

Carbono almacenado en una plantación forestal comercial de candelilla (*Euphorbia antisyphillitica* Zucc.) con diferentes intensidades de aprovechamiento

Carbon stored in a commercial forest plantation of candelilla (*Euphorbia antisyphillitica* Zucc.) with different harvesting intensities

Antonio Cano Pineda^{1*}, Adrián Hernández Ramos¹, Julio C. Ríos Saucedo², Edith Villavicencio Gutiérrez¹, Fátima López López³, Xavier García Cuevas⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Saltillo.

²(INIFAP)-Campo Experimental Valle del Guadiana.

³Estudiante de doctorado del Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados,

⁴INIFAP-Campo Experimental Chetumal.

*Autor de correspondencia: cano.antonio@inifap.gob.mx

RESUMEN

El carbono almacenado en la biomasa de los tallos, hojas y raíces de las plantas de los matorrales y pastizales oscila entre 5.7 a 16.3 mega gramos por hectárea (Briones, 2023). el presente trabajo pretende contribuir al conocimiento sobre la captura de carbono en plantaciones forestales comerciales bajo manejo de candelilla (PFCc). Se colectaron datos bajo dos enfoques, el primero para estimar el almacenamiento total de carbono (C, Mg) de la plantación, donde se requirió de la medición inicial (establecimiento del experimento) del diámetro de la cobertura (Dc, cm) y la altura total (At, cm) de cada individuo de *E. antisyphillitica* dentro de cada parcela de muestreo establecida. Posterior, se estimó la biomasa individual (Bi, kg) con la ecuación generada por López *et al.* (2021) ($Bi = 0.0001410 * Dc^2 + 0.0029780 * At$); la biomasa total (Bt, kg) por parcela se obtuvo a partir de la sumatoria de todas las Bi contenidas; y finalmente los valores se extrapolaron a hectárea para estimar el almacén de C. La PFCc de *E. antisyphillitica* a 11 años de establecida presentó una biomasa total de 1.614 Mg ha⁻¹, con rangos entre 0.995 y 2.303 Mg ha⁻¹; con un almacén de Carbono total de 0.807 Mg C ha⁻¹, que oscila entre 1.152 y 0.498 Mg C ha⁻¹; una tasa de fijación anual máxima de 0.86 Mg C ha⁻¹ y promedio de CO₂ capturado de 2.962 Mg ha⁻¹ (Tabla 2). Tomando estos valores y la superficie de plantación de 200 ha se calculó un almacén de carbono de 161.439 Mg y de biomasa de 322.879 Mg. Las buenas prácticas de manejo en PFCc (intensidades de aprovechamiento) promueven una mayor supervivencia, así como mayor crecimiento en altura y diámetro (incremento en biomasa).

Palabras clave: Carbono, Zonas áridas, Candelilla.

ABSTRACT

Carbon stored in the biomass of stems, leaves, and roots of shrubland and grassland plants ranges from 5.7 to 16.3 megagrams per hectare (Briones, 2023). This study aims to contribute to the knowledge of carbon sequestration in commercial forest plantations under candelilla management (PFCc). Data were collected using two approaches. The first was to estimate the total carbon storage (C, Mg) of the plantation, which required the initial measurement (experiment establishment) of the canopy diameter (Dc, cm) and total height (At, cm) of each *E. antisyphillitica* individual within each established sampling plot. Subsequently, individual biomass (Bi, kg) was estimated using the equation generated by López *et al.* (2021) ($Bi=0.0001410*Dc^2+0.0029780*At$); the total biomass (Bt, kg) per plot was obtained from the sum of all the Bi values; and finally, the values were extrapolated to hectares to estimate the carbon stock. The PFCc of *E. antisyphillitica* after 11 years of establishment presented a total biomass of 1.614 Mg ha⁻¹, with ranges between 0.995 and 2.303 Mg ha⁻¹; with a total carbon stock of 0.807 Mg C ha⁻¹, ranging between 1.152 and 0.498 Mg C ha⁻¹; a maximum annual fixation rate of 0.86 Mg C ha⁻¹ and an average CO₂ capture of 2.962 Mg ha⁻¹ (Table 2). Taking these values and the planting area of 200 ha, a carbon stock of 161,439 Mg and a biomass of 322,879 Mg were calculated. Good management

practices in PFCc (harvesting intensities) promote greater survival, as well as greater growth in height and diameter (increase in biomass).

