

Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México

Estimation and analysis of the carbon content in halophilic grasslands from the semi-arid central part of Mexico

Martín Enrique Romero-Sánchez^{1‡}, Efraín Velasco-Bautista¹,
David Josué Meza-Juárez² y Ramiro Pérez-Miranda¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Progreso 5, Barrio de Santa Catarina, Coyoacán. 04010 Ciudad de México, México.

² Consultor ambiental independiente. Los Perales M-D, L-9, Sector Popular. 56269 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (romero.martin@inifap.gob.mx).

RESUMEN

Las estimaciones del almacenamiento y liberación de carbono dependen principalmente del tipo de vegetación, del cambio en el uso del suelo, edad de la vegetación y tipo de ecosistema (cerrado o abierto). El carbono captado y almacenado tiene un valor ambiental positivo, mientras que su liberación a la atmósfera por el cambio de uso de suelo acarrea daños ambientales al propiciar el calentamiento atmosférico global. Los pastizales naturales en México ocupan alrededor del 10% del territorio nacional, de los cuales el halófilo ha sido escasamente estudiado en cuanto a su contribución con el ciclo del carbono. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue estimar el contenido de biomasa aérea y subterránea; así como el carbono contenido en este tipo de vegetación. Se definió un área efectiva a muestrear de 70 ha en pastizales halófilos del estado de Puebla y se propuso el método de cuadrante bajo un diseño de muestreo con parcelas fijas anidadas. El carbono contenido se determinó al tomar muestras en campo y se llevaron al laboratorio para ser secadas a temperatura constante. El contenido de carbono total calculado para pastizales halófilos fue de 1.33 Mg ha⁻¹, oscilando de 0.55 a 2.6 Mg ha⁻¹. En cuanto a biomasa, la parte aérea se estimó en 0.49 Mg ha⁻¹, mientras que la parte subterránea fue de 2.34 Mg ha⁻¹. La biomasa subterránea medida en campo tuvo una alta correlación con el carbono total ($r = 0.87$), por lo que podría

considerarse como una opción viable para la estimación de carbono a partir del modelo de regresión propuesto.

Palabras clave: biomasa total, conglomerados, Kriging empírico-bayesiano, muestreo.

SUMMARY

Estimates of carbon storage and release depend mainly on vegetation type, land-use change, vegetation age and ecosystem type (closed or open). The carbon sequestered and stored has a positive environmental value, while its release to the atmosphere due to land-use change causes environmental damage by contributing to global atmospheric warming. Natural grasslands in Mexico occupy around 10% of the National territory, from which halophytes have been scarcely studied in terms of their contribution to the carbon cycle. Therefore, the objective of our study was to estimate the aboveground and belowground biomass and carbon content of vegetation type. We defined an effective sampling area of 70 ha in halophilic grasslands of the state of Puebla, and the quadrant method was proposed under a sampling design with nested fixed plots. To determine the carbon content, samples were collected in the field and transported to the laboratory to be dried at a constant temperature. The total carbon content calculated for halophilic grassland was 1.33 Mg ha⁻¹, ranging from 0.55 to 2.6 Mg ha⁻¹. The aboveground

Cita recomendada:

Romero-Sánchez, M. E., Velasco-Bautista, E., Josué Meza-Juárez, D. y Pérez-Miranda, R. (2022). Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-14. e1007. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1007>

Recibido: 15 de julio de 2021. Aceptado: 27 de noviembre de 2021.
Artículo. Volumen 40, enero de 2022.

part was estimated at 0.49 Mg ha⁻¹ in terms of biomass, while the belowground part was 2.34 Mg ha⁻¹. The belowground biomass measured in the field showed a high correlation with total carbon ($r = 0.87$), hence, it could be considered as a viable option for carbon estimation using the proposed regression model.

Index words: *clustering, empirical-bayesian Kriging, sampling, total biomass.*

INTRODUCCIÓN

La biomasa de la vegetación es una medida que permite determinar la aptitud que tienen los ecosistemas para acumular materia orgánica aérea y por debajo del suelo en un periodo de tiempo (Houghton, 2005; Houghton, Hall y Goetz, 2009). La biomasa también puede ser entendida como la materia orgánica (MO) obtenida de la producción primaria a través de la fotosíntesis menos el consumo de la respiración, y que, básicamente, incluye el peso por encima y por debajo del suelo de un ecosistema. Su estimación en plantas se compone de la masa del tallo, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta y se expresa en términos de toneladas por hectárea de peso verde o de peso seco (peso orgánico) (Chave *et al.*, 2005).

En el contexto del cambio climático, la biomasa de la vegetación cobra especial relevancia dentro del ciclo biogeoquímico del carbono, ya que los ecosistemas terrestres funcionan como sumideros o almacenes de carbono a través de procesos naturales tales como la fotosíntesis (Pachauri *et al.*, 2014). La captación de carbono y su almacenamiento tienen un valor que excede el ámbito nacional, cuestión puesta en alto relieve por la Convención Marco del Cambio Climático de la Naciones Unidas. Las estimaciones del almacenamiento y de la liberación de carbono dependen principalmente del tipo de vegetación, del cambio en el uso del suelo, de la edad de la vegetación y del tipo de ecosistema (cerrado o abierto). El carbono captado y almacenado tiene un valor ambiental positivo, mientras que su liberación a la atmósfera por el cambio de uso de suelo acarrea daños ambientales al propiciar el calentamiento atmosférico global (Jiang, Zhao, Lewis, Wei y Dai, 2017).

