

Utilización de datos espectrales del satélite SENTINEL-2 para el cálculo de biomasa y cobertura arbustiva de candelilla

Use of spectral data from satellite SENTINEL-2 for the calculation of biomass and bushy candelilla cover

Adrián Hernández-Ramos¹, Antonio Cano-Pineda¹, Julio César Ríos-Saucedo^{2*}, Enrique Buendía-Rodríguez³, Jonathan Hernández-Ramos⁴.

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

² INIFAP- Campo experimental Valle del Guadiana

³ INIFAP-Campo Experimental Valle de México.

⁴ INIFAP-Campo Experimental Chetumal.

*Autor para correspondencia: j_riossaucedo@hotmail.com

RESUMEN

La candelilla es un recurso de gran importancia para la economía de regiones desérticas de México, ya que es un recurso maderable el cual puede ser aprovechado en la industria cosmética, industrial y alimentaria, la cera que esta produce ha sido de gran importancia para la exportación de la misma, siendo México el único país exportador de la misma, la sobreexplotación de este recurso ha traído consecuencias negativas, poniendo en peligro la presencia de la misma especie. Para mitigar este efecto negativo es de gran importancia realizar la estimación de la biomasa en el inventario actual, para ello se implementan recursos como la evaluación sistemática mediante ecuaciones alométricas para estimar biomasa y volúmenes de la especie, mediante datos de inventario, así como datos de espectro tomados del satélite SENTINEL-2. Se utilizaron valores del espectro que van desde el azul (490 nm) hasta infrarrojo (842 nm). Se utilizó la correlación de Pearson para crear modelos que sean óptimos para este análisis, siendo el stepwise el que mayormente se adapta. La distribución espacial entre variables presenta una gran similitud entre sí, siendo el color verde la presencia de la especie, así como la biomasa, y el rojo los sitios donde hay ausencia.

Palabras clave: Alometría, Correlación, Modelo.

ABSTRACT

The candelilla is a resource of great importance for the economy of desert regions of Mexico, since it is a timber resource which can be used in the cosmetic, industrial and food industries, the wax it produces has been of great importance for export of the same, being Mexico the only exporting country of the same, the overexploitation of this resource has brought negative consequences, endangering the presence of the same species.

To mitigate this negative effect, it is of great importance to estimate the biomass in the current inventory, for which resources are implemented, such as systematic evaluation through allometric equations to estimate biomass and volumes of the species, through inventory data, as well as data from spectrum taken from the SENTINEL-2 satellite. Spectrum values ranging from blue (490 nm) to infrared (842 nm) were used. Pearson's correlation was used to create models that are optimal for this analysis, with the stepwise being the one that best fits. The spatial distribution between variables presents a great similarity between them, being the green color the presence of the species, as well as the biomass, and the red the places where there is absence.

Keywords: Allometry, Correlation, Model.



INTRODUCCIÓN

Euphorbia antisyphilitica Zucc., mejor conocida como hierba de candelilla, es uno de los 10 productos forestales no maderables de mayor importancia económica en las regiones desérticas y semidesérticas de México (Rojas *et al.*, 2020). Los estados de la república que hacen la recolección de candelilla son: Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Chihuahua, Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila (Villa-Castorena *et al.*, 2010; Becerra-López *et al.*, 2020). Siendo Coahuila el estado más importante, aportando aproximadamente el 80% de la producción nacional (Villa-Castorena *et al.* 2010).

La planta crece en racimos, con tallos delgados cubiertos de cera que los protegen como capas gruesas, dando tolerancia contra estrés biótico y abiótico del entorno en que vive (Rojas-Molina *et al.*, 2013; De León-Zapata *et al.*, 2018). Se desarrolla en condiciones restrictivas del suelo como pH de ligeramente ácido a alcalino (6.3 a 8.4), presencia de material geológico como rocas, preferentemente de carbonato de calcio, en suelos con profundidad menor a 30 cm, textura franco-arenosa, con buen drenaje, estructura granular, presencia de piedras y bajo contenido de materia orgánica de 0.96 a 2.64% (Zamora-Martínez *et al.*, 2013). La cera es el principal subproducto derivado de la planta y es valorada debido a que es un material multipropósito que se utiliza en diversas industrias para la formulación de productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos. Asimismo, se ha encontrado que la candelilla es una buena fuente de otros fitoquímicos útiles como fibra, cera y compuestos polifenólicos (Rojas *et al.*, 2020). El estudio de especies vegetales ha avanzado en los últimos años y es a través de datos biométricos que se pueden predecir ciertos valores como lo es la estimación de la biomasa (peso verde). Internacionalmente se ha hablado de la generación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa o volúmenes, que es un tema ampliamente estudiado para las especies arbóreas de bosques templados y tropicales (Vargas-Larreta *et al.*, 2017; Martínez-Domínguez *et al.*, 2020; Martínez-Sánchez *et al.*, 2020).