Key words: Carbon, Arid zones, Candelilla.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales en el semidesierto son prácticamente inexistentes pero su mayor implementación permitiría reducir la presión sobre las poblaciones naturales, ayudando a mitigar los efectos provocados por la remoción de los matorrales desérticos y contribuyendo a solucionar las necesidades de la demanda de productos forestales no maderables. Desde el punto de vista ambiental, las Plantaciones Forestales Comerciales de candelilla (PFCc) tienen la capacidad de absorber el carbono presente en la atmósfera e incorporarlo al ecosistema, almacenando así carbono que de otra manera seguiría libre, convirtiéndose de esta manera en una de las principales alternativas como sumideros de CO₂ atmosférico. El suelo es el principal almacén de carbono en los matorrales y pastizales desérticos, representando desde 45% hasta 90% del carbono del ecosistema (Briones, 2023). El carbono almacenado en la biomasa de los tallos, hojas y raíces de las plantas de los matorrales y pastizales oscila entre 5.7 a 16.3 mega gramos por hectárea (Briones, 2023). La candelilla es probablemente la especie forestal no maderable de mayor importancia comercial y económica en el semidesierto del noreste de México ya que tiene una gran diversidad de aplicaciones y es actualmente utilizada en más de 20 industrias distintas de todo el mundo, principalmente en los Estados Unidos, la Unión Europea y Japón (Hernández-Ramos *et al.*, 2019). La mayor densidad de candelilla se concentra en el estado de Coahuila y es por lo tanto el principal productor de cera, con cerca del 80 % de la producción nacional (Padilla, 1959).

Ante la necesidad de contar con materia prima abundante (cera de candelilla) que sostenga la cadena productiva, el aprovechamiento intensivo ha sido una opción desde hace varias décadas; sin embargo, esta práctica tiene un gran impacto en la conservación de sus poblaciones naturales, ya que su aprovechamiento implica la extracción total de la planta en grandes extensiones de terreno. En este

sentido las PFCc se presentan como una nueva opción productiva y de manejo sostenible de la especie, mostrando además un gran potencial de respuesta a condiciones adversas durante su establecimiento y desarrollo (Cano *et al.* 2019). A pesar de su gran importancia, existen grandes vacíos de información sobre la capacidad para secuestrar carbono por los matorrales y pastizales, por lo que el presente trabajo pretende contribuir al conocimiento sobre la captura de carbono en PFCc bajo manejo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio. La PFCc de *E. antispyhillitica* de 11 años está ubicada en el Ejido El Ojito, municipio de Ramos Arizpe, dentro de la región semiárida al sur del estado de Coahuila. El sitio se encuentra a una altitud de 1049 m, con un clima seco semicálido (BWhw), lluvias escasas todo el año, un porcentaje de precipitación invernal del 18 %, temperatura media anual entre 20° y 22° C y una precipitación media anual que oscila entre 150 y 500 mm (González, 2012).

Diseño experimental. En una PFCc de *E. antispyhillitica* (200 ha) se distribuyeron de forma aleatoria 15 parcelas de muestreo de 300 m², las cuales se dividieron en 6 subparcelas de 5 m x 10 m y se les aplicó de manera aleatoria un tratamiento de intensidad de cosecha (% de extracción de candelilla) y un testigo de referencia sin aprovechar (Figura 1; Tabla 1). Para evitar sesgo e independencia entre observaciones se realizó una aleatorización de los tratamientos dentro de cada subparcela.

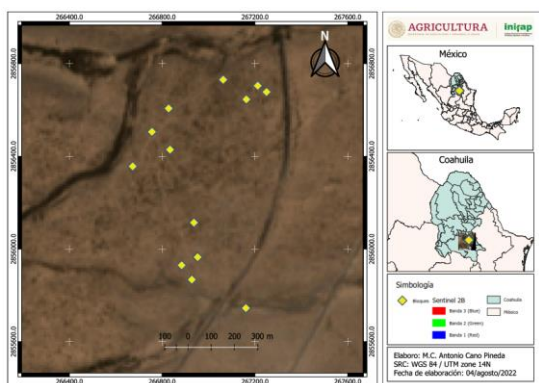


Figura 1. Ubicación geoespacial de las parcelas de muestreo de *Euphorbia antisiphilitica* dentro de la PFC, en el Ejido El Ojito, Ramos Arizpe, Coahuila.

Tabla 1. Intensidad de aprovechamiento y método de extracción de *Euphorbia antisiphilitica* (descripción de los tratamientos).

| CODIGO | ID | DESCRIPCIÓN |
|---------|----|--|
| T_100 | 1 | Extracción total de la planta con el método tradicional |
| T_75 | 2 | Extracción del 75 % de la planta con el método tradicional |
| T_50 | 3 | Extracción del 50 % de la planta con el método tradicional |
| T_25 | 4 | Extracción del 25 % de la planta con el método tradicional |
| R_100 | 5 | Extracción total de la planta con rozadera |
| Testigo | 6 | Sin extracción |

Toma de datos en campo y cálculo de biomasa.

