

# Almacenamiento arbóreo-aéreo de carbono en comunidades vegetales del Parque Estatal Cerro El Faro, Tlalmanalco, Estado de México

Iván Ernesto Roldán Aragón,<sup>1\*</sup> Malinalli Cortés Marcial,<sup>2</sup>  
Aurora Chimal Hernández,<sup>3</sup> Jesús Sánchez Robles,<sup>4</sup>  
Ernesto Augusto León Carvajal<sup>5</sup> y Luis Carlos Padrón Cruz<sup>6</sup>

**Resumen.** Las áreas naturales protegidas ofrecen servicios ecosistémicos a la sociedad y son un modelo para la conservación local y regional. El objetivo fue estimar el carbono arbóreo-aéreo almacenado en las comunidades vegetales del Parque Estatal Cerro El Faro (PECEF), Tlalmanalco, Estado de México, que posee una superficie de 40.5 ha. Para ello, se caracterizó dasométricamente el arbolado, se estimó el almacenamiento de carbono y se cartografiaron los resultados. La riqueza fue de 11 especies de árboles, entre ellas, *Cupressus lusitanica*, *Quercus rugosa*, *Q. laurina* y *Arbutus xalapensis*, las que obtuvieron los valores de importancia principales. Las clases diamétricas > 40 cm almacenan la mayor cantidad de C. Se estimaron valores promedio entre 5.2 a 92.8 Mg C ha<sup>-1</sup> para las comunidades vegetales, un valor promedio de 51.9 Mg C ha<sup>-1</sup> y un almacenamiento total de 1603.9 Mg en las 30.3 ha arboladas del área. La Zona de Conservación del PECEF almacena en promedio 2 veces más C ha<sup>-1</sup> que la Zona de Manejo, debido a que esta última, ha sido la más amenazada y ha perdido una mayor cobertura arbórea.

**Palabras clave.** Servicios ecosistémicos; Áreas naturales protegidas; Bosques templados; Almacenamiento de carbono.

<sup>1</sup> Laboratorio de Planeación Ambiental, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

<sup>2</sup> Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

<sup>3</sup> Laboratorio de Taxonomía y Ecología Vegetal, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

<sup>4</sup> Laboratorio de Estadística, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

<sup>5</sup> Maestría en Ecología Aplicada, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

<sup>6</sup> Laboratorio de Taxonomía y Ecología Vegetal, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

\* Autor de correspondencia: ieroldan@correo.xoc.uam.mx

**Abstract.** Protected natural areas offer ecosystem services to society and are a model for local and regional conservation. The objective was to estimate the arboreal-aerial carbon stored in the plant communities of the Cerro El Faro State Park (CEFSP), Tlalmanalco, State of Mexico, which has an area of 40.5 ha. To do this, the trees were dasometrically characterized, carbon storage was estimated and the results were mapped. The richness was 11 tree species, including *Cupressus lusitanica*, *Quercus rugosa*, *Q. laurina* and *Arbutus xalapensis*, which obtained the main importance values. Diametric classes > 40 cm store the greatest amount of C. Average values between 5.2 to 92.8 Mg C ha<sup>-1</sup> were estimated for the plant communities, an average value of 51.9 Mg C ha<sup>-1</sup> and a total storage of 1603.9 Mg in the 30.3 hectares of trees in the area. The CEFSP Conservation Zone stores on average 2 times more C ha<sup>-1</sup> than the Management Zone, because the latter has been the most threatened and has lost greater tree cover.

**Key words:** Ecosystem services; Protected natural areas; Temperate forests; Carbon storage.

## INTRODUCCIÓN

Durante miles de años, las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se habían mantenido entre 172 ppm y 299 ppm, sin embargo, a partir de la Revolución Industrial en la segunda mitad del siglo XVIII ocurrieron grandes impactos sobre el ambiente, entre ellos la emisión de dióxido de carbono (IPCC, 2023; Zamora *et al.*, 2016). Se ha reportado que durante la primera mitad del siglo XX hubo un ascenso considerable de CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre, con un crecimiento medio anual en el período comprendido entre 2010 y 2019 de  $10.9 \pm 0.9$  petagramos de carbono al año (PgC año<sup>-1</sup>) y una concentración de 408 ppm para el año 2018 (GCP, 2021; IPCC, 2021). Entre las fuentes principales de emisión de CO<sub>2</sub> se encuentran el uso de combustibles fósiles y la producción de cemento, ya que contribuyen con  $9.4 \pm 0.5$  PgC año<sup>-1</sup> ( $\approx 86\%$ ), mientras que los cambios de uso del suelo representan una emisión de  $1.6 \pm 0.7$  PgC año<sup>-1</sup> (Canadell *et al.*, 2021). Como consecuencia del incremento de este gas con efecto invernadero, los impactos han sido el aumento de la temperatura media global en el planeta de 0.99°C, cambios en los patrones de lluvias, incremento del nivel del mar, sequías de mayor duración y cambios en los patrones de movimiento de especies, entre otros (NASA, 2021).

La conservación de los bosques primarios y la reforestación y/o restauración de los bosques perturbados contribuyen a la disminución de la concentración de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (De Jong *et al.*, 2004), ya que mantienen o incrementan los sumideros de carbono (Kurz *et al.*, 2016). Se ha documentado que los bosques, tanto

templados como tropicales, almacenan una cuarta parte del carbono a nivel planetario (GCP, 2021), con un almacenamiento estimado de  $861 \pm 66$  PgC, de los cuales 42 % ( $363 \pm 28$  PgC) se encuentra en la biomasa viva, tanto aérea como subterránea (Pan *et al.*, 2011).

