la longitud de las hojas como en el diámetro del tallo. Se alcanzaron promedios para longitud de hojas de 57.8 cm, y de 14.1 mm para diámetro de tallo. A pesar de haberse desarrollado en condiciones controladas, las plantas presentaron una elevada variación en sus tasas de crecimiento. La comprensión del crecimiento temprano desde la perspectiva de producción de planta resulta fundamental para optimizar protocolos de manejo en vivero, favoreciendo una mayor eficiencia en la obtención de plantas de calidad en menor tiempo.

Palabras clave: *Dasyllirion*, modelos de crecimiento, validación cruzada.

ABSTRACT. Species of the genus *Dasyllirion* (sotol) are native to the arid and semi-arid regions of northern Mexico and the southern United States. Their economic and cultural importance is primarily associated with the production of the distilled alcoholic beverage known as sotol. However, increasing exploitation of wild populations has raised concerns regarding the sustainability of the resource, highlighting the need for alternative plant production strategies. The objective of this study was to characterize the early growth of *D. cedrosanum* through the analysis of leaf length and stem diameter. To accomplish this, retrospective data from 600 plants grown under controlled greenhouse conditions were analyzed. Based on the data obtained, five growth models were evaluated: (a) Brody, (b) Mitcherlitch, (c) Gompertz, (d) Monomolecular, and (e) Logistic, of which only the Monomolecular and Logistic models converged. Both were compared using cross-validation, where the flexible monomolecular model showed better performance with the observed data. The model revealed an active growth pattern during the initial stages, followed by a slowdown in both leaf length and stem diameter. Leaf length reached an average of 57.8 cm, whereas stem diameter reached 14.1 mm. Despite being developed under controlled conditions, the plants exhibited high variation in their growth rates. Understanding early growth from a plant production perspective is essential for optimizing nursery management protocols, promoting greater efficiency in obtaining high-quality plants in a shorter time.

Keywords: *Dasyllirion*, growth models, cross-validation.

INTRODUCCIÓN

Los sotoles (*Dasyilirion* spp.) constituyen un conjunto de especies nativas que se distribuyen en las regiones áridas y semiáridas del norte de México y el sur de Estados Unidos. Estas plantas son ampliamente conocidas por su aprovechamiento en la elaboración de la bebida alcohólica denominada sotol (Reyes-Valdés *et al.* 2019). Actualmente, se reconocen 23 especies dentro del género, cuya distribución geográfica se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta Oaxaca, México (POWO 2024).

Durante las últimas décadas, la popularidad del sotol ha aumentado significativamente, lo que ha incrementado la demanda de materia prima proveniente principalmente de poblaciones naturales (Encina-Domínguez *et al.* 2013). Esta presión de aprovechamiento ha provocado una disminución considerable de las poblaciones naturales en entidades como Chihuahua y Durango (Becerra-López *et al.* 2020). Esta situación representa un riesgo para la sostenibilidad del recurso, ya que la continuidad de la producción de bebidas derivadas del sotol depende de la disponibilidad de plantas en su ambiente natural (Ramírez-Gottfried *et al.* 2021).

Una estrategia para reducir la presión sobre las poblaciones silvestres consiste en el establecimiento de plantaciones comerciales de *Dasyilirion* (Juárez-Morales *et al.* 2023). Este enfoque permitiría disminuir la extracción directa de plantas de su hábitat natural y favorecer la conservación de la especie mediante su manejo bajo condiciones controladas desde etapas tempranas de desarrollo (Ainembabazi y Angelsen 2014). Asimismo, permitirían un control más eficiente de su crecimiento, manejo agronómico y cosecha, lo que incrementaría el uso más sostenible del recurso (Madrid-Solórzano *et al.* 2021).

El éxito de una plantación comercial depende en gran medida de la disponibilidad de plantas vigorosas producidas en vivero y de un adecuado crecimiento durante las primeras etapas de desarrollo, ya que estos factores influyen directamente en el establecimiento, supervivencia y desempeño de las plantas en campo (Riikonen y Luoranen 2018). Diversas especies forestales no maderables han sido establecidas con éxito en sistemas de plantación comercial, siendo algunas de ellas *Agave lechuguilla* (Castillo-Quiroz *et al.* 2012), *Euphorbia antisiphilitica* (candelilla) (López-Serrano *et al.* 2021), así como orégano (CONAFOR 2011) y otras hierbas aromáticas de interés productivo.