Se colectaron datos bajo dos enfoques, el primero para estimar el almacenamiento total de carbono (C, Mg) de la plantación, donde se requirió de la medición inicial (establecimiento del experimento) del diámetro de la cobertura (D_c , cm) y la altura total (A_t , cm) de cada individuo de *E. antisiphilitica* dentro de cada parcela de muestreo establecida. Posterior, se estimó la biomasa individual (B_i , kg) con la ecuación generada por López *et al.* (2021) ($B_i = 0.0001410 * D_c^2 + 0.0029780 * A_t$); la biomasa total (B_t , kg) por parcela se obtuvo a partir de la sumatoria de todas las B_i contenidas; y finalmente los valores se extrapolaron a hectárea para estimar el almacén de C.

Y un segundo enfoque para determinar la captura de C después de un año de cosechada la plantación con diferentes intensidades de corte. Para ello, se realizó el conteo de todos los individuos de regeneración incorporados por planta, se midió un diámetro (D_p , cm) y una altura promedio (A_p , cm) de toda la regeneración. La estimación de la B_i (gr) de forma individual se hizo de manera indirecta con la

ecuación generada por Cano *et al.* (2020) ($P_v = (0.011184 * D_p^{1.471981} * A_p^{1.091052}) * 0.5$, posteriormente el B_i de la regeneración por planta se obtuvo con la sumatoria de todos los individuos incorporados; de igual manera, los valores se extrapolaron por hectárea.

Estimación del carbono capturado. El carbono se estimó al multiplicar la biomasa total de la parcela y unidad experimental por la fracción de carbono de 0.5 (IPCC, 2003). La tasa anual de fijación se determinó dividiendo el almacenamiento total entre la edad de plantación. Y el CO_2 capturado en la plantación forestal se obtuvo al multiplicar el total del carbono almacenado por el factor estequiométrico de 3.67 (IPCC, 2003).

Análisis estadístico. Se aplicó un ANAVA con un modelo lineal simple para evaluar el efecto de los tratamientos bajo $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6$ vs H_0 : al menos el efecto de un tratamiento es diferente (Fórmula 1). La estadística de prueba para H_0 se construyó con base en las medias de los tratamientos con un $\alpha = 0.05$.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau\beta_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

donde $i = 1, \dots, 6$ tratamientos y $j = 1, \dots, 15$ bloques, Y_{ij} : variable respuesta para el efecto de tratamiento i -ésimo y el bloque j -ésimo, μ : es la media general, τ_i : es el efecto del tratamiento i -ésimo, β_j : es el efecto del bloque j -ésimo, $\tau\beta_{ij}$ es la interacción bloque-tratamiento $\epsilon_{ij} \sim NIID(0, \sigma^2)$ variables aleatorias no observables. Posterior al ANAVA, se hizo una comparación de medias a partir de la prueba de aditividad de Tukey en 2 pasos, además se realizó un análisis gráfico mediante Box-plot. El análisis se realizó en el paquete estadístico R Studio versión Build 554 (R Core Team, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La PFCc de *E. antisiphilitica* a 11 años de establecida presentó una biomasa total de 1.614 Mg ha^{-1} , con rangos entre 0.995 y 2.303 Mg ha^{-1} ; con un almacén de Carbono total de 0.807 Mg C ha^{-1} , que oscila entre 1.152 y 0.498 Mg C ha^{-1} ; una tasa de fijación anual máxima de 0.86 Mg C ha^{-1} y promedio de CO_2 capturado de 2.962 Mg ha^{-1} (Tabla 2).

Tomando estos valores y la superficie de plantación de 200 ha se calculó un almacén de carbono de 161.439 Mg y de biomasa de 322.879 Mg.

Tabla 2. Valores por parcela de biomasa total, carbono y CO₂ capturado en una plantación forestal comercial de *Euphorbia antispyhillitica*.