En este sentido, es importante conocer el contenido de carbono de los diferentes tipos de vegetación para poder estimar el impacto producido por alteraciones o remociones de comunidades vegetales específicas

(Acosta-Mireles, Vargas, Velázquez y Etchevers, 2002). La medición de la cantidad de carbono en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas, por lo que se debe contar con funciones que estimen la biomasa total, y consecuentemente el carbono, con base en el tamaño y dimensiones del ente biológico; es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Chave *et al.*, 2014; Martínez-Luna, Carrillo, Acosta, Romero y Pérez, 2020).

La gran mayoría de estudios disponibles a nivel mundial relacionados con estimaciones de biomasa/carbono se enfocan a ecosistemas forestales en diversas latitudes debido a la importancia dentro del contexto de negociaciones internacionales para la mitigación del cambio climático (Cairns, Olmsted, Granados y Argaez, 2003; Zheng *et al.*, 2004; Zolkos, Goetz y Dubayah, 2013; Urbazaev *et al.*, 2018) donde México no es la excepción (Martínez Barrón *et al.*, 2016; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019). Sin embargo, existen otro tipo de vegetaciones con potencial para el almacenamiento de carbono que han sido poco estudiados; por ejemplo, los pastizales cubren alrededor del 20% de la superficie terrestre (Ma *et al.*, 2017) y de acuerdo con algunos autores, se ha señalado que tienen el mismo potencial de acumulación de carbono que los bosques, porque a diferencia de los árboles, los sistemas radiculares de los pastos son más dinámicos (Montaño *et al.*, 2016).

Los pastizales naturales de México cubren alrededor del 10% del territorio nacional y se caracterizan por un clima extremo, escasa precipitación y baja productividad (Molina, Pando, Marmolejo y Alanís, 2013). De los pastizales que se distribuyen en el territorio nacional, existen aquellos conocidos como de distribución restringida como el pastizal de altura (o zacatonal alpino), pastizales sobre yeso (gipsófilos) y pastizales salinos (halófilos) (Rzedowski, 2006) particularmente estos últimos han sido poco estudiados en el tema de la capacidad para almacenar carbono. Por lo que la contribución real al tema de mitigación del cambio climático en este tipo de vegetación pudiese estar sesgada. Al mejor conocimiento de los autores y de acuerdo con la revisión de literatura especializada, en México existen contados estudios sobre estimaciones de biomasa en pastizales halófilos (Long *et al.*, 1989; Jurado-Guerra, Saucedo, Morales y Martínez, 2013; Briones, Búrquez, Martínez, Pavón y Perroni, 2018).

Por lo que el objetivo principal de este estudio fue estimar el contenido de biomasa aérea y subterránea; así como el carbono contenido tanto en la parte aérea como subterránea para este tipo de vegetación y de esta manera contribuir al conocimiento de los servicios ambientales, en términos de carbono almacenado, de este tipo de ecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción y Ubicación del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en terrenos de uso común del ejido Itzoteno en la porción centro sur del municipio de Tepeyahualco en el estado de Puebla, México; entre las coordenadas 19° 27' 33.17" N, 97° 28' 23.85" O y 19° 24' 54.51" N, 97° 26' 37.22" O. La superficie en cuestión tiene una extensión de 746 ha y la vegetación halófila es predominante en toda el área de estudio (Figura 1). Este tipo de vegetación habita en suelos salinos, alcalinos y mal drenados de los fondos de antiguos lagos, y por lo regular a no más de 2250 m de altitud. Adquiere la forma de un pastizal bajo y denso donde sobresalen las gramíneas que se reproducen vegetativamente por rizomas y estolones (Rzedowski, 2006). Las especies que se catalogaron como dominantes son *Distichlis spicata*, *Bouteloua scorpioides*, *Suaeda edulis* como representativas del pastizal halófilo.

Diseño y Tamaño de Muestreo

El diseño de muestreo propuesto toma como base principalmente el “método de la parcela (cuadrante)”, el cual es el más acorde por su practicidad, adaptabilidad, costo-efectivo y es descrito en manuales y libros de reportes especiales de Panel Intergubernamental en Cambio Climático sobre Uso y Cambio de Uso de Suelo y Forestería (Penman *et al.*, 2003; Stocker *et al.*, 2013; Mchenry, Kulshreshtha y Lac, 2015); Guías para el monitoreo del Carbono de Winrock (Macdicken, 1997); FAO (Brown, 1997); Agencia de protección al ambiente de los Estados Unidos (US EPA) (Vine, Sathaye y Makundi, 1999); y métodos desarrollados por el Centro para la investigación forestal (CIFOR, por sus siglas en inglés) (Hairiah, Sitompul, van Noordwijk y Palm, 2001).

Se definió un área efectiva a muestrear de 70 ha, que condujo a un tamaño de muestra de 70 unidades de muestreo primarias, asumiendo un coeficiente de variación conservador del 45% de acuerdo con recorridos previos en el área de estudio y un error de muestreo no mayor a 10% en apego a la legislación mexicana en materia ambiental (SEMARNAT, 2007). Con ayuda del software de información geográfica ArcGIS® versión 10.7, se generó una malla con inicio aleatorio sobre el predio de manera sistemática para el establecimiento de los sitios de muestreo (Figura 2).



Figura 1. Localización del área de estudio, ejido Itzoteno, estado de Puebla, México.