Los esfuerzos dirigidos al estudio de sotol con fines de reforestación han sido limitados; no obstante, se han desarrollado algunos trabajos en condiciones de laboratorio e invernadero enfocados en la aplicación de tratamientos pregerminativos para la producción de plántulas (Madrid-Solórzano *et al.* 2021). Sin embargo, este proceso implica la germinación de semillas y su posterior trasplante a bolsas de polietileno con sustratos específicos, lo que representa una desventaja, ya que estos métodos suelen ser lentos y no optimizan de manera eficiente el uso de la semilla (Ramírez-Gottfried *et al.* 2021).

El desarrollo de programas de establecimiento de plantaciones de sotol requiere una comprensión más profunda de los patrones de crecimiento de la especie, particularmente en relación con el desarrollo foliar y de tallo. Estas estructuras son determinantes para estimar la cantidad de material vegetal disponible para aprovechamiento (Serafín-Higuera *et al.* 2022). El

análisis del crecimiento de hojas y tallos no solo proporciona información vital para la selección de plantas más productivas, sino que también proporciona datos críticos sobre su capacidad de regeneración y adaptación a diferentes condiciones y ambientes (Benedetto y Tognetti 2016). Además, estas mediciones resultan fundamentales para estimar el tiempo requerido para que las plantas alcancen un estado de desarrollo adecuado para su aprovechamiento, contribuyendo al mismo tiempo a reducir la presión sobre las poblaciones naturales. Asimismo, el monitoreo periódico permite estimar la tasa de crecimiento tanto en los tallos como en las hojas.

El presente trabajo tuvo como propósito caracterizar el crecimiento de sotol (*D. cedrosanum*) mediante el análisis de la longitud foliar y el diámetro del tallo. Para ello, se adoptó un enfoque retrospectivo basado en información previamente generada con fines distintos a los planteados en esta investigación, pero que resulta valiosa para comprender aspectos del desarrollo de la especie. Se emplearon registros de crecimiento obtenidos de manera periódica en plantas cultivadas bajo condiciones de invernadero, originalmente destinadas al establecimiento de experimentos de plantación, los cuales permitieron identificar y caracterizar patrones de crecimiento temprano de la especie.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material biológico

Se utilizaron semillas de sotol (*D. cedrosanum*) colectadas en dos localidades del estado de Coahuila, México (Tabla 1).

Tabla 1. Localización geográfica de las colectas de semilla de sotol (*D. cedrosanum* Trel.) evaluadas.

Localidad	Latitud Norte	Longitud Oeste	Elevación
Ejido San Martín de las Vacas, Saltillo.	25° 32' 22.6"	101° 11' 1.6"	1793 metros sobre el nivel del mar
Ejido Lucío Blanco, Cuatro Ciénegas (Subprovincia Laguna de Mayrán).	26° 09' 53.4"	102° 11' 13.1"	1456 metros sobre el nivel del mar

Desarrollo de plántulas

Las semillas obtenidas durante la cosecha se conservaron en recipientes herméticos a 8 °C hasta su utilización. Previo al establecimiento de los ensayos, se realizó un protocolo de desinfección que consistió en la inmersión de las semillas en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 1% durante un minuto, seguida de un tratamiento con alcohol al 70% por el mismo periodo. Finalmente, las semillas fueron enjuagadas dos veces con agua destilada, durante un minuto cada enjuague.

La capacidad germinativa de las semillas se evaluó en condiciones controladas en dos repeticiones. Para ello, se colocaron 10 por unidad experimental en cajas Petri provistas con papel filtro Whatman No. 41 previamente humedecido. Las cajas se mantuvieron en una cámara de crecimiento (LAB-LINE BIOTRONETTE) bajo temperaturas entre 24 y 26 °C y un fotoperiodo de 12 h luz: 12 h oscuridad durante 21 días. Con el propósito de reducir problemas fitosanitarios, se

aplicó una solución de Captan al 1 % tres veces por semana. Una vez confirmada la germinación, las plántulas fueron utilizadas para las etapas posteriores del estudio.