| Parcela | No. Individuos (ha) | Biomasa (Mg ha ⁻¹) | Carbono (Mg C ha ⁻¹) | Carbono anual (Mg C ha ⁻¹) | CO ₂ (Mg ha ⁻¹) |
|---------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 1 | 4966 | 1.635 | 0.817 | 0.074 | 3.000 |
| 2 | 4733 | 1.441 | 0.720 | 0.065 | 2.644 |
| 3 | 4866 | 1.478 | 0.739 | 0.067 | 2.712 |
| 4 | 4833 | 1.114 | 0.557 | 0.051 | 2.044 |
| 5 | 5366 | 1.420 | 0.710 | 0.065 | 2.605 |
| 6 | 5033 | 1.531 | 0.765 | 0.070 | 2.809 |
| 7 | 5000 | 1.797 | 0.899 | 0.082 | 3.298 |
| 8 | 4833 | 1.797 | 0.898 | 0.082 | 3.297 |
| 9 | 5266 | 2.303 | 1.152 | 0.105 | 4.227 |
| 10 | 4566 | 1.961 | 0.981 | 0.089 | 3.599 |
| 11 | 4933 | 1.719 | 0.860 | 0.078 | 3.154 |
| 12 | 5033 | 1.560 | 0.780 | 0.071 | 2.863 |
| 13 | 4133 | 1.575 | 0.787 | 0.072 | 2.890 |
| 14 | 4966 | 1.890 | 0.945 | 0.086 | 3.469 |
| 15 | 2533 | 0.995 | 0.498 | 0.045 | 1.826 |

Aunque existen muy escasos datos comparativos Briones (2020), reporta de acuerdo con trabajos realizados en parcelas experimentales, que el carbono total promedio almacenado en la biomasa de los matorrales desérticos es 16.3 mega gramos por hectárea (Mg ha⁻¹; 1 Mg = 1,000,000 gramos) en 34 sitios estudiados, con valores mínimos de 2.5 Mg ha⁻¹ en un matorral desértico rosetófilo en Chihuahua y máximos de 56.0 Mg ha⁻¹ en un matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México.

Los resultados del ANAVA indican que el efecto de tratamientos es estadísticamente significativo ($2.2e-16 < \alpha = 0.05$) (Tabla 3), por lo que se confirma que se rechaza H_0 , esto significa que existen una diferente estimulación en la respuesta de la acumulación de carbono en la plantación de candelilla al primer año de crecimiento, atribuida al método de cosecha empleado para su aprovechamiento.

Tabla 3. ANAVA con el modelo lineal simple $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$.

| Fuente de variación | G.L. | SC | CM | F | p-valor |
|---------------------|------|--------|--------|---------|--------------|
| Tratamiento | 5 | 49.525 | 9.905 | 39.9083 | < 2.2e-16*** |
| Bloque | 14 | 10.377 | 0.7412 | 2.9864 | 0.001268** |
| Error | 70 | 17.374 | 0.2482 | | |

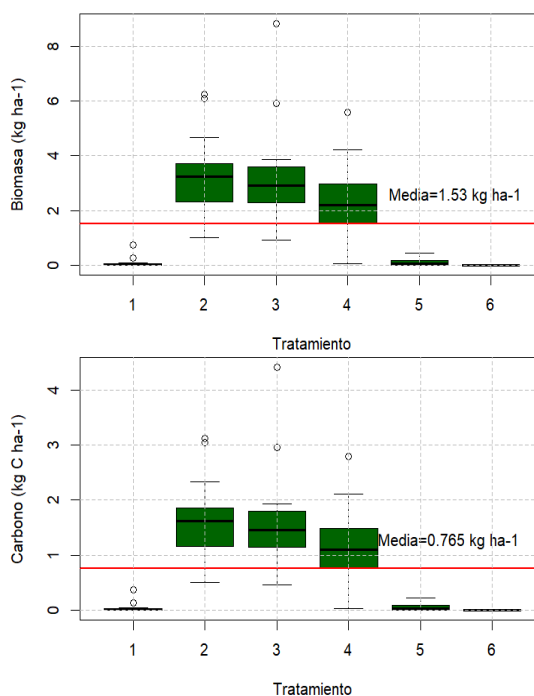


Figura 2. Box-plot de comparación de medias de biomasa y carbono por tratamiento. En tratamientos: 1=T_100, 2=T_75, 3=T_50, 4=T_25, 5=R_100 y 6=Testigo.

La prueba de Tukey indicó una diferencia mínima significativa entre medias de 0.533 kg C ha⁻¹ almacenado; además, los tratamientos 3, 2 y 4 son estadísticamente diferentes a 1, 5 y 6, como se observa en las gráficas box-Plot de comparación de medias (Figura 2; Tabla 4). Así mismo, los tratamientos con intensidades intermedias, con un porcentaje de biomasa residual para regeneración, presentan mayor captura de carbono y biomasa regenerada en su primer año de crecimiento (Figura 3).