Para gestionar y mitigar los impactos del cambio global, es importante contar con herramientas de monitoreo que permitan una evaluación sistemática, con periodicidad, rápida y eficiente del estado actual y las tendencias en diversas escalas en las que se encuentra el área. Los inventarios forestales (NFI)

son herramientas importantes las cuales son usadas para monitorear la estructura y la dinámica del bosque a grandes escalas espaciales. Estos inventarios son utilizados mundialmente en los últimos años para evaluar la diversidad biológica de un área así como la distribución sistemática de especies de interés, así como ofrecer servicios al ecosistema del bosque (Lázaro Lobo *et al.*, 2022).

Dada la importancia que ha tomado la candelilla en los últimos años, es de gran importancia poner interés en el manejo sustentable de sus poblaciones, por ello se debe considerar una planificación de producción y conservación las cuales converjan y se llegue a un acuerdo entre las condiciones ambientales y socioeconómicas del área, siendo los inventarios forestales una herramienta indicada para dicha conseguir dicho objetivo (Villavicencio-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Actualmente en México se han realizado estimaciones de biomasa verde mediante la aplicación de datos de inventarios forestales a través del tiempo, donde a su vez se ha implementado la combinación de imágenes satelitales utilizando el espectro electromagnético como parámetro indicativo, por lo tanto la combinación de estas tecnologías, permite realizar un análisis con datos confiables De la cantidad de biomasa verde en un área analizada (Ortiz-Reyes *et al.*, 2019).

El objetivo del presente proyecto fue realizar modelos óptimos de correlación, utilizando datos del inventario forestal, así como datos del satélite SENTINEL-2 para la cuantificación de biomasa y la cantidad foliar de candelilla.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El estudio fue desarrollado en una superficie de 183 Ha que se encuentran dentro del Campo Experimental La Saucedita del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, México; en las coordenadas extremas de 25°51'21.98" y 25°51'5.30" de latitud norte y 101°23'10.40" y 101°24'33.99" de longitud oeste. La vegetación corresponde a un matorral desértico rosetófilo (INEGI, 2016), un clima es de tipo BWhw(x') (muy seco semicálido) con una



precipitación media anual de 200 mm; los tipos de suelos predominantes en el área son de tipo litosol en la parte alta y Xerosol para la parte baja del área de estudio.

Variabes forestales

Dentro del área de estudio se establecieron 30 sitios cuadrados de 400 m², con un arreglo sistemático a una distancia de 150 m entre sitios y líneas. En cada sitio, de todos los individuos de *E. antisiphilitica*, se midieron las variables diámetro de la base (DBP), diámetro de la cobertura (DCP), altura total (AT) y altura promedio (AP). A nivel individual, se realizó el cálculo de las variables cobertura arbustiva (COB, m²) y peso verde (PV, Mg), posterior a ello, se sumaron para obtener valores por sitio y extrapolar a nivel de hectárea. La COB se estimó con la expresión $0.7854 \cdot DCP^2$ y para el peso verde se empleó la fórmula $PV = 0.003614 \cdot (DBP \cdot 48315) \cdot (DCP \cdot 1.268386)$ reportada para la especie por Hernández-Ramos et al. (2019).

Datos espectrales e índices de vegetación

Se obtuvo una imagen Sentinel-2 de la página <https://scihub.copernicus.eu/> (servidor de la Agencia Espacial Europea [ESA]), con un Nivel-1C de procesamiento, una resolución espacial de 10 m, espectral de 13 bandas y con fecha de captura del 11 de junio del 2020 (fecha de toma de datos en campo). La imagen fue corregida atmosféricamente mediante el procedimiento Sen2Cor del software SNAP® 6.0 (Sentinel Application Platform, por sus siglas en inglés) de la ESA (Casella et al., 2018). Posterior a la corrección, la imagen fue exportada del formato SENTINEL BEAM-DIMAP a formato tiff para el análisis con las variables alométricas y posteriormente se realizó una georreferencia al sistema UTM zona 14N Datum WGS84. Las bandas utilizadas para el análisis son: azul (490 nm), verde (560 nm), roja (665) e infrarrojo cercano (842 nm), además de los Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), NDVI Transformado (TVI), de diferencia normalizada (DVI) y de suelo ajustado (SAVI) (Rouse et al., 1973). Los valores espectrales y de los índices de vegetación fueron extraídos de cada capa empleando el archivo shape de los sitios de muestreo, al tomar el valor central de cada sitio. Todos los procedimientos fueron realizados en el programa QGIS® 3.8.