En el caso de México, Maserá *et al.* (1997) estimaron que los bosques mexicanos almacenan aproximadamente 8 PgC. Estudios realizados en los últimos 13 años (Conafor, 2018; Cartus *et al.*, 2014; FAO, 2010) mencionan que en la biomasa aérea de los bosques del país se almacena entre 1.48 PgC y 2.21 PgC, cifras que son variables debido a las metodologías utilizadas para su estimación y a las dinámicas de cambio de los usos del suelo y vegetación. Además, el carbono almacenado en la parte aérea de la vegetación depende del estado de sucesión de las coberturas vegetales, así como de su estado de conservación y/o degradación (Paz-Pellat *et al.*, 2019; Orozco-Hernández *et al.*, 2013; Jong *et al.*, 2004). Conafor (2018) con base en el inventario nacional forestal y de suelos 2009 – 2014 estima que 55.5% (0.82 PgC) del carbono se encuentra en la vegetación primaria, tanto en bosques templados, tropicales y manglares y 44.5% (0.66 PgC) en la vegetación secundaria. En cuanto a tipos de vegetación primaria de Jong *et al.* (2019) estimaron que los valores promedio más altos de almacenamiento de carbono aéreo se encuentran en el Bosque de Oyamel ( $103.66$  MgC ha<sup>-1</sup>), seguido por la Selva Alta Subperennifolia ( $83.07$  MgC ha<sup>-1</sup>), el Bosque de Ayarin ( $71.13$  MgC ha<sup>-1</sup>) y por el Bosque Mesófilo de Montaña ( $67.57$  MgC ha<sup>-1</sup>), con los valores máximos reportados para el Bosque Mesófilo de Montaña ( $646.8$  MgC ha<sup>-1</sup>), la Selva Alta perennifolia ( $582.3$  MgC ha<sup>-1</sup>) y el Bosque de Oyamel ( $460.85$  MgC ha<sup>-1</sup>). Para el caso de la vegetación secundaria se ha observado una mayor variabilidad en los valores promedio del carbono aéreo almacenado, cifras que en la mayoría de los tipos de vegetación se encuentran por abajo del valor registrado en la vegetación primaria, con excepción de algunos bosques como el de Cedro, Encino, Encino-Pino y de la Selva Baja Subcaducifolia.

Entre las estrategias impulsadas en México para la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, entre ellos el secuestro de carbono, se encuentran las áreas naturales protegidas (ANP) (Paz-Pellat *et al.*, 2019). Su relevancia como sumideros de carbono es considerable, puesto que para el año 2004, Creel (2009), con base en el plano de vegetación y uso del suelo 2002-2005 (INEGI, 2005), estimó un almacenamiento de 2.2 PgC, con una tasa de secuestro de 0.438 PgC año<sup>-1</sup>.

Entre los estados de la República Mexicana con el mayor número de ANP, tanto federales como estatales, se encuentra el Estado de México, las cuales protegen parte importante de los bosques templados de la entidad (CEPANAF, 2023; Moreno-Barajas *et al.*, 2019; Ceballos *et al.*, 2009). Una de las ANP relevantes es el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepet (PNIP), ubicada en el Eje Volcánico Transversal (ENT), región

del país que se encuentra entre las de mayor almacenamiento ( $> 50 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de carbono (Cartus *et al.*, 2014). A pesar de su estatus de protección el PNIP muestra procesos de degradación impulsados por la tala clandestina, incendios, agricultura de subsistencia, pastoreo extensivo e incremento de las áreas urbanas, problemáticas que afectan su capacidad como sumidero de carbono (Paz-Pellat *et al.*, 2019; Orozco-Hernández *et al.*, 2013; Vega-López, 2009). En este sentido, Lara *et al.* (2016) construyen un escenario tendencial a diez años con cartografía del periodo 2007-2012, que muestra para el Parque Nacional y su área de influencia una disminución del 9 % anual de las coberturas naturales (bosque templado, pastizal natural y vegetación secundaria de bosque templado) como consecuencia del incremento de áreas urbanas ( $1\% \text{ año}^{-1}$ ) y de la agricultura de temporal ( $7\% \text{ año}^{-1}$ ).

Bajo este contexto, el “Parque Estatal Cerro El Faro” (PECEF), toma relevancia debido a que forma parte de las ANPs de la Sierra Nevada, al igual que el PNIP, las cuales constituyen la estrategia de conservación federal y estatal y que, a la vez, están sujetas a semejantes presiones antropogénicas. Como ANP de nivel estatal, el PECEF está destinado a la protección, restauración y conservación de los recursos naturales de suelo, agua, flora y fauna y, como causa de utilidad e interés público al aprovechamiento científico o educativo. Asimismo, los usos del suelo actuales o propuestos según la gaceta de gobierno del Estado de México serán aquellos que cumplen con una función ambiental relevante, como la educación ambiental en el ámbito de la conservación, fungir como zona de amortiguamiento de impactos antropogénicos, para el desarrollo de estudios taxonómicos de flora y fauna y como sumideros con potencial de captura de carbono, entre otros (Gobierno del Estado de México, 2003).

Por lo anterior, conocer los distintos servicios ecosistémicos que ofrece el PECEF, entre ellos el almacenamiento de C, es importante, de tal forma que se cumplan los objetivos establecidos en su decreto como ANP y permita otorgar a la población los beneficios que ésta brinda. Además, conocer el estado en el que se encuentran es de utilidad para establecer una línea base, para poder llevar a cabo el seguimiento de las acciones de manejo y la retroalimentación del programa de manejo del área.

En este contexto, este trabajo tuvo como objetivos caracterizar el arbolado presente en el PECEF, estimar el carbono arbóreo-aéreo almacenado en las comunidades vegetales y representar espacialmente las estimaciones de carbono.