Las plántulas emergidas se establecieron inicialmente en charolas de 180 cavidades utilizando una mezcla de turba de Sphagnum (*Peat Moss*) y vermiculita grado 1 en proporción 3:1 (v/v). Durante esta fase, las plántulas permanecieron bajo las mismas condiciones ambientales empleadas en la evaluación de germinación. Cuando alcanzaron aproximadamente 10 cm de altura, se trasplantaron a bolsas de plástico con capacidad de 1.3 L que contenían el mismo sustrato y posteriormente fueron trasladadas al invernadero.

Dentro del invernadero, las plantas se distribuyeron aleatoriamente y recibieron un manejo homogéneo. El suministro de agua se efectuó tres veces por semana, aplicando 350 mL por contenedor en cada evento de riego. Asimismo, se realizaron inspecciones periódicas para verificar el estado fitosanitario y detectar oportunamente la presencia de plagas o enfermedades. La nutrición mineral se complementó mediante la aplicación semestral de tabletas fertilizantes comerciales (Nitro Tabs), formuladas con nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, hierro y zinc.

Registro de variables de crecimiento

Se evaluaron 600 plantas de sotol mediante mediciones periódicas de longitud foliar y diámetro del tallo. Las observaciones se realizaron aproximadamente cada dos meses a lo largo de un periodo de 600 días posteriores a la siembra. Para asegurar la trazabilidad de la información, cada individuo fue identificado mediante un sistema de marcaje permanente.

La longitud foliar se determinó en las dos hojas de mayor tamaño de cada planta. Las mediciones se efectuaron con una regla graduada, registrando la distancia desde la inserción de la hoja en el tallo hasta su ápice. Por otra parte, el diámetro del tallo se obtuvo con un vernier digital mediante dos lecturas perpendiculares entre sí: una correspondiente al eje de mayor amplitud y otra al eje menor. Ambas mediciones se realizaron en la sección más representativa del tallo.

Análisis estadístico de los datos

Inicialmente se efectuó un análisis exploratorio de los datos mediante diagramas de dispersión que relacionaron las variables de crecimiento con el tiempo transcurrido desde la siembra. Estas representaciones gráficas permitieron identificar tendencias generales y evaluar la forma de las trayectorias de crecimiento.

Considerando observaciones realizadas en plantas adultas, se definieron valores máximos teóricos para las variables analizadas, estableciendo asíntotas de 120 cm para longitud de hoja y 600 mm para diámetro de tallo. Posteriormente se ajustaron diferentes funciones de crecimiento no lineales, incluyendo los siguientes modelos:

Modelo de Brody:

$$y(t) = \alpha - (\alpha - w_0)e^{(-kt)}$$

Donde $y(t)$ es el tamaño en el tiempo t , α es el valor asintótico, w_0 es el tamaño inicial y k es la tasa de crecimiento (Kaps *et al.* 2000).

Modelo de Mitcherlitch:

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

Donde $y(t)$ es el tamaño en el tiempo t , α es el valor asintótico, β es el rango de crecimiento y k es la tasa de crecimiento (Fekedulegn *et al.* 1999).

Modelo de Gompertz:

$$y(t) = \alpha e^{(-\beta e^{-kt})}$$

Donde $y(t)$ es el tamaño en el tiempo t , α es el valor asintótico, β es una constante relacionada con el tamaño inicial y k es la tasa de crecimiento (Gompertz 1825).

Modelo Monomolecular:

$$y(t) = \alpha(1 - \beta e^{(-kt)})$$

Donde $y(t)$ es el tamaño en el tiempo t , α es el valor asintótico, β es el rango de crecimiento y k es la tasa de crecimiento (Von-Bertalanffy 1957).

Modelo Logístico:

$$y(t) = \frac{\alpha}{[1 + \beta e^{(-kt)}]}$$

Donde $y(t)$ es el tamaño en el tiempo t , α es la capacidad máxima, β es el valor inicial y k es la tasa de crecimiento (Fekedulegn *et al.* 1999).

La elección de los modelos se basó en su amplia utilización para describir procesos biológicos de crecimiento en especies vegetales y animales (Solórzano-Thompson *et al.* 2021, Kaps *et al.* 2000).

Todos los análisis se desarrollaron en el entorno estadístico R (R Core Team 2023), empleando los paquetes *growthmodels* (Rodríguez 2023), *ggplot2* (Wickham 2016) y *nlstools* (Baty *et al.* 2015). La evaluación comparativa de los modelos se realizó mediante validación cruzada, utilizando el error de predicción como criterio de desempeño.