Análisis estadístico

Para determinar el grado de asociación entre los valores espectrales e índices de vegetación (variables independientes) y las variables alométricas de *E. antisiphilitica* (variable dependiente), se aplicó una correlación de Pearson. Las variables que presentaron correlación mayor se utilizaron para construir modelos lineales para estimar el PV y la COB. Se construyeron dos modelos para cada variable, el primero resultado del procedimiento Stepwise (selección a pasos) y el segundo utilizando las variables mayormente correlacionadas. El ajuste estadístico se realizó mediante el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) en el programa SAS® 9.3. Los mejores modelos fueron los que presentaron el mayor valor del coeficiente de determinación ajustado (R^2 Ajustado), menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y todos los parámetros significativos ($\alpha \leq 0.05$).

Mapeo de variables alométricas

Los mejores modelos lineales seleccionados para estimar el PV y la COB, se usaron para mapear y obtener la distribución espacial de las variables forestales en cada pixel del área de estudio, para ello, se programaron los modelos de regresión en la calculadora ráster del programa QGIS® 3.8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1. Se muestra que, el valor promedio calculado de PV Y COB para candelilla fueron de 7.32 mg Ha⁻¹ y de 4.24 %, respectivamente. Las variables alométricas presentaron una correlación negativa con las bandas espectrales de SENTINEL-2 y correlación positiva en los índices de vegetación. La variable con mayor correlación con la banda infrarrojo en ambos casos, fueron consideradas en la construcción de modelos de regresión múltiple.

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre las variables alométricas, bandas de espectro e índices de vegetación.

Variable	Azul	Verde	Roja	Infrarrojo
Peso verde (mg ha ⁻¹)	-0.434	-0.465	-0.435	-0.576
Cobertura (%)	-0.466	-0.499	-0.469	-0.590
Variable	DVI	NDVI	SAVI	TVI
Peso verde (mg ha ⁻¹)	-0.255	0.163	0.163	0.168
Cobertura (%)	-0.203	0.220	0.220	0.224



Modelos de regresión

Se consideró la banda del infrarrojo para el modelo de regresión múltiple debido a su alta correlación con las variables del área, sin embargo, después de realizar el análisis y compararlo con el método stepwise, se mostraron valores menores. Ya que el modelo stepwise, Presentó un modelo lineal que se ajusta mucho mejor incluyendo los índices de vegetación DVI Y SAVI (tabla 2.).

Tabla 2. Estadísticos de ajuste de los modelos lineales generados por método para estimar el peso verde y la cobertura de *E. antisiphilitica*.

Método	Variable forestal	Modelo	R2 ajustada	RCME
Variable espectral	PV	$24.01137 + \text{Infrarroja}^* (-0.00701)$	0.3074	3.27
más correlación	COB	$1414.92596 + \text{Infrarroja}^* (-0.41569)$	0.325	186.93
Stepwise	PV	$15.4767 + \text{DVI}^* (-0.02738) + \text{SAVI}^* (61.17472)$	0.353	3.16
	COB	$831.37952 + \text{DVI}^* (-1.55385) + \text{SAVI}^* (37.0464495)$	0.362	181.75

Dónde: PV: peso verde (Mg ha⁻¹); COB: cobertura arbustiva (m² ha⁻¹); R2 ajustada: coeficiente de correlación ajustada; RCME: raíz del cuadrado medio del error.

Los modelos que fueron generados por el método stepwise fueron empleados para generar modelos de distribución espacial de la biomasa verde (mg Ha⁻¹), así como la presencia de individuos (m² Ha⁻¹) para candelilla en el área de estudio, los cuales corresponden a las figuras 1 y 2, respectivamente, la distribución espacial de las variables forestales entre PV y COB fueron muy similares, ya que concuerdan con los valores altos y bajos de la distribución espacial, donde se puede observar que las partes con color naranja a rojo, indican un área con una baja densidad de biomasa verde y baja presencia de individuos de candelilla, para el caso de las áreas de color verde significa valores altos en la biomasa verde y cantidad de individuos.