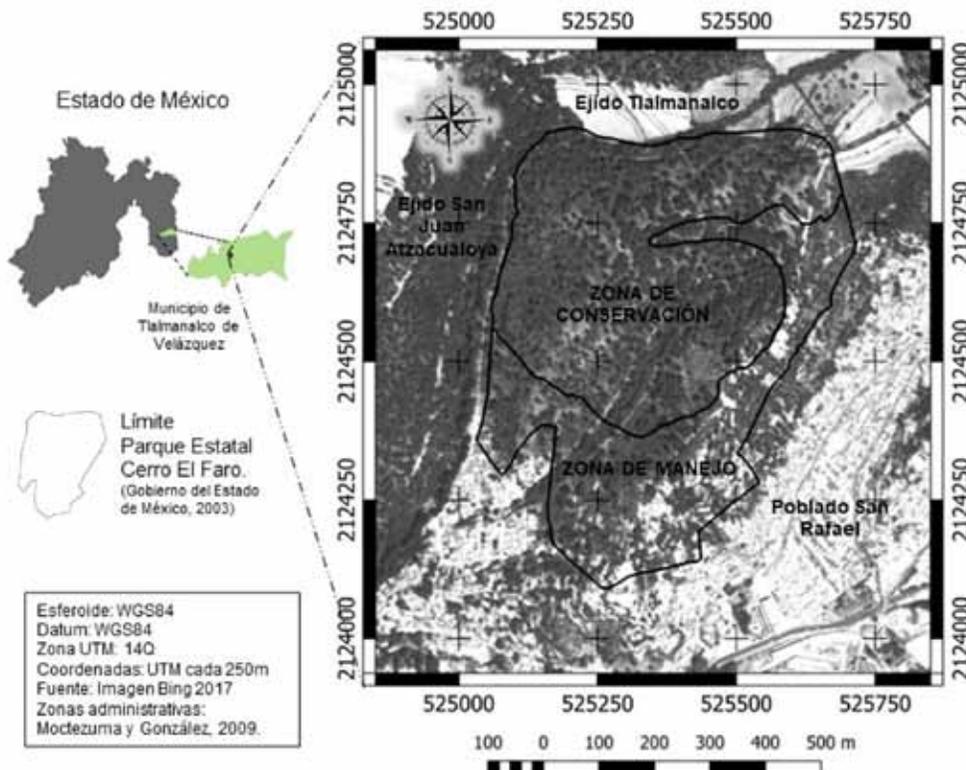
## METODOLOGÍA

### Zona de estudio

La fábrica “Papeles de Calidad de San Rafael, S.A. de C.V.” donó el predio “Cerro El Faro” en 1995, con una superficie de 58.214233 ha, al gobierno del Estado de México, de la cuales 40.510286 ha fueron decretadas como Parque Estatal el ocho de agosto del 2003 (Gobierno del Estado de México, 2003). El Parque Estatal Cerro El Faro (PECEF) se ubica en el municipio de Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México (Figura 1), en la vertiente occidental del volcán Iztaccihuatl, entre las coordenadas UTM (Zona 14 Norte. Datum WGS84) mínimas  $X = 525006$ ,  $Y = 2124023$  y máximas  $X = 525711$ ,  $Y = 2124873$ , en altitudes que van de 2560 a 2700 msnm. El clima según datos de la estación meteorológica más cercana (San Rafael. Estación 00015106. CONAGUA, s/f) es templado subhúmedo ( $C(w_2)(w) i g$ ) con temperatura media anual de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  y precipitación total anual de 1060.2 mm, con un cociente P/T de 75.72% de lluvia invernal de 4.79, oscilación isotermal y marcha anual de la temperatura tipo Ganges. Agosto es el mes más lluvioso (216.6 mm) y el más seco es diciembre (7.6 mm) y, el mes más frío enero ( $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y el más caluroso mayo ( $16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Se han registrado 264 especies de plantas vasculares, (Cabañas, 2020; Barrales, 2019; Chimal *et al.*, 2013), 83 especies de aves (Leon *et al.*, 2019) y 14 especies de mamíferos medianos y pequeños (Mendoza, 2022; Montes *et al.*, 2019). Respecto a coberturas del suelo, 74.7% (30.3 ha) del PECEF está cubierto por cuatro comunidades arbóreas: *Quercus* spp. (2.67 ha), *Quercus-Pinus* (3.71 ha), *Pinus-Quercus* (11.69 ha) y *Cupressus-Pinus* (12.26 ha); 19% por comunidades arbustivas y herbáceas; 4% del suelo carece de cobertura vegetal y poco menos del 1% está ocupado por casas-habitación dispersas en el territorio (Figura 2). Según el “Programa de conservación y manejo del área natural protegida con categoría de parque estatal Cerro el Faro” (Moctezuma y González, 2009), la zonificación del ANP está constituida por la “Zona de Conservación” que ocupa el 59.75% del área (24.2 ha) y por la “Zona de Manejo” (16.3 ha) en el resto del Parque (Figura 1), sin embargo, a pesar de la zonificación, las actividades de manejo han sido indistintas en ambas zonas, centrándose estas en la apertura de brechas corta fuego, la construcción de tinas ciegas y en la reforestación tiempo atrás con especies como *Pinus patula* Schiede ex Schltdl y Cham., *Cupressus lusitanica* Mill. y *Quercus* spp., además de la introducción de individuos de *Eucalyptus camaldulencis* Mill. y *E. globulus* Labill., los cuales han llegado a su edad reproductiva y se han dispersado en la zona, constituyéndose en un problema potencial dada su condición de especies invasoras. Respecto a esto último, se ha documentado la presencia de otras siete especies de plantas exóticas invasoras en el área (Chimal *et al.*,

2013). En los últimos años se ha presentado el ataque de plagas forestales (*Dendroctonus* spp.), por lo que se ha procedido al saneamiento mediante la extracción de árboles plagados y muertos de tamaño considerable en varias zonas del área, abriendo huecos en la continuidad del bosque. Otro problema ambiental relevante es la ocupación del parque por asentamientos irregulares, principalmente en las zonas este y sur, que son las colindantes al área urbana, además, existen dos tiraderos de basura de tamaño considerable en las cañadas. Finalmente, habría que mencionar el aprovechamiento por parte de la población vecina de algunos recursos naturales, como plantas silvestres, hongos en época de lluvias y conos de *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. Ex Schltld. para la elaboración de artesanías.