La base de datos estuvo conformada por 1,793 registros, de los cuales 1,500 se asignaron al conjunto de entrenamiento y 293 al conjunto de prueba. Esta partición permitió estimar los parámetros de los modelos con una fracción de los datos y posteriormente evaluar su capacidad predictiva con observaciones independientes, de acuerdo con las técnicas de aprendizaje estadístico (James *et al.* 2013).

La precisión de cada modelo se determinó mediante el cálculo del Cuadrado Medio del Error (CME) en el conjunto de prueba. Este procedimiento permitió reducir el riesgo de sobreajuste y obtener una evaluación más objetiva de la capacidad predictiva de las funciones analizadas. Durante el proceso de estimación, los modelos de Brody, Gompertz y Mitcherlitch presentaron problemas de convergencia, por lo que la comparación final se efectuó entre dos variantes del modelo Monomolecular (una con β fijo igual a 1 y otra con β estimado libremente) y un modelo Logístico.

RESULTADOS

Dinámica de crecimiento

El crecimiento de las plantas a través del tiempo en días para las variables medidas muestra una tendencia lineal en los primeros 200 días (Figura 1), después de lo cual la pendiente empieza a disminuir, especialmente en longitud de hojas (A).

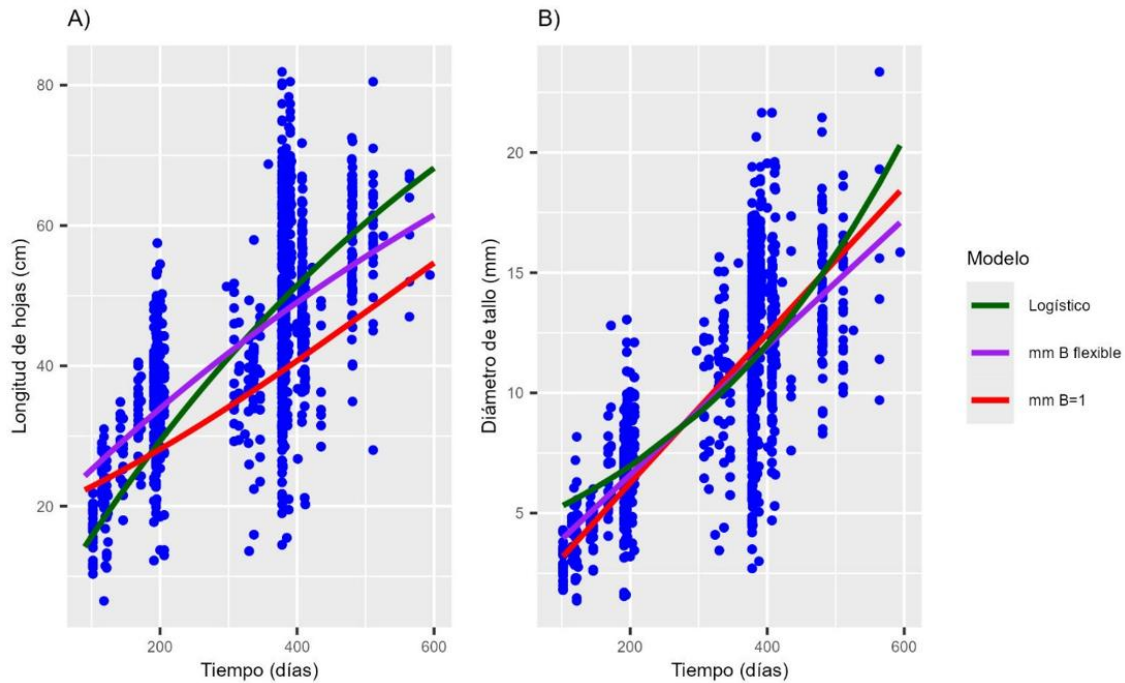


Figura 1. Curvas de ajuste de modelos de crecimiento Monomolecular fijo, Monomolecular flexible y Logístico en *D. cedrosanum*. A) Crecimiento de longitud de hojas, B) Crecimiento de diámetro de tallos.