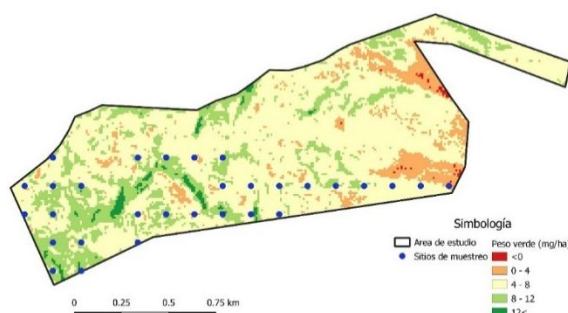


Figura 1. Distribución espacial de peso verde (Mg ha⁻¹) mediante regresión lineal múltiple de *E. antisiphilitica* en el INIFAP-Campo Experimental La Saucedá, Ramos Arizpe Coahuila, México.

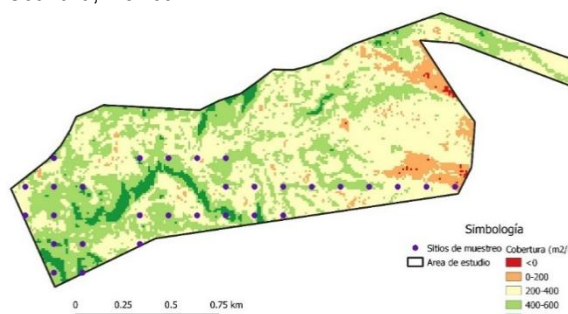


Figura 2. Distribución espacial de cobertura (m² ha⁻¹) mediante regresión lineal múltiple de *E. antisiphilitica* en el INIFAP Campo Experimental La Saucedá, Ramos Arizpe Coahuila, México.

Para el caso de PV Y COB los valores obtenidos fueron bajos, debido a que se observaron bajas densidades de la especie con respecto a otras especies arbustivas como *Agave lechuguilla* Torr. y *Lippia graveolens* Kunth. En el caso de las variables alométricas, la correlación negativa y positiva son consideradas bajas (0.59), aunque no existe un parámetro estricto, en tamaños de muestra grandes, se considera que si existe cierta correlación (Roy-García et al., 2019). La correlación negativa entre variables puede deberse a la disminución de la vegetación y la reflectancia del albedo en las bandas espectrales con vegetación Torres-Rojas et al. (2016), Torres-Vivar et al. (2017) y Pérez et al. (2018). caso contrario, las áreas con baja correlación entre variables, puede deberse a la baja densidad de la especie en zonas áridas y semiáridas, esta es influenciada en gran medida con los factores abióticos del área y del suelo (Muñoz, 2013).

El método stepwise mostró una gran correlación entre variables y este tiene la ventaja de que se pueden incluir variables independientes

potencialmente candidatas, y con la posibilidad de eliminar variables ya introducidas a la ecuación, cuando ya no existan nuevas variables el método termina, lo cual permite insertar diversos espectros que van desde el infrarrojo al ultravioleta, teniendo un rango más amplio de color, que para este caso, se mostró una gran correlación entre dichas variables (Chatterjee et al., 2021).

Comparando los mapas de la figura 1 y 2 se puede observar que el área de colores es mayor sin distinguir entre los colores, esto puede deberse a la naturaleza de los datos, donde en la figura 2 se tiene valores de área y en la figura 1, valores de mg, lo cual crea un sesgo en la continuidad de los datos a comparar (Varela et al., 2014)

CONCLUSIONES

En lo resultados se puede observar que el modelado de una distribución espacial de biomasa verde y presencia de individuos de candelilla utilizando datos de un inventario forestal, y variables espectrales obtenidas mediante el satélite SENTINEL-2 puede ser una herramienta que presenta datos muy apegados a las condiciones reales.

El modelo de regresión depende en gran medida de las condiciones de las variables y el ajuste que estas tienen entre sí que, para este caso, el mejor fue el stepwise, el cual tiene la ventaja de añadir variables independientes que pueden quitarse cuando estas no sean significativas, este modelo tuvo mejor ajuste entre los índices de diferencia normalizada (DVI) y suelo ajustado (SAVI)