Figure 1. Location of the study area, ejido Itzoteno, state of Puebla, Mexico.

optimizar la logística en áreas extensas, lo cual lo hace más eficiente en este tipo de estudios (Velasco-Bautista, de los Santos, Ramírez y Rendón, 2016; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019). Con respecto a la forma del conglomerado, se ha demostrado que los cuadrantes son los mejores diseños para muestreo de vegetación herbácea, ya que esta forma geométrica tiende a minimizar la varianza del conteo entre parcelas comparado con otras formas de parcela alternativas (Gregoire y Valentine, 2007). Además, el diseño utilizado minimiza el costo y tiempo de muestreo sin comprometer los objetivos del plan de monitoreo. De cada sitio se generó la coordenada correspondiente y se elaboró un formato para la captura de datos de campo para cada unidad primaria y unidad secundaria. Las variables registradas en campo fueron las siguientes: especie dominante, especie codominante, cobertura de vegetación, cobertura suelo, altura promedio, peso fresco de biomasa aérea, peso fresco de biomasa subterránea, fecha de colecta e identificador de fotografías asociadas.

Estimaciones de Biomasa: Colecta de Muestras

Para estimar la cantidad de biomasa total (aérea +subterránea), en cada unidad de muestreo primaria se establecieron cinco unidades secundarias de muestreo (1 m² para biomasa aérea y 0.09 m² para biomasa subterránea). Se llegó al sitio mediante el uso de sistemas de posicionamiento global y se marcó el centro con una estaca de madera para posteriormente establecer la parcela secundaria de 1 m² y realizar las mediciones correspondientes (Figura 4).

Posterior al establecimiento de las unidades de muestreo secundarias, se realizó la cosecha del material vegetal para el correspondiente pesado en fresco. Para el caso de la biomasa subterránea (raíces) se utilizaron las unidades secundarias de muestreo de 30 × 30 cm. Se realizaron colectas de vegetación para extraer en buenas condiciones el sistema radicular y para determinar la biomasa aérea y de raíz en seco. Las plantas extraídas fueron separadas en parte aérea y radicular, y se tomó el peso de la raíz en fresco y una muestra obtenida de la unidad secundaria central. Para cada caso, la muestra fue embolsada en plástico para su traslado a la estufa de secado y obtención del peso en seco. La profundidad de excavación en promedio fue de 20 cm de profundidad.

Las muestras se colocaron en bolsas de papel, se etiquetaron y llevaron a gabinete para la deshidratación en una estufa de secado a 85 °C por 48 h de acuerdo con lo sugerido por Avendaño-Hernández, Acosta, Carrillo y Etchevers (2009) y Hernández-García, Rodríguez, Enríquez, Campos y Hernández (2017) (Figura 5).

Una vez secas las muestras, se procedió a realizar el cálculo final para determinar materia seca por sitio de muestro donde se utilizó la siguiente Ecuación (1):

$$PST = \frac{PFT \times PSs}{PFs} \quad (1)$$

donde:

PST es peso seco total (kg/m²);

PFT se refiere al peso fresco total (kg);

PSs es el peso seco de la submuestra (g);

PFs es el peso fresco de la submuestra (g).



(a)



(b)

Figura 4. (a) Delimitación del sitio de 1 m²; (b) medición de variables en campo.
Figure 4. (a) Delimitation of the site of 1 m²; (b) measurement of variables in the field.



Figura 5. Secado de las muestras en laboratorio.
Figure 5. Drying of the samples in the laboratory.

De esta manera el resultado de la biomasa estimada corresponde a la cantidad de materia seca efectiva por unidad de superficie. Para obtener los valores de carbono se multiplico la biomasa por el valor sugerido por el IPCC correspondiente a 0.47. Este valor difiere del sugerido por el grupo de trabajo de uso y cambio de uso de suelo (GPG-LULUCF, por sus siglas en inglés), pero es más realista para biomasa herbácea (Mchenry *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Estimadores estadísticos del inventario de biomasa.
Table 1. Statistical estimators of the biomass inventory.

Estimador	Ecuación
Estimador de razón	$\hat{\mu}_{ha} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{70} y_i}{\sum_{i=1}^{70} x_i} = \frac{\sum_{i=1}^{70} \sum_{j=1}^m y_{ij}}{\sum_{i=1}^{70} \sum_{j=1}^m x_{ij}}$
Varianza de la razón	$\hat{v}(\hat{\mu}_{ha}) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(\frac{1}{n\bar{x}^2}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_{ha}^4 x_i)^2}{n-1}$
Intervalo de confianza al 95% de confiabilidad	$U_{(xi)} = \frac{R}{n}$
Error de muestreo relativo	$EMR = \frac{2(\hat{v})^{0.5}}{\hat{\mu}} \times 100$

Análisis de Datos: Inventarios

Aun cuando las UMS teóricamente tienen un patrón fijo, por razones de geolocalización en el terreno poseen un patrón con cierta aleatoriedad e incluso en algunos casos el número de ellas puede ser menor a cinco, conduciendo a un muestreo por conglomerados de tamaños diferentes (Velasco-Bautista *et al.*, 2016). Por lo tanto, las estimaciones del parámetro de interés se obtuvieron al calcular la biomasa a partir de cada UMP, bajo el enfoque de estimadores de razón, entendido como una expresión matemática que considera la relación de una variable de interés (en nuestro caso biomasa) respecto a una variable auxiliar (superficie) (Šmelko y Merganič, 2008).