El crecimiento lineal inicial alcanzó una longitud promedio de 33 cm (Tabla 2), lo que sugiere que las plantas se encontraban en una fase muy activa de desarrollo. Entre los 200 y 400 días, se alcanzó un promedio de longitud de 46.6 cm. Después de ese intervalo, la pendiente de crecimiento se vuelve más pequeña. Esto demuestra que el crecimiento sigue siendo activo a un ritmo moderado. A pesar de la desaceleración, las plantas continuaron desarrollándose, ya que, en el último intervalo del estudio, de 400 a 600 días, la longitud máxima promedio de hojas alcanzó los 57.8 cm.

Tabla 2. Medias alcanzadas en las diferentes etapas del crecimiento de *D. cedrosanum* Trel.

Tiempo (días)	Longitud de hojas (cm)	Diámetro de tallo (mm)
Inicial hasta 200	33.0	6.3
Intermedio (201- 400)	46.6	11.7
Final (401- 600)	57.8	14.1

El crecimiento del diámetro mostró un comportamiento similar al de la longitud de hojas. Durante los primeros 200 días, el diámetro promedio alcanzó los 6.3 mm, con una fase lineal de desarrollo inicial. Entre los días 200 y 400 el diámetro promedio alcanzó los 11.7 mm, con un crecimiento sostenido en la circunferencia del tallo. En la etapa final del estudio, de 400 a 600 días, el diámetro promedio alcanzó los 14.1 mm. Aunque la tasa de crecimiento se desacelera, se observa un engrosamiento continuo del tallo.

Precisión y capacidad predictiva de modelos

Los resultados obtenidos mediante el procedimiento de validación cruzada permitieron comparar el desempeño predictivo de los diferentes modelos de crecimiento evaluados (Tabla 3). Se observó que los modelos de Brody, Mitcherlitch y Gompertz no alcanzaron convergencia durante el proceso de ajuste, lo que indica que no lograron representar adecuadamente los datos observados para ninguna de las variables analizadas.

Tabla 3. Resultados de validación cruzada para modelos de crecimiento de *D. cedrosanum* Trel.

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 $\beta = \text{flexible}$	103.2	7.3
Logístico	104.4	7.9

Las curvas de ajuste de los modelos (Figura 1) muestran que el modelo Monomolecular flexible, tanto para el crecimiento en longitud de hojas (Figura 1A) como para el diámetro del tallo (Figura 1B), presenta una mejor adecuación en comparación con el modelo logístico. El modelo Monomolecular es el único que exhibe una tendencia de crecimiento cuya pendiente disminuye gradualmente para diámetro de tallo. En contraste, el modelo logístico presenta una pendiente que se incrementa con el tiempo para esta variable.

Entre los modelos que lograron converger, el Monomolecular con parámetro β estimado libremente presentó los menores errores de predicción, lo que respalda su uso para describir el crecimiento inicial de *D. cedrosanum*. Este modelo representó de manera más adecuada las variaciones observadas durante los primeros años de desarrollo de las plantas. Sin embargo, para la variable diámetro del tallo, la diferencia en capacidad predictiva respecto al modelo Monomolecular con β fijo ($= 1$) fue relativamente pequeña.

DISCUSIÓN

Las variaciones en la capacidad predictiva de los modelos (Figura 1A) para el crecimiento de las hojas muestran que el modelo Logístico, con una tasa de crecimiento $k = 0.002815$ y un rango de crecimiento $\beta = 4.487$ en longitud de hojas, proporciona una aproximación general aceptable con una tendencia de predicción aproximadamente lineal. No obstante, este modelo tiende a subestimar el crecimiento real de las hojas, particularmente en las etapas intermedias de desarrollo.

El modelo Monomolecular fijo ($\beta = 1$) con un parámetro $k = 0.00005241$ muestra una tendencia casi lineal entre el tiempo y el crecimiento de las hojas durante las etapas iniciales de desarrollo. Este patrón indica un aumento continuo en el crecimiento, manteniendo una tasa de crecimiento

estable, lo cual es relevante para una especie de crecimiento lento como *D. cedrosanum*. Sin embargo, esta representación lineal puede no capturar adecuadamente las complejidades del crecimiento en etapas posteriores, donde la dinámica puede cambiar. Esto subraya la necesidad de ajustar el modelo para reflejar las variaciones en el crecimiento a medida que la planta se desarrolla, lo que sugiere que se requieren modelos más flexibles para una representación más precisa.