Figura 1. Localización del Parque Estatal Cerro El Faro, Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México



Composición propia. Fuente y fechas de la imagen satelital y otros elementos en la figura.

## MÉTODOS

Para el cumplimiento de los objetivos se desarrolló una primera etapa que llevó a la caracterización del arbolado, una segunda, destinada a la estimación del contenido de carbono arbóreo-aéreo en las comunidades vegetales y, una última, que consistió en la representación espacial de los valores de carbono por tipo de comunidad vegetal y áreas administrativas del PECEF.

En cuanto a la caracterización del arbolado, en enero (época de secas), mayo (previo a la época de lluvias) y agosto (época de lluvias) de 2018 se realizó el trabajo de campo, que consistió en la obtención de registros dasométricos de los árboles localizados en 43 unidades de muestreo (Figura 2) de 100 m<sup>2</sup> (superficie total 4300 m<sup>2</sup>), que correspondió a una intensidad de muestreo 1.06 % de la superficie del PECEF y al 1.42 % de sus áreas arboladas. Las unidades de muestreo (um) fueron asignadas de forma preferencial en las cuatro comunidades arbóreas mencionadas anteriormente, siguiendo los criterios de la escuela fitosociológica de Braun-Blanquet (1979), con el siguiente número de unidades de muestreo en cada comunidad: 6 en *Quercus* spp., 4 en *Quercus-Pinus*, 17 en *Pinus-Quercus* y 16 en *Cupressus-Pinus*. Con base en la asignación anterior, el número de unidades de muestreo en la “Zona de Conservación” fue de 26 y de 17 en la “Zona de Manejo”. Se registraron los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o superior a los 10 cm, para fines de comparación con otros trabajos, así como su altura total. La determinación de las especies fue realizada con base en las claves taxonómicas de Rzedowski y Rzedowski (2001). Además, se obtuvo la riqueza y valor de importancia relativo (VIR) de las especies registradas, con base en la siguiente fórmula:

$$\text{VIR} = (\text{DR} + \text{ABR} + \text{FR}) / 3$$

Donde:

*DR* = densidad relativa

*ABR* = área basal relativa

*FR* = frecuencia relativa

(Romahn de la Vega *et al.*, 1994; Ellenberg y Mueller-Dombois, 1974).

Respecto a la estimación del contenido de carbono arbóreo-aéreo, se aplicaron las ecuaciones alométricas utilizadas por Cano-Flores *et al.* (2020) para el PECEF, las cuales proceden de distintos autores (Tabla 1). En el caso de solo contar con la ecuación para estimar la biomasa se utilizó el factor de conversión estandarizado (0.5) del IPCC (2003) para la obtención de carbono.

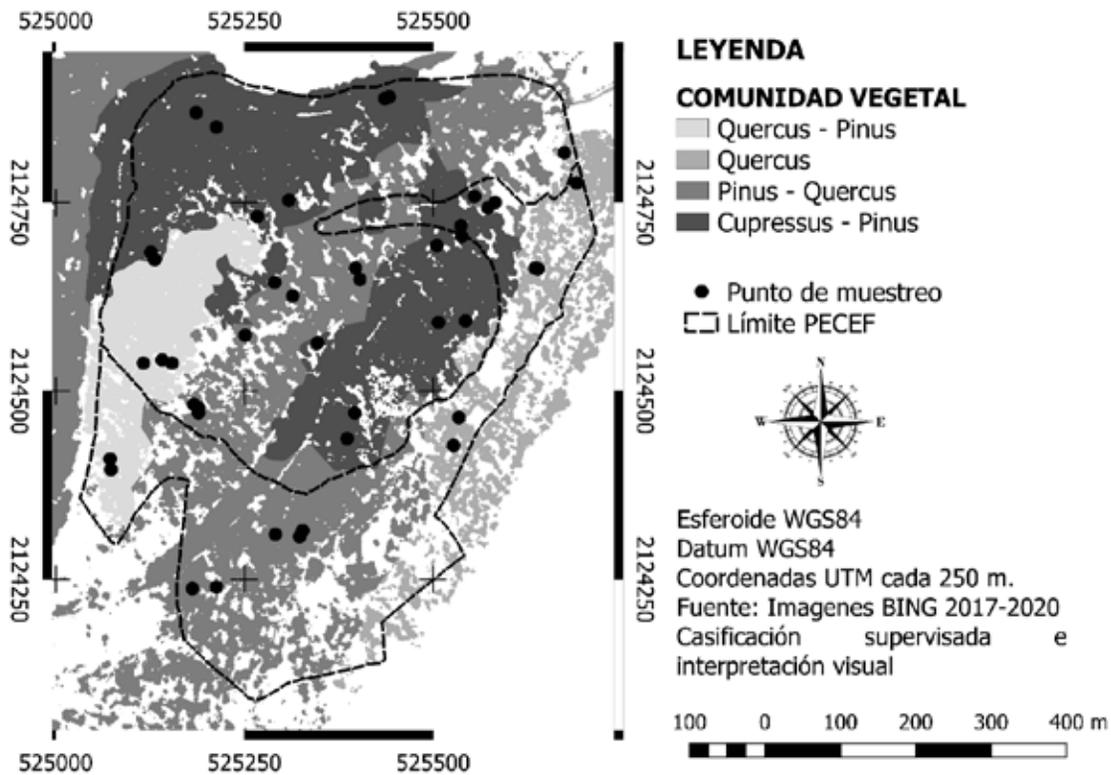
Tabla 1. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de carbono arbóreo-aéreo en las comunidades vegetales del PECEF (Tomadas de Cano-Flores *et al.*, 2020)