Con base en lo anterior, la información de los 70 conglomerados fue concentrada para realizar los cálculos estadísticos del inventario de biomasa (aérea y subterránea) utilizando las ecuaciones descritas en el Cuadro 1.

donde:

$\hat{\mu}_{ha}$ es la biomasa en Mg ha⁻¹.

y_{ij} es la biomasa registrada en la UMS j perteneciente a la UMP i ; $j = 1, 2, \dots, 5$; $i = 1, 2, \dots, 70$.

y_i es el total de biomasa considerando las m unidades de muestreo secundarias evaluadas en la UMP i .

y_{ij} es la superficie de la UMS j perteneciente a la UMP i .

x es el total de la superficie efectiva muestreada considerando las m unidades de muestreo secundarias evaluadas en la UMP i .

Para poder determinar posibles correspondencias entre los datos de campo (coberturas, altura promedio, peso fresco de la biomasa aérea, subterránea y total) y las variables determinadas en laboratorio, se realizaron análisis de correlación de Pearson y se establecieron, vía modelos de regresión simple, las relaciones predictivas para las variables respuestas con más alta correlación (López-Serrano *et al.*, 2016). Los supuestos de la regresión fueron evaluados a partir de pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks, test de Levene para homogeneidad de varianzas y se asumió independencia de los datos (Queen, Quinn y Keough, 2002). Todos los análisis de datos, así como las pruebas estadísticas, se realizaron dentro del ambiente del software estadístico “R” (R Core Team, 2020).

Regionalización de las Variables

Para representar de forma espacial el contenido de biomasa/carbono en el área bajo estudio, se aplicó la técnica geoestadística de interpolación Kriging empírico-bayesiano (Gribov y Krivoruchko, 2020), representada en la Ecuación (2).

$$Z_{x0} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_{(Xi)} + \sum_{i=1}^n S_i \cdot U_{(Xi)} \quad (2)$$

donde: Z_i ($i= 1, \dots, n$) es el valor de la biomasa/carbono en la ubicación X_i , λ_i , ($i= 1, 2, 3, \dots, n$), representa la ponderación de kriging generada usando los parámetros de los variogramas-cruzados entre $Z_{(Xi)}$ y $U_{(Xi)}$. n representa el total del número de observaciones. La variable $U_{(Xi)}$ es el rango estandarizado y se calcula de acuerdo a la siguiente Ecuación (3):

$$U_{(Xi)} = \frac{R}{n} \quad (3)$$

donde: R representa el rango del R -ésimo orden estadístico de la biomasa/carbono en la superficie en la ubicación X_i .

En particular, Kriging bayesiano empírico es un método de interpolación basado en Kriging que explica la incertidumbre en la estimación al simular varios semivariogramas a partir de los datos de entrada Zhu *et al.*, 2020. Además, puede dar cuenta de la no estacionariedad moderada mediante la construcción de modelos locales en subconjuntos de datos de entrada. Los métodos geoestadísticos explícitamente modelan

la estructura de la autocorrelación espacial de los datos e incorporan esta información en la estimación variables de interés (para nuestro caso biomasa/carbono) en espacios no muestreados (Castillo-Santiago *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2020). Los análisis espaciales y la modelación de Kriging bayesiano se realizaron dentro del ambiente del software ArcGIS® ver.10.8, utilizando el módulo geoestadístico y siguiendo los parámetros de modelación establecidos. Los gráficos se realizaron dentro del ambiente del software estadístico “R” (R Core Team., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el inventario calculado, la cantidad de biomasa en el área de estudio quedó distribuida de la siguiente manera: la biomasa aérea se estimó 343.59 toneladas, mientras que para biomasa subterránea fue de 1637.78 toneladas. La biomasa total se estimó entonces en 1981.4 toneladas, de las cuales 931.26 toneladas corresponden a carbono total en la vegetación del área de estudio (Cuadro 2).

Con respecto a la proporción biomasa aérea/subterránea, se ha documentado que la vegetación y tipo de suelo determinan la diferente longitud del sistema radicular (Martínez-Luna *et al.*, 2020; Morales-Hernández, Gómez, Velázquez y Ambriz, 2017). Según lo observado en campo, la masa principal de la raíz en pastos halófilos se encuentra dentro de los 0 a 20 cm de profundidad, aunque para algunas especies las raíces pueden ser más profundas que 1 a 2 m, lo que hace casi imposible la excavación para obtener la raíz completa en condiciones de zona semidesértica y falta de agua, lo cual coincide con nuestra área de estudio. Sin embargo, la masa principal de las raíces fue recogida a una profundidad de 0 a 20 cm. Dado que no hubo posibilidad de lavar las muestras en campo, las raíces se separaron con las manos cuidadosamente del suelo y las piedras excesivas, lo cual pudo haber introducido alguna fuente de incertidumbre no contabilizada en este estudio.

Con respecto a los valores medios, la media en $Mg\ ha^{-1}$ se ubicó en 2.58 toneladas de biomasa total, por lo tanto, lo correspondiente a carbono fue de 1.21 toneladas. Cabe señalar que, el error de muestreo relativo estuvo por arriba de lo esperado (13.52%); sin embargo, se considera que las estimaciones totales fueron aceptables de acuerdo con al análisis y diseño empleados (Cuadro 3).