Tabla 4. Diferencia de medias de los efectos de tratamientos en la captura de carbono en una plantación forestal comercial de *Euphorbia antispyhillitica*

| Tratamiento | Carbono (Mg C ha ⁻¹) | Grupo |
|-------------|----------------------------------|-------|
| 3 | 1.656 | a |
| 2 | 1.614 | a |
| 4 | 1.210 | a |
| 5 | 0.065 | b |
| 1 | 0.047 | b |
| 6 | 0.001 | b |

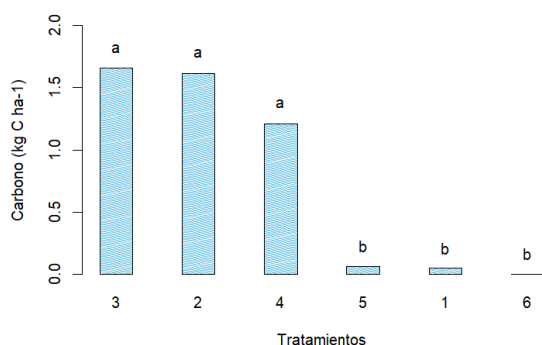


Figura 3. Diferencia de medias de los efectos de tratamientos en la captura de carbono en una plantación forestal comercial de *Euphorbia antisiphilitica*

El tratamiento 3 (Extracción del 50 % de la planta con el método tradicional), 2 (Extracción del 75 % de la planta con el método tradicional) y 4 (Extracción del 25 % de la planta con el método tradicional), son estadísticamente similares en la captura de carbono (Tabla 4). Esto indica que, a mayores intensidades de corta, se tiene mayor incremento de carbono en plantas de candelilla en plantaciones forestales comerciales. Consideración lo anterior Cano et al. (2022), proponen aprovechamientos con intensidades por planta de 50 a 75% para un manejo sustentable de la plantación. Briones 2020, deduce que el impacto de las zonas áridas en la mitigación del cambio climático radica en su gran extensión, por lo que la ampliación de superficie de plantación con esta especie es una opción para el secuestro de carbono.

CONCLUSIONES

Las buenas prácticas de manejo en PFCc (intensidades de aprovechamiento) promueven una mayor supervivencia, así como mayor crecimiento en altura y diámetro (incremento en biomasa). Bajo las condiciones y aptitud de terreno en que se encuentra la plantación es posible lograr una tasa de fijación anual máxima de 0.86 Mg C ha⁻¹ y promedio de CO₂ capturado de 2.962 Mg ha⁻¹. La producción de biomasa y contenido de carbono en la plantación, fue mayor en tratamientos que implican manejo forestal, sobresaliendo entre estas, las intensidades de aprovechamiento intermedias. Se recomienda aplicar manejo silvícola en plantaciones de candelilla para promover la supervivencia, crecimiento y capacidad de captura de carbono de las mismas.

LITERATURA CITADA

- Briones, O. Secuestro de carbono en los desiertos de México. 2023. INECOL.
<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1002-secuestro-de-carbono-en-los-desiertos-de-mexico> (consultado en agosto 2023)
- Briones V. Ó., L. 2020. El almacén de carbono en los desiertos de México. CIENCIA UANL / AÑO 23, No.99 enero-febrero 2020.
- Cano P. A, Hernández R. A., Hernández R. J., García C. X., Flores L. C. 2020. Estimación del peso verde de la regeneración natural en plantaciones forestales comerciales de candelilla en Coahuila. Memoria de XXXII Semana Internacional de Agronomía. UJED. Facultad de Agricultura y Zootecnia. Pp. 1206-1212.
- Cano P. A, Hernández R. A., Villavicencio G. E. E., García C. X. 2019. Definición de la aptitud de terreno para el establecimiento de plantaciones comerciales de candelilla en Coahuila. Memorias, X Reunión Nacional de investigación Forestal. pp 96-98.
- Hernández-R. A., A. Cano-Pineda, C. Flores-López, J. Hernández-Ramos, X. García Cuevas, M. Martínez-Salvador, L. Martínez-Ángel. 2019. Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. En seis municipios de Coahuila. Madera y Bosques vol.25, num. 2, e2521806.
- López-Serrano, P.M., Hernández-Ramos, A., Méndez-González, J., Martínez Salvador, M., Aguirre-Calderón, O., Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas J.J. 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: 2017-4-292674. CONAFOR-CONACYT. México. 74 p. <http://fcfposgrado.ujed.mx/sifoza/inicio/documentos.php>
- Padilla F., G. 1959. Determinación del contenido de cera en plantas de candelilla *Euphorbia* spp en las seis zonas productoras del norte de México. Tesis de licenciatura, ESAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 38p.

R Core Team (2022). R: A language and environment
for statistical computing. R Foundation for

Statistical Computing, Vienna, Austria. URL
<https://www.R-project.org/>.