Nombre científico	Ecuación alométrica	Autores
<i>Arbutus xalapensis</i>	$C=0.3764DN^{2-2.3146}DN^{-1.9106}.05$	Aguilar-Hernández <i>et al.</i> , 2016; IPCC, 2003
<i>Cupressus lusitanica</i>	$C=0.2639DN^{1.7698}$	Bolaños González <i>et al.</i> , 2017
<i>Pinus patula</i>	$C=0.021DN^{2.645}$	Ruiz-Díaz <i>et al.</i> , 2014
<i>Pinus spp.</i>	$C=0.40196DN^{2}0.48$	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011
<i>Quercus spp.</i>	$C=0.1033DN^{2.39}0.5$	Bolaños-González <i>et al.</i> , 2017; IPCC, 2003

Donde: C= carbono, DN= diámetro normal.

Para la representación espacial del carbono almacenado se utilizó el mapa de vegetación del PECEF (Figura 2) previamente elaborado por Roldán en el año 2019. A cada comunidad vegetal se le asignó el valor promedio de carbono almacenado a partir de los cálculos resultantes de las unidades de muestreo (De Jong *et al.*, 2019), coincidentes espacialmente en los polígonos correspondientes. El procedimiento de asignación espacial de los valores de carbono fue realizado con el programa IDRISI Selva (Eastman, 2012).

Figura 2. Usos del suelo y vegetación en el Parque Estatal Cerro El Faro, Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México (cortesía de Roldan, 2019)



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se exponen los resultados obtenidos y se discute respecto a ellos, siguiendo el mismo orden en que fueron planteados los objetivos en la introducción. En cuanto a la caracterización del arbolado se describen tres aspectos; la composición de especies de árboles y su importancia relativa; los valores de densidad y área basal obtenidos y; la distribución de clases diamétricas y el carbono arboreo-aéreo almacenado en las mismas. Una segunda sección trata sobre el almacenamiento de carbono estimado para las comunidades de *Quercus* spp., *Quercus-Pinus*, *Pinus-Quercus* y *Cupressus-Pinus*. Finalmente, se menciona la estimación promedio de carbono ( $\text{MgC ha}^{-1}$ ), la estimación total de carbono almacenado en el PECEF y en sus áreas administrativas y, se representa su distribución espacial.

## Caracterización del arbolado en el PECEF

### **Especies de árboles registradas y valores de importancia relativos**

La riqueza de especies de árboles fue 11 (Tabla 2), entre las cuales los géneros *Pinus* y *Quercus* son los que tienen cinco y cuatro especies, respectivamente, además, estuvieron presentes los géneros *Cupressus* y *Arbutus*. Juan (2020), Cabañas (2020) y Chimal *et al.* (2013) reportaron 30 especies de árboles para el PECEF, de las cuales, 19 no se consideran en este estudio, por una parte, debido al valor límite del DAP establecido para el análisis ( $DAP \geq 10$  cm) y, en algunos casos, por su baja abundancia en la zona, condición que se muestra cuando se exploran los valores de Importancia (IVI) obtenidos por Juan (2020) para diferentes especies, quien consideró un diámetro igual o superior a 2.5 cm.

De acuerdo con los valores de importancia de las especies de árboles registradas en el PECEF (Tabla 3), *Cupressus lusitanica* registró el valor más alto (26.3%), seguida por *Quercus rugosa* (13.5%), *Quercus laurina* (11.8%) y *Arbutus xalapensis* (10.4%) y, a nivel de género, los valores de importancia relevantes fueron para *Quercus* 36.8% y para *Pinus* 26.5%. En su trabajo sobre la “Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada ...” (México), Sánchez y López (2003) encontraron que los valores de importancia más altos fueron los de *Quercus rugosa*, seguida de *Q. laurina* y *Arbutus xalapensis* para bosques de encino y, para bosques mixtos, los de especies como *Q. laurina*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus pseudostrobus* y *P. leiophylla*. En el mismo estudio (Sánchez y López, 2003) se menciona a nivel de género que sobresalen los valores de importancia de *Quercus* ( $\approx 38\%$ ), seguido de *Cupressus* y *Pinus* con  $\approx 26\%$  cada uno, y *Arbutus* con  $\approx 10\%$ . Para el PECEF, Juan (2020) obtiene valores de importancia semejantes para *Cupressus lusitanica* (20.84%) y *Quercus rugosa* (16.04%) y para el género *Quercus* un valor de 32.7% y *Pinus* 18.36%. Los patrones generales de diversidad e importancia de las especies y géneros registrados en el presente trabajo y los publicados por Sánchez y López (2003) y Juan (2020) coinciden en que *Cupressus lusitanica* y *Q. rugosa* y, para los géneros *Quercus* y *Pinus*, son los de mayor relevancia en la zona.

Tabla 2. Especies de árboles registradas en el presente trabajo

Familia	Especie	Presente trabajo	Chimal et al., 2013.	Cabañas, 2020	Cano-Flores et al., 2020	Juan, 2020
<b>Gimnospermas. División Coniferophyta (Coníferas)</b>						
<b>Cupressaceae</b>	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.	√	√	√	√	√
<b>Pinaceae</b>	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schtdl. & Cham.			√		
	<i>Pinus ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schtdl.	√	√	√		√
	<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schtdl.	√	√	√	√	√
	<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	√	√	√		√
	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schtdl y Cham.	√	√	√	√	√
	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	√	√	√		√
<b>Angiospermas. División Magnoliophyta. Clase Magnoliopsida (Dicotiledóneas)</b>						
<b>Berberidaceae</b>	<i>Berberis moranensis</i> Schult. & Schult. f.		√	√		√
<b>Betulaceae</b>	<i>Alnus jorullensis</i> subsp. <i>jorullensis</i> Kunth		√	√		√
<b>Clethraceae</b>	<i>Clethra mexicana</i> DC.		√	√		
<b>Cornaceae</b>	<i>Cornus disciflora</i> DC.			√		
	<i>Cornus excelsa</i> Kunth		√	√		√
<b>Ericaceae</b>	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	√	√	√	√	√