Cuadro 2. Inventario total de biomasa para el área de estudio.
Table 2. Total biomass inventory for the study area.

Estadístico	Biomasa aérea	Biomasa Subterránea	Biomasa Total	Carbono Total
T (total en kg)	343592.31	1637812	1981404.2	931260
Toneladas totales	343.59	1637.78	1981.4	931.26
Toneladas por ha	0.49	2.34	2.83	1.33
Varianza de la media muestral	983.4	29108.61	36340.09	8027.52
IC superior	510.6	2476.573	2964.57	1393.35
IC inferior	385.25	1794.12	2202.05	1034.96

Es importante remarcar que son pocos los estudios que se han realizado respecto a la estimación de depósitos de carbono para los pastizales de nuestro país, y más específicamente para el pastizal halófilo; sin embargo, existe información sobre el almacén de carbono en pastizales y matorrales a nivel macro (Segura-Castruita, Sánchez, Ortiz y Gutiérrez, 2005) y sobre la evaluación del contenido de carbono orgánico del suelo (Jurado-Guerra *et al.*, 2013). Por lo tanto, este estudio presenta información relevante respecto al contenido de biomasa/carbono para este tipo de vegetación en particular (Cuadro 4).

Es importante señalar que los pastizales naturales de Chihuahua en condiciones regulares a excelentes almacenan entre 4 y 14.25 Mg ha⁻¹ de carbono aéreo, respectivamente; por lo tanto, el hecho de que los pastizales en buenas condiciones presenten mayor almacén de captura de carbono indica que existe un buen potencial de captura y almacenamiento de carbono en los sitios con baja/regular condición (Yerena-Yamallel *et al.*, 2014).

Con respecto al carbono subterráneo (raíces) los rangos encontrados coinciden con otros autores para este tipo de vegetación (Cespedes, Fernández, Gobbi y Bernardis, 2012; Jurado Guerra *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2013). Sin embargo, la mayoría de los estudios en pastizales en general se concentran en el carbono orgánico del suelo (COS) debido que es este compartimiento concentra la mayor cantidad de carbono almacenado.

Pruebas de Correlación

De las variables registradas en campo, la biomasa subterránea y total fueron las que presentaron las más altas correlaciones respecto a las variables determinadas en laboratorio (Cuadro 5). Para fines de posible estimación a partir de datos en campo, se construyeron modelos de regresión donde la variable dependiente fue el carbono total y las variables independientes fueron la biomasa total y subterránea colectadas en campo (frescas).

Cuadro 3. Estadísticos finales del inventario total de biomasa.
Table 3. Final statistics of the total biomass inventory.

Estadístico	Biomasa aérea	Biomasa subterránea	Biomasa total	Carbono total
- - - - - kg - - - - -				
Media	447.96	2135.34	2583.31	1214.15
Varianza muestras	75751.83	2242240.10	2799282.48	618361.50
Desviación estándar	275.23	1497.41	1673.10	786.35
Error de muestreo relativo	14.00	15.97	14.75	14.75

Cuadro 4. Contenido de biomasa/carbono aéreo por tipo de vegetación en zonas áridas.
Table 4. Aboveground biomass / carbon content by type of vegetation in arid zones.

Tipo de vegetación	Biomasa	Carbono	Fuente
	- - - - Mg ha ⁻¹ - - - -		
Pastizal halófilo	0.49	0.23	Este estudio
Pastizal halófilo	2.79	ND	(Long <i>et al.</i> 1989)
Pastizal natural 10 años	9.09	4.13	(Yerena-Yamallel <i>et al.</i> 2014)
Pastizal natural 30 años	17.70	8.03	(Yerena-Yamallel <i>et al.</i> 2014)
Matorral espinoso	30.16	15.08	(Briones <i>et al.</i> 2018)
Matorral micrófilo	20.53	12.6	(Briones <i>et al.</i> 2018)

En ambos casos, los supuestos de regresión fueron cumplidos (Shapiro-Wilk: 0.89-0.94; Prueba de Levene: 5.96-4.37; p-values: < 0.05).

Las correlaciones entre biomasa seca y fresca son evidentes, así como de utilidad confirmadas en este estudio. Un punto importante es la alta correlación de la biomasa subterránea fresca medida en campo con el carbono total (0.94, $P < 0.001$), por lo que podría considerarse como una opción para la estimación de carbono total en este tipo de ecosistemas a partir de un modelo de regresión lineal propuesto (Cuadro 6).

El uso de modelos de regresión para la estimación de carbono en diferentes especies, principalmente

forestales, ha sido ampliamente documentado (Acosta-Mireles, Carrillo y Díaz, 2009; Avendaño-Hernández *et al.*, 2009; Virgil, 2010¹; Martínez-Luna *et al.*, 2020).

Sin embargo, para el caso de otros tipos de vegetación (p. ej.: pastizales), estas relaciones han sido poco exploradas, por lo que una de las contribuciones del presente trabajo es sobre la estimación de un parámetro de interés a través de modelos de regresión. Como se aprecia en la Figura 6, la relación, vía modelos lineales, de la biomasa subterránea con el carbono total es adecuada para realizar estimaciones acertadas o cercanas a la realidad.

Cuadro 5. Correlación de Pearson (r) para las variables analizadas, los números entre paréntesis se refieren al p-value.
Table 5. Pearson's correlation (r) for the analyzed variables, the numbers in parentheses refer to the p-value.