El modelo Monomolecular flexible ($\beta = 0.8699$) con parámetro $k = 0.0009649$, para la longitud de hojas mostró una curva de crecimiento más suave, que puede ser más adaptable a las variaciones del crecimiento. Esta forma continua de la línea de tendencia contrasta notablemente con modelos más rígidos, que no logran capturar la dinámica del crecimiento de manera adecuada. La línea de tendencia a los datos muestra que el modelo flexible es capaz de seguir la tendencia general del crecimiento de manera más precisa.

En cuanto a la dinámica de crecimiento del diámetro del tallo (Figura 1B), el modelo Logístico ($k = 0.002774$, $\beta = 148.4$) predice un crecimiento moderado en las etapas iniciales, pero también presenta una ligera sobrepredicción de los valores, lo que resulta en una predicción de crecimiento más acelerada en comparación con el comportamiento de la planta. A medida que avanza el tiempo, la línea de tendencia se ajusta con mayor precisión a la aceleración del crecimiento observado, alineándose mejor con los datos. No obstante, en las fases posteriores del crecimiento, el modelo logístico tiende de nuevo a sobreestimar el crecimiento. Esto resalta la capacidad para captar el patrón general del crecimiento, aunque también pone de manifiesto sus limitaciones para reflejar los patrones de crecimiento del tallo.

Resultados previos de estudios de crecimiento en frutos de anacardo (Muianga *et al.* 2016) y lechuga (Carini *et al.* 2020) confirman la efectividad del modelo de crecimiento logístico en especies de ciclo corto y morfología homogénea, lo que demuestra que la idoneidad de un modelo depende críticamente del tipo de planta, de su entorno y del periodo de tiempo de crecimiento. De manera similar, Jane *et al.* (2020) destacaron la importancia de seleccionar modelos adecuados para diferentes variedades de caña de azúcar, reafirmando que no existe un modelo único que sea aplicable a todas las especies. En contraste, la evolución del diámetro del tallo en el modelo Monomolecular fijo ($k = 0.00005241$, $\beta = 1$) se adapta bien a las diferentes fases, donde el crecimiento tiende a seguir un patrón casi lineal. Este modelo proporciona una visión útil en las primeras etapas del crecimiento.

Por otro lado, el modelo Monomolecular con parámetro flexible ($k = 0.00004525$; $\beta = 0.998$), que incorpora un parámetro adicional durante la fase inicial del crecimiento, proporcionó una representación más precisa de la dinámica de incremento del diámetro del tallo. Esta mayor flexibilidad permitió describir con mayor exactitud los cambios observados a lo largo del tiempo. Resultados similares han sido reportados en otros estudios donde el modelo Monomolecular ha sido utilizado para estimar tasas de crecimiento en cultivos perennes, como el guayabo, destacando su utilidad para especies que presentan procesos de desarrollo prolongados y patrones de crecimiento graduales (Panghal *et al.*, 2019). Los resultados obtenidos indican que el modelo Monomolecular flexible fue el que mejor describió el crecimiento inicial de *D. cedrosanum*. Su capacidad para ajustarse a las variaciones observadas en los datos sugiere que constituye una

herramienta adecuada para representar la dinámica de desarrollo durante las primeras etapas de crecimiento de esta especie.

La superioridad de este modelo también se reflejó en los menores valores de error de predicción registrados durante la validación cruzada, con errores de prueba de 103.2 para la longitud foliar y 7.3 para el diámetro del tallo. En comparación, la versión con parámetro fijo ($\beta = 1$) presentó errores de 118.9 y 7.6 para las mismas variables. Estos resultados coinciden con lo señalado por Muñiz *et al.* (2017), quienes destacan que la incorporación de parámetros flexibles puede mejorar significativamente la capacidad de los modelos para representar procesos biológicos complejos, particularmente cuando los supuestos simplificados de crecimiento no se ajustan completamente a los datos observados.

El presente trabajo ofrece un panorama de lo que se puede esperar en aproximadamente 20 meses de crecimiento de plantas de sotol en el invernadero, un tiempo adecuado para proceder con la aclimatación y el trasplante al campo. Se muestra un crecimiento dinámico, casi lineal, que se ajusta a un modelo Monomolecular flexible, y que permite a quienes produzcan plantas con fines de cultivo o reforestación, hacer proyecciones de crecimiento para una planeación apropiada.