Fagaceae	<i>Quercus castanea</i> Née	√	√	√		
	<i>Quercus crassipes</i> Humb. y Bonpl.	√	√	√		√
	<i>Quercus laeta</i> Liebm.		√			
	<i>Quercus laurina</i> Bonpl.	√	√	√		√
	<i>Quercus rugosa</i> Née	√	√	√		√
	<i>Quercus</i> spp.				√	
Garryaceae	<i>Garrya laurifolia</i> Hartw. ex Benth.		√	√		√
Myrtaceae	<i>Eucalyptus camaldulencis</i> Dehnh.		√	√		
	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.		√	√		√
Oleaceae	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh		√			
Rhamnaceae	<i>Ceanothus coeruleus</i> Lag.		√	√		√
Rosaceae	<i>Crataegus mexicana</i> DC.		√			√
	<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capulli</i> (Cav.) McVaugh		√	√		√
Salicaceae	<i>Salix paradoxa</i> Kunth		√	√		
Scrophulariaceae (Loganiaceae)	<i>Buddleja cordata</i> Kunth		√	√		
	<i>Buddleja parviflora</i> Kunth		√			
Verbenaceae	<i>Citharexylum affine</i> D. Don.			√		
<b>TOTAL</b>		<b>11</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>18</b>

Cabañas (2020), Cano-Flores *et al.* (2020), Juan (2020) y Chimal *et al.* (2013) para el Parque Estatal Cerro El Faro.

### Densidad y área basal arbórea

Durante el trabajo de campo se registró un total de 141 árboles en las 43 unidades de muestreo (4300 m<sup>2</sup>), con lo que se estima una densidad promedio de 327.9 ind. ha<sup>-1</sup> (±219.6). El valor obtenido es superior al estimado (290 ind ha<sup>-1</sup>) por Cano-Flores *et al.* (2020), quienes en marzo de 2018 realizan un muestreo con una intensidad del 1.6% de la superficie del bosque en el PECEF. Cuando se compara la densidad obtenida en otros bosques tem-

plados del centro del país, por ejemplo, las estimadas por Hernández-Moreno *et al.* (2020) para una zona de la reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, se tiene un valor de 350 ind ha<sup>-1</sup> para un bosque mixto (*Pinus-Quercus*) con manejo (cortas de selección) y un valor de 438 ind ha<sup>-1</sup> para un bosque no manejado o conservado, en los que las especies con mayores valores de importancia fueron *Q. laurina* y *P. pseudostrobus*. Los datos anteriores apoyan lo mencionado por Ordoñez y Galicia (2022), en el sentido que los bosques con manejo, además de la disminución de la riqueza de especies, se caracterizan por tener densidades bajas, condición que pensamos sucede en el PECEF, pero en este caso no por un manejo forestal planeado, sino por incendios, corta ilegal y saneamiento sin un manejo. El área basal arbórea promedio obtenida en el PECEF fue 30.14 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> ( $\pm 0.12$ ). Zacarías-Eslava *et al.* (2011) estiman el área basal para un bosque de *Quercus* y de *Quercus-Pinus* en Michoacán (cerro El Águila), con valores de 24.15 y 60.17 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (DAP  $\geq 2.5$ ), respectivamente, además, mencionan valores de área basal de otros autores que se encuentran entre 23 a 28 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en el norte del país (Nieves-Hernández *et al.*, 2009; Márquez-Linares *et al.*, 1999) y de 56 a 67 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en Chiapas (Ramírez-Marcial *et al.*, 2001). Con base en los intervalos mencionados el valor promedio de área basal obtenido en la presente investigación se ubica entre los valores convencionales.