	Biomasa aérea seca	Biomasa subterránea seca	Biomasa total seca	Carbono total
Cobertura vegetal	0.27 (0.469)	0.16 (>0.999)	0.22 (>0.999)	0.22 (>0.999)
Altura total	0.35 (0.084)	0.09 (>0.999)	0.17 (>0.999)	0.17 (>0.999)
Biomasa aérea fresca	0.10 (>0.999)	-0.02 (>0.999)	0.00 (>0.999)	0.00 (>0.999)
Biomasa subterránea fresca	0.62 (<0.001)	0.96 (<0.001)	0.94 (<0.001)	0.94 (<0.001)
Biomasa total fresca	0.56 (<0.001)	0.78 (<0.001)	0.77 (<0.001)	0.77 (<0.001)

¹ Virgil-Neri, N. (2010). *Estimación de biomasa y contenido de carbono en Cupressus lindleyi Klotzsch ex Endl. en el campo forestal experimental "Las cruces", Texcoco, México*. Tesis profesional. Requisito parcial para obtener el título de: Ingeniero en Restauración Forestal. Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México.

Cuadro 6. Modelos de regresión para estimar carbono total en pastizales halófilos.
Table 6. Regression models to estimate total carbon in halophilic grasslands.

Modelo	Estimadores	Error residual estándar	F	R2	p-value
$CT = \beta_0 + bs\beta_1$	$\beta_0 = 59.49$ $\beta_1 = 0.2868$	275	462.4	0.87	< 0.001
$CT = \beta_0 + bt\beta_1$	$\beta_0 = 23.370$ $\beta_1 = 0.2066$	138.26	93.62	0.58	< 0.001

CT = carbono total; bs = biomasa subterránea; bt = biomasa total.
 CT = total carbon; bs = underground biomass; bt = total biomass.

Regionalización de las Variables

Para analizar el comportamiento espacial de la biomasa/carbono en el área de estudio, se aplicó el método de Kriging bayesiano empírico, el cual modeló de manera adecuada las variables en cuestión. Los valores estuvieron en el rango de 550 a 2600 kg de carbono total por hectárea y se aprecia la concentración de carbono en la parte norte y oeste del área de estudio (Figura 7).

Una de las ventajas de usar métodos geoestadísticos para realizar interpolaciones es la utilización de las propiedades estadísticas de puntos medidos para obtener los valores donde no hubo medición (Bhunja, Shit y Maiti, 2018). El resultado de la validación cruzada (Figura 8) muestra que el modelo de variograma utilizado representó adecuadamente la dependencia espacial de los datos obtenidos en el muestreo por lo que los errores de predicción fueron mínimos.

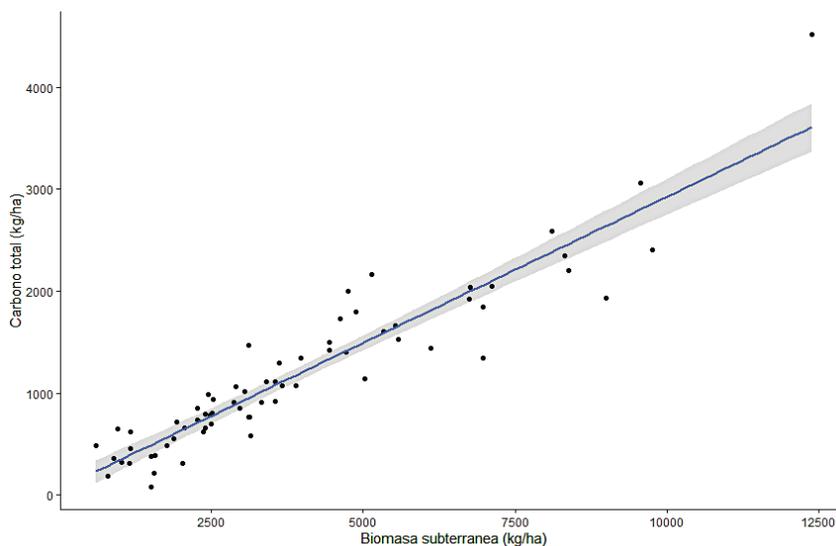


Figura 6. Relación carbono total biomasa subterránea. El área gris representa los intervalos de confianza.

Figure 6. Total carbon relation underground biomass. Gray area refers to confidence intervals.

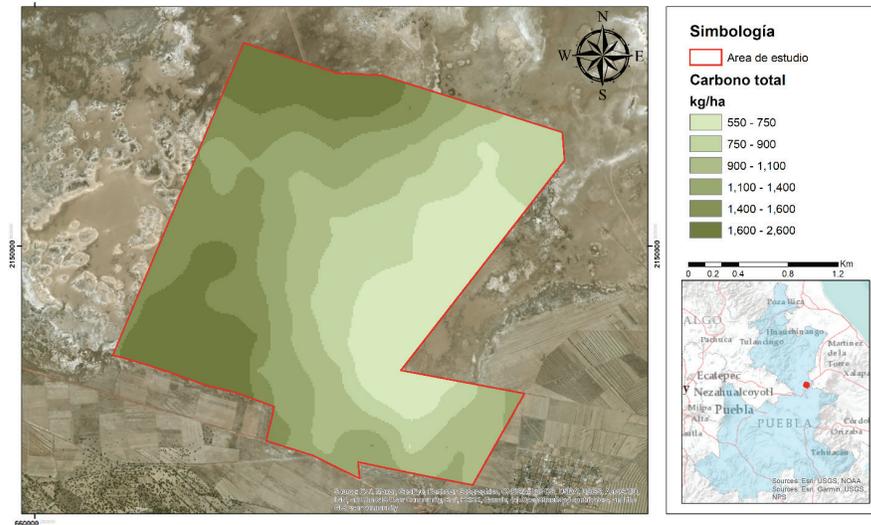


Figura 7. Representación espacial del carbono total en pastizal halófilo en el área bajo estudio.
Figure 7. Spatial representation of total carbon in halophilic grassland in area under study.