CONCLUSIONES

Los modelos de crecimiento analizados en este estudio demuestran que el modelo Monomolecular flexible es el más efectivo para representar el crecimiento temprano de *D. cedrosanum*, especialmente en lo que concierne al diámetro de tallo. La validación cruzada confirmó la superioridad de este modelo en comparación con el modelo Logístico y otros enfoques no lineales, resaltando su capacidad para capturar con mayor precisión la dinámica de crecimiento en las etapas iniciales. Estos resultados indican que el modelo Monomolecular no solo se ajusta mejor a los datos observados, sino que también proporciona predicciones más confiables para el manejo y cultivo de esta especie. Bajo este esquema, el patrón de crecimiento de los sotesos en invernadero durante un período aproximado de 20 meses comprende una fase lineal seguida de una ligera disminución en la velocidad de crecimiento. Esta disminución en el crecimiento al final del período es clara en longitud de hojas, pero apenas perceptible en el diámetro de tallo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo deriva parcialmente de la tesis de maestría del primer autor, desarrollada en el Programa de Maestría en Ciencias en Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). El primer autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la realización de sus estudios de posgrado y a la UAAAN por el apoyo financiero para el desarrollo del proyecto 38111425105001-2503.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Ainembabazi JH, Angelsen A (2014) Do commercial forest plantations reduce pressure on natural forests? Evidence from forest policy reforms in Uganda. *Forest Policy and Economics* 40: 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.12.003>
- Baty F, Ritz C, Sandrine C, Brutsche M, Flandrois JP, Delignette-Muller ML (2015) A Toolbox for Nonlinear Regression in R: The Package *nlstools*. *Journal of Statistical Software* 66(5): 1-21. <https://doi.org/10.18637/jss.v066.i05>
- Becerra-López JL, Rosales-Serna R, Ehsan M, Becerra-López JS, Czaja A, Estrada-Rodríguez JL, Romero-Méndez U, Santana-Espinosa S, Reyes-Rodríguez CM, Domínguez-Martínez PA (2020) Climatic change and habitat availability for three sotol species in México: a vision towards their sustainable use. *Sustainability* 12(8): 3455. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Benedetto AD, Tognetti J (2016) Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 42(3): 258-282.
- Castillo-Quiroz DC, Cano-Pineda A, Berlanga-Reyes CA (2012) Establecimiento y aprovechamiento de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.). Comisión Nacional Forestal-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Establecimiento_y_aprovechamiento_de_la_lechuguilla_Agave%20lechuguilla_Torr.pdf. Fecha de consulta 10 de enero de 2025.
- Carini F, Cargnelutti-Filho A, Souza JMD, Pezzini RV, Ubessi C, Kreutz MA (2020) Fitting a logistic growth model to yield traits of lettuce cultivars growing in summer. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 14(1): 104-114. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i1.8955>
- CONAFOR (2011) Paquete tecnológico para la producción de orégano (*Lippia* spp.). Coordinación General de Educación y Desarrollo Tecnológico, Gerencia de Desarrollo y Transferencia de Tecnología, Comisión Nacional Forestal. <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/OREGANO.pdf>. Fecha de consulta 5 de enero de 2025.
- Encina-Domínguez JA, Meave JA, Zárate-Lupercio A (2013) Structure and woody species diversity of the *Dasyllirion cedrosanum* (Nolinaceae) rosette scrub of central and southern Coahuila state, Mexico. *Botanical Sciences* 91(3): 335-347. <https://doi.org/10.17129/botsci.12>
- Fekedulegn D, Siurtaim MM, Colbert J (1999) Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silva Fennica* 33(4): 327-336. <https://doi.org/10.14214/sf.653>
- Gompertz B (1825) XXIV. 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. In a letter to Francis Baily, Esq. FRS & C. *Philosophical Transactions Royal Society* 115: 513-583. <https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>
- Holtum JAM, Winter K (2014) Limited photosynthetic plasticity in the leaf-succulent CAM plant *Agave angustifolia* grown at different temperatures. *Functional Plant Biology* 41(8): 843-849. <https://doi.org/10.1071/FP13284>
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R (2013) An introduction to statistical learning (Vol. 103). 1th Edition. Springer New York, USA. 426p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Jane SA, Fernandes FA, Silva EM, Muniz JA, Fernandes TJ, Pimentel GV (2020) Adjusting the growth curve of sugarcane varieties using nonlinear models. *Ciencia Rural* 50(3): e20190408. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190408>