### **Clases diamétricas y carbono aéreo almacenado**

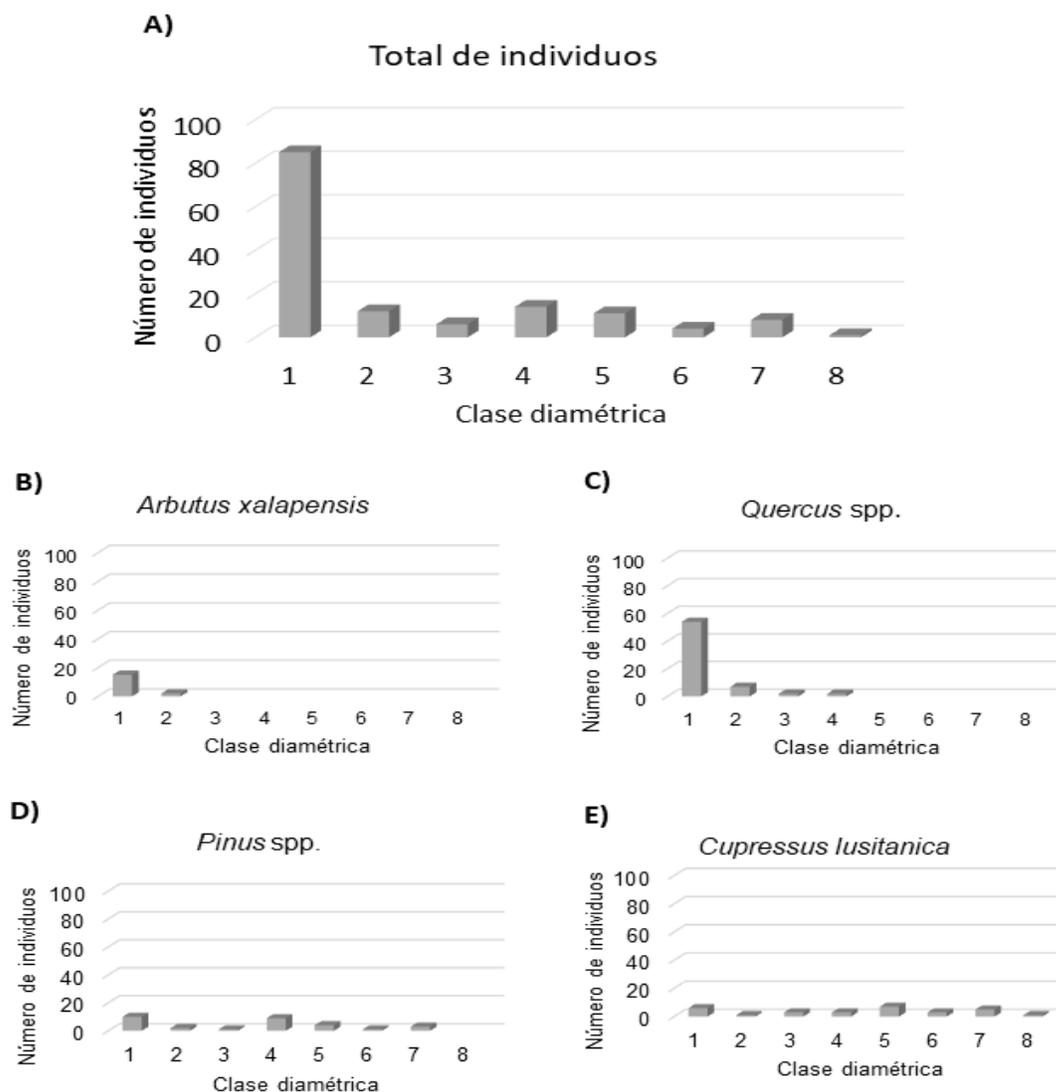
En la Figura 3 se muestra la distribución por clase diamétrica (10 cm) del número total de individuos, por especie y género. Si se considera el total de individuos (Figura 3A), se observa que el 60% de ellos se encuentran en la primera clase diamétrica (10 a 19.9 cm), en cambio, el resto de las clases albergan entre 10 y 1% de los individuos. Estos últimos valores porcentuales exhiben que la disminución hacia las clases superiores no es uniforme, sino algunas de ellas, en este caso las clases cuatro (40.0 – 49.9 cm), cinco (50.0 – 59.9 cm) y siete (70.0 – 79.9 cm), contienen un número importante de los individuos.

Cano-Flores *et al.* (2020) establecen tres grandes clases diamétricas en su trabajo desarrollado en el PECEF, en el cual obtienen los valores de 48.3% de los individuos en la primera clase diamétrica (10 – 30 cm), 38.0% en la segunda (30 – 60 cm) y 13.6% en la tercera (> 60 cm). Con base en las mismas tres clases diamétricas, los valores estimados en la presente investigación presentan diferencias importantes, puesto que para la primera clase se obtuvo un valor de 68.7%, 20 puntos superior al estimado por Cano-Flores *et al.* (2020), en cambio, para la segunda (21.9%) y tercera (9.2%) clases diamétricas, los valores fueron inferiores a los estimados por los mismos autores. Si consideramos

las tres grandes clases mencionadas, el mayor número de individuos se encuentra en la clase inferior, con una disminución hacia las clases de mayor diámetro, sin embargo, si se organizan los datos en clases diamétricas de 10 cm y se observa que los valores en las clases cuatro, cinco y siete, como se mencionó anteriormente, se tiene que la distribución obtenida en el PECEF no es afín a la forma de “J” invertida que comúnmente se observa en este tipo de bosques (Caballero *et al.*, 2022; Manzanilla *et al.*, 2020; Ramírez *et al.*, 2019). La distribución en forma de “J” invertida supondría un bosque irregular maduro (Caballero *et al.*, 2022), con el reemplazo de individuos maduros por individuos jóvenes a lo largo del tiempo y una regeneración adecuada (Manzanilla *et al.*, 2020), patrón que contrasta, como ha sido mencionado, con la distribución obtenida en la presente investigación. Los mismos autores mencionan que este patrón es consecuencia de perturbaciones de origen antrópico, dada la selección de individuos de diámetros particulares, que para el caso del PECEF, las perturbaciones han sido producidas principalmente por la frecuencia de incendios, la extracción de árboles en las acciones de saneamiento para el control de descortezador y, muy probablemente, por la extracción de individuos en el área con diámetros particulares para distintos fines a lo largo del tiempo.

En el caso de la distribución diamétrica de las especies y géneros, *Arbutus xalapensis* y *Quercus* spp. (Figura 3B y 3C, respectivamente) muestran que el mayor número de individuos también se encuentran en la primera clase diamétrica. En el caso de *A. xalapensis* no se registraron individuos con DAP superior a 30 cm, a pesar de que esta especie puede llegar a los 50 cm de diámetro, además, es una especie tolerante al fuego (Juárez, 2011). En este último sentido, Gómez-Mendoza y Rodríguez-Trejo (2021) encontraron para *A. xalapensis* una relación negativa entre el rebrote después de un incendio y el diámetro de los individuos, fenómeno que favorece a los árboles de menor diámetro y el incremento de la abundancia en las clases diamétricas inferiores, en este caso como consecuencia de la frecuencia de incendios en algunas zonas del parque donde se encuentra y domina esta especie. La distribución diamétrica de las coníferas (Figura 3D y 3E) es distinta, ya que se presenta para ambas un mayor número de individuos en la clase diamétrica uno (10.0 a 19.9 cm) y, en la clase cuatro (40.0 a 49.9 cm) para *Pinus* spp. y en la cinco (50.0 a 59.9 cm) y 7 (70.0 a 79.9 cm) para *Cupressus lusitanica*.