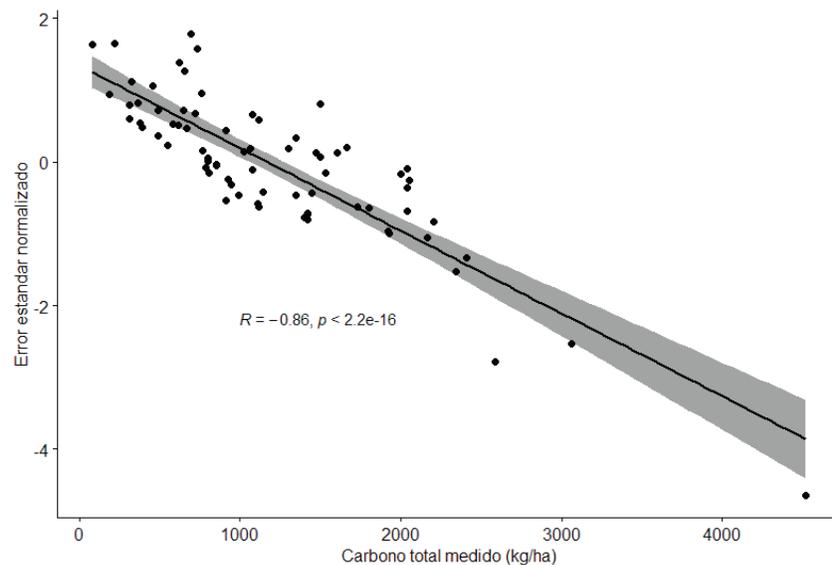


Figura 8. Errores estándar normalizados respecto al carbono total medido en campo.
Figure 8. Normalized standard errors with respect to total carbon measured in the field.

CONCLUSIONES

El contenido de carbono total calculado para pastizales halófilos fue de 1.33 Mg ha⁻¹. En cuanto a biomasa, la parte aérea se estimó en 0.49 Mg ha⁻¹, mientras que la parte subterránea fue de 2.34 Mg ha⁻¹.

El rango de carbono estimado para pastizal halófilo fue de 550 a 2600 kg ha⁻¹. Debido a las particularidades de este tipo de vegetación, las relaciones entre datos de fácil medición en campo con variables de interés (es decir, carbono) fueron relativamente bajas a excepción de dos casos en particular, la biomasa fresca total

y subterránea. La biomasa subterránea medida en campo tuvo una alta correlación con el carbono total, por lo que podría considerarse como una opción viable para la estimación de carbono, en este tipo de ecosistemas, a partir del modelo de regresión propuesto. La aplicación del modelo propuesto es sugerida para ambientes similares en el centro del país. Será necesario realizar estudios posteriores valorar la aplicación en otros estados del país.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: M.E.R.S. y D.J.M.J.
 Metodología: M.E.R.S. y E.V.B. Escritura, preparación del borrador original: M.E.R.S. y E.V.B.
 Escritura: revisión y edición: M.E.R.S., E.V.B., D.J.M.J. y R.P.M.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo de técnicos y profesionistas forestales de la región de estudio para la toma de los datos. Los autores agradecen y reconocen a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias para la mejora sustancial de este manuscrito.

LITERATURA CITADA

Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.

- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & Etchevers-Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies de arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.
- Avendaño-Hernández, D. M., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Etchevers-Barra, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233-238.
- Bhunja, G. S., Shit, P. K., & Maiti, R. (2018). Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24(número especial), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer (FAO Forestry Paper-134)*. Rome: FAO. ISBN: 92-5-103955-0.
- Cairns, M. A., Olmsted, I., Granados, J., & Argaez, J. (2003). Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 186(1-3), 125-132. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00229-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00229-9)
- Castillo-Santiago, M. Á., Ghilardi, A., Oyama, K., Hernández-Stefanoni, J. L., Torres, I., Flamenco-Sandoval, A., Fernández, A., & Mas, J.-F. (2013). Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 17(2), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.007>
- Céspedes Flores, F. E., Fernández, J. A., Gobbi, J. A., & Bernardis, A. C. (2012). Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizales y una pradera bajo pastoreo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 79-86.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques*. New York, NY, USA: Wiley Eastern Limited. India.
- Gregoire, T. G., & Valentine, H. T. (2007). *Sampling strategies for natural resources and environment*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Gribov, A., & Krivoruchko, K. (2020). Empirical Bayesian kriging implementation and usage. *Science of the Total Environment*, 722, 137290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137290>
- Hairiah, K., Sitompul, S. M., van Noordwijk, M., & Palm, C. (2001). *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. Bogor, Indonesia: ICRAF.