LITERATURA CITADA

- Casella, A., N. Barrionuevo, A. Pezzola y C. Winschel. 2018. Pre-Procesamiento de imágenes satelitales del sensor SENTINEL 2^a y 2B con el software SNAP 6.0. Ministerio de Agroindustria, Buenos Aires, Argentina. 31 p.
- Chatterjee, S., Hartemink, A. E., Triantafyllis, J., Desai, A. R., Soldat, D., Zhu, J., Townsend, P. A., Zhang, Y., & Huang, J. (2021). Characterization of field-scale soil variation using a stepwise multi-sensor fusion approach and a cost-benefit analysis. CATENA, 201, 105190. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105190>
- Rojas, R., Tafolla-Arellano, J. C., & Martínez-Ávila, G. C. (2020). Euphorbia antisiphilitica Zucc: a source of phytochemicals with potential applications in industry. Plants, 10(1), 8.
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., ... & Domínguez-Martínez, P. A. (2020). Climatic change and habitat availability for three sotol species in Mexico: a vision towards their sustainable use. Sustainability, 12(8), 3455.
- De León-Zapata, M. A., Ventura-Sobrevilla, J. M., Salinas-Jasso, T. A., Flores-Gallegos, A. C., Rodríguez-Herrera, R., Pastrana-Castro, L., ... & Aguilar, C. N. (2018). Changes of the shelf life of candelilla wax/tarbrush bioactive based-nanocoated apples at industrial level conditions. Scientia Horticulturae, 231, 43-48.
- Lázaro Lobo, A., Ruiz Benito, P., & Castro Díez, P. (2022). Los inventarios forestales nacionales como herramienta para evaluar el estado y la tendencia de las especies exóticas. Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente, ISSN-e 1697-2473, Vol. 31, No. 1, 2022 (Ejemplar Dedicado a: Ecología Urbana: Una Disciplina En Auge), 31(1), 15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8418573&info=resumen&idioma=ENG>
- Martínez, Z., Espinoza, M., Miranda, P., & Barrera, C. (2013). Euphorbia antisiphilitica Zucc.: Recurso forestal no maderable de alto valor económico. Folleto Técnico 12.
- Martínez-Domínguez, A., Ruiz-Aquino, F., Santiago-García, W., Antúnez, P., López-López, M. Á., Valenzuela-Encinas, C., & Feria-Reyes, R. (2020). Allometric equations to estimate aboveground and belowground biomass of Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham. Forest Science and Technology, 16(3), 161-170.
- Martínez-Sánchez, J. L., Martínez-Garza, C., Cámara, L., & Castillo, O. (2020). Species-specific or generic allometric equations: which option is better when estimating the biomass of Mexican tropical humid



- forests. Carbon Management, 11(3), 241-249.
- Muñoz A., P. 2013. Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile. 15 p.
- Ortiz-Reyes, A. D., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., De Los Santos-Posadas, H. M., Schneider, L., Aguirre-Salado, C. A., & Peduzzi, A. (2019). LiDAR data transects: A sampling strategy to estimate aboveground biomass in forest areas. Madera y Bosques, 25(3), 1–18. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531872>
- Pérez M., R., M. E. Romero. S., A. González H., L. Martínez A. y V. J. Arriola P. 2018. Estimación de atributos forestales mediante teledetección en bosques mixtos de Durango, México. Áreas Naturales Protegidas Scripta, 4(2): 49-70.
- Rojas-Molina, R., De León-Zapata, M. A., Saucedo-Pompa, S., Aguilar-Gonzalez, M. A., & Aguilar, C. N. (2013). Chemical and structural characterization of Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.). Journal of medicinal plants research, 7(12), 702-705.
- Rouse, J. W., R. H. Hass, D. W. Deering and J. A. Schell. 1973. Monitoring the vernal advancement and retro gradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/OSFC. Type III. Final report. Oreenbello MD. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022555.pdf>
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., Palacios-Cruz, L., Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. Revista Alergia México, 66(3), 354–360. <https://doi.org/10.29262/RAM.V66I3.651>
- Torres-Rojas, G., M. E. Romero-Sánchez, E. Velasco-Bautista y A. González-Hernández. 2016. Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(36): 7- 24.
- Torres-Vivar, J. E. J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. Santos-Posadas y C. A.
- Aguirre-Salado. 2017. Inventario y mapeo de un bosque bajo manejo de pino con datos del sensor SPOT 6. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 8(39): 25-43.
- Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R., & Fernández-González, F. (2014). Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. Ecosistemas, 23(1), 46–53. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-1-07>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. Forests, 8(8), 269.
- Villa-Castorena, M., Catalán-Valencia, E. A., Inzunza-Ibarra, M. A., González-López, M. D. L., & Arreola-Ávila, J. G. (2010). Producción de plántulas de Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) mediante estacas. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 16(1), 37-47.
- Villavicencio-Gutiérrez, E. E., Cano-Pineda, A., Castillo-Quiroz, D., Hernández-Ramos, A., & Martínez-Burciaga, O. U. (2021). Manejo forestal sustentable de los recursos no maderables en el semidesierto del norte de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, Especial-1. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iespecial-1.1083>.