- Juárez-Morales M, Martínez-Salvador M, Chávez-Mendoza C, Villarreal-Guerrero F, Pinedo-Álvarez A, Santellano-Estrada E, Corrales-Lerma R, Hernández-Quiroz NS, Vega-Mares JH (2023) Ecological attributes of the shrubby community of sotol (*Dasyllirion leiophyllum*) in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Forests* 14(12): 2343. <https://doi.org/10.3390/f14122343>
- Kaps M, Herring WO, Lamberson WR (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. <https://doi.org/10.2527/2000.7861436x>
- López-Serrano PM, Hernández-Ramos A, Méndez-González J, Martínez-Salvador M, Aguirre-Calderón O, Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ (2021) Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc., en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Zacatecas. Proyecto: 2017 - 4292674. CONAFOR-CONACYT. México. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/manual-mejores-practicas-de-manejo-y-ecuaciones-alometricas-de-biomasa-de-euphorbia-antisiphilitica-zucc>. Fecha de consulta 10 de marzo de 2025.
- Madrid-Solórzano JM, García-Alcaraz JL, Valles-Rosales DJ (2021) La producción de sotol: revisión de literatura sistemática. *Mundo Fesc* 11: 107-117. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.917>
- Muianga CA, Muniz JA, Nascimento MDS, Fernandes JT, Savian TV (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 JA, Nascimento MDS, Fernandes TJ (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>
- Palacios-Romero A, Rodríguez-Laguna R, Razo-Zárate R, Jiménez-Muñoz E (2019) Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de *Dasyllirion acrotrichum* (Schiede) Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(54). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i54.495>
- Panghal P, Kumar M, Rani S (2019) Estimation of annual compound growth rates of guava (*Psidium guajava* L.) fruit in Haryana using non linear model. *Journal of Applied and Natural Science* 11(4): 778-784. <https://doi.org/10.31018/jans.v11i4.2175>
- POWO (2024) Plants of the world online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. <https://powo.science.kew.org/>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2025.
- R Core Team (2023) R: a language and environment for statistical computing. (Version 3.4.4) [Software]. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2025.
- Ramírez-Gottfried RI, Puente-Valenzuela CO, Chávez-Simental JA, Espinosa-Palomeque B, García-Carrillo M, Guillén-Enríquez RR, González-Cervantes G (2021) Vermicompost extract as a basal medium in the *in vitro* multiplication and rooting stage of *Dasyllirion cedrosanum*. *Revista Terra Latinoamericana* 39: 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.997>
- Reyes-Valdés MH, Benavides-Mendoza A, Ramírez-Rodríguez H (2012) Biología e importancia del sotol (*Dasyllirion* spp). Parte I: Sistemática, genética y reproducción. *Planta* 7(14): 11-13.
- 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. En *Processing and Sustainability of Beverages*. Elsevier. pp. 103-137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815259-1.00004-5>
- Riikonen J, Luoranen J (2018) Seedling production and the field performance of seedlings. *Forests* 9(12) : 740. <https://doi.org/10.3390/f9120740>
- Rodriguez D (2023) Growthmodels: nonlinear growth models (Versión R package version 1.3.1) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=growthmodels>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2025.

- Serafin-Higuera EL, Antonio-Bautista A, Benavides-Mendoza A (2022) Morfología de *Dasyllirion cedrosanum* y su correlación con imágenes en localidades del Sureste de Coahuila. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3198>
- Solórzano-Thompson J, Paniagua-Molina J, 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. Revista Tecnología en Marcha 34(1): 115-126. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.5096>
- Vega-Cruz J, Melgoza-Castillo A, Sierra-Tristán JS (2006) Caracterización del crecimiento de dos especies de sotol (*Dasyllirion leiophyllum* Engelm. ex Trelease y *D. sereke* Bogler) fertilizadas con nitrógeno y fósforo. Revista Ciencia Forestal en México 31(99): 55-71.
- Von-Bertalanffy L (1957) Quantitative laws in metabolism and growth. The Quarterly Review of Biology 32(3): 217-231. <https://doi.org/10.1086/401873>
- Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. [Software]. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2025.