- Hernández-García, J., Rodríguez Ortiz, G., Enríquez del Valle, J. R., Campos Ángeles, G. V., & Hernández Hernández, A. (2017). Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(36), 51-63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.59>
- Hernández, L., Alberdi, I., McRoberts, R. E., Morales, D., Redmond, J., & Vidal, C. (2016). Wood resources assessment beyond Europe. In C. Vidal, I. Alberdi, L. Hernández, & J. Redmond (Eds.). *National forest inventories: assessment of wood availability and use* (105-118). Cham, Switzerland: Springer.
- Houghton, R. A. (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945-958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>
- Houghton, R. A., Hall, F., & Goetz, S. J. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(2), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>
- Jiang, L., Zhao, W., Lewis, B. J., Wei, Y., & Dai, L. (2017). Effects of management regimes on carbon sequestration under the Natural Forest Protection Program in northeast China. *Journal of Forestry Research*, 29, 1187-1194. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0542-0>
- Jurado-Guerra, P., Saucedo, R. A., Morales, C. R. & Martínez, M. (2013). *Almacén y captura de carbono en pastizales y matorrales de Chihuahua, México*. México, D. F.: INIFAP.
- Lohr, S. L. (2010). *Sampling: design and analysis*. Boston, MA, USA: Brooks/Cole.
- Long, S. P., Garcia Moya, E., Imbamba, S. K., Kamnalrut, A., Piedade, M. T. F., Scurlock, J. M. O., Shen, Y. K., & Hall, D. O. (1989). Primary productivity of natural grass ecosystems of the tropics: A reappraisal. *Plant and Soil*, 115(2), 155-166. <https://doi.org/10.1007/BF02202584>
- López-Serrano, P., López-Sánchez, C., Díaz-Varela, R., Corral-Rivas, J., Solís-Moreno, R., Vargas-Larreta, B., & Álvarez-González, J. (2016). Estimating biomass of mixed and uneven-aged forests using spectral data and a hybrid model combining regression trees and linear models. *Forest - Biogeosciences and Forestry*, 9(2), 226-234. <https://doi.org/10.3832/ifor1504-008>
- Ma, Q., Kuang, W., Liu, Z., Hu, F., Qian, J., Liu, B., ... Shou, W. (2017). Spatial pattern of different component carbon in varied grasslands of northern China. *Geoderma*, 303, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.010>
- Macdicken, K. G. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Arlington, VA, USA: Winrock International Inst. for Agricultural Development.
- Martínez-Barrón, R. A., Calderón-Aguirre, A. O., VargasLarreta, B., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, J. E., & Yerena Yamallel, J. I. (2016). Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 91-105.
- Martínez-Luna, J. E., Carrillo-Anzures, F., Acosta-Mireles, M., Romero-Sánchez, M. E., & Pérez-Miranda, R. (2020). Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.726>
- Mchenry, M. P., Kulshreshtha, S. N., & Lac, S. (2015). *Land use, land use change and forestry*. Hauppauge, NY, USA: Nova Science Publishers. ISBN: 978-1-63483-426-1
- Molina, V., Pando, M., Marmolejo, J., & Alanís, E. (2013). Diversidad de costras biológicas del suelo en pastizales halófilos del norte de México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(7), 83-92.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García-Oliva, F., García-Sánchez, R., ... Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34, 39-59.
- Morales-Hernández, J., Gómez-Romero, M., Velázquez-Becerra, C., & Ambriz-Parra, E. (2017). Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 59-66. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.4>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... van Ypserle, J. P. (Eds.). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. ISBN: 978-92-9169-143-2.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Buendia, L., Miwa, K., ... Wagner, F. (Eds.). (2003). *Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human induced degradation of forest and devegetation of other vegetation types*. Hayama, Kanagawa, Japan: IGES-IPCC. ISBN: 4-88788-004-9.
- Queen, J. P., Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge: University press.
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). e2511713. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra ed. digital). México: Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad.
- Segura-Castruita, M. A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, M. del C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21-28.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006, Que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. *Diario Oficial de la Federación*. D.F.: SEGOB.
- Šmelko, Š., & Merganič, J. (2008). Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia. *Journal of Forest Science*, 54(10), 476-483.

- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, M. P. (Eds.). (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Urbazaev, M., Thiel, C., Cremer, F., Dubayah, R., Migliavacca, M., Reichstein, M., & Schullius, C. (2018). Estimation of forest aboveground biomass and uncertainties by integration of field measurements, airborne LiDAR, and SAR and optical satellite data in Mexico. *Carbon Balance and Management*, 13(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0093-5>
- Velasco-Bautista, E., de los Santos-Posadas, H. M., Ramírez-Maldonado, H., & Rendón-Sánchez, G. (2016). Comparación de estimadores para volumen maderable en selva mediana del sureste de México. *Agrociencia*, 50(1), 119-132.
- Vine, E. L., Sathaye, J. A., & Makundi, W. R. (1999). Forestry projects for climate change mitigation: An overview of guidelines and issues for monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification. *Environmental Science and Policy*, 3(2-3), 99-113. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00076-9)
- Yerena-Yamallel, J. I., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J. (2014). Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(1), 113-121.
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., le Moine, J., & Ryu, S.-R. (2004). Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.008>
- Zhu, M., Liu, S., Xia, Z., Wang, G., Hu, Y., & Liu, Z. (2020). Crop growth stage GPP-driven spectral model for evaluation of cultivated land quality using GA-BPNN. *Agriculture*, 10(8), 318. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080318>
- Zolkos, S. G., Goetz, S. J., & Dubayah, R. (2013). A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 128, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017>