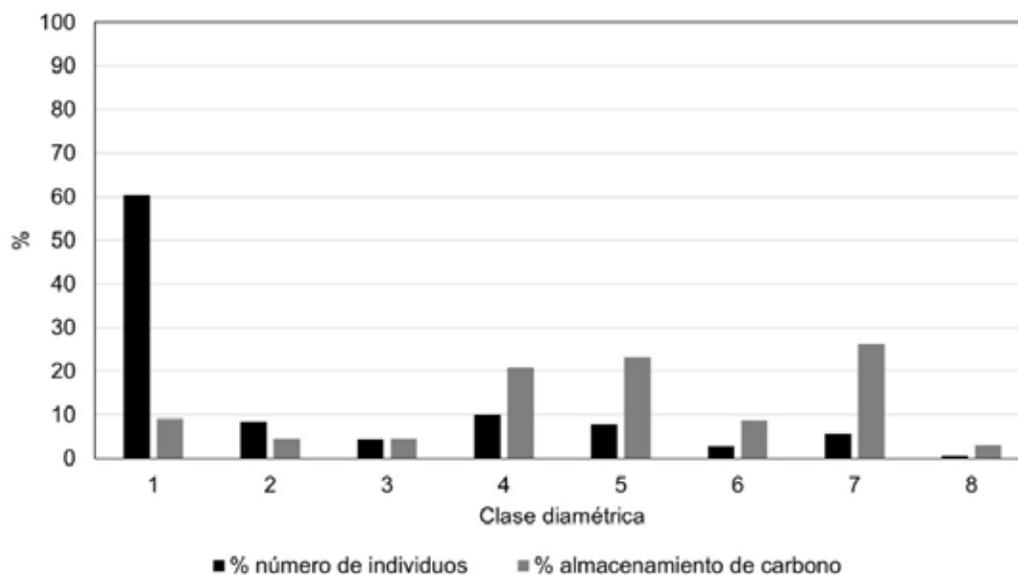
Figura 3. Número total de individuos, por género y/o especie según clase diamétrica



Intervalo de clase diamétrica (cm): (1) 10.0-19.9; (2) 20.0-29.9; (3) 30.0-39.9; (4) 40.0-49.9; (5) 50.0-59.9; (6) 60.0-69.9; (7) 70.0-79.9; (8) 80.0-89.9.

Cuando relacionamos las clases diamétricas con el almacenamiento de carbono (Figura 4), se observa un patrón distinto al que se muestra para el número de individuos, en el sentido que las clases diamétricas de 40.0 a 59.9 cm y de 60 a 79.9 cm almacenan 43.9% y 26.1 del carbono, respectivamente, es decir, 70% del carbono se encuentra en tres de las clases diamétricas medias-superiores y, el 30% restante, está en las clases diamétricas de 20.0 a 39.9 cm y, en la última, con porcentajes entre 3.1 y 9.1 del carbono total en el PECEF. Un patrón semejante fue documentado por Rascon-Solano *et al.* (2022) para un bosque de pino-encino intervenido por última vez hace 26 años, en el cual el mayor almacenamiento de carbono se ubicaba en las clases diamétricas intermedias de 25 a 45 cm.

Figura 4. Porcentaje del número de individuos y de carbón almacenado por clase diamétrica, respecto a los valores totales del muestreo realizado en el PECEF durante el año 2018



Intervalos de clase diamétrica (cm): (1) 10.0-19.9; (2) 20.0-29.9; (3) 30.0-39.9; (4) 40.0-49.9; (5) 50.0-59.9; (6) 60.0-69.9; (7) 70.0-79.9; (8) 80.0-89.9.

### **Almacenamiento de carbono en comunidades vegetales**

Las comunidades vegetales arbóreas reconocidas en el PECEF han sido clasificadas con base en la dominancia de una o dos especies de árboles (Barrales, 2019; Chimal *et al.*, 2013), estas son las comunidades de *Quercus spp.*, *Quercus-Pinus*, *Pinus-Quercus* y *Cupressus-Pinus*. Los valores promedio de carbono obtenidos para las comunidades vegetales se muestran en la Tabla 4, en la cual se observa que la comunidad de *Cupressus-Pinus* obtuvo el valor más alto con  $92.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $\pm 59.4$ ) y la mayor variabilidad, puesto que el valor mínimo fue de  $2.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  y el máximo de  $225.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . En sentido descendente le sigue la comunidad de *Pinus-Quercus* con  $35.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $\pm 39.6$ ), seguida por la comunidad de *Quercus spp.* con  $20.0$  ( $\pm 12.4$ ) y, finalmente con el menor valor, la comunidad de *Quercus-Pinus* con  $5.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $\pm 1.8$ ).

El intervalo de las estimaciones promedio de C almacenado resultante en este trabajo se encuentra entonces, entre  $5.2$  y  $92.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , intervalo que representa un rango de  $87.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  y que contrasta con el intervalo reportado por Cano-Flores *et al.* (2021) para las comunidades vegetales, quienes reportan valores promedio entre  $50.4$  y  $71.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , con un rango de  $21.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Posiblemente las diferencias observadas se deben a la distribución de los sitios de muestreo de una y otra investigación, que resultan en una clasificación diferente de las comunidades vegetales. Aunado a esto, Cano-Flores *et al.* (2021), no consideran sitios de muestreo en la zona de encinares al Este del Parque, que es colindante con la localidad de San Rafael y, en la zona Oeste, donde se obtuvieron los valores más bajos de C.

Los valores de C en las comunidades vegetales del PECEF obtenidos en esta investigación se encuentran en todos los casos por abajo de los estimados para bosques templados de referencia en Norteamérica, cuyo valor promedio es de  $108 \text{ Mg ha}^{-1}$  (GCP, 2021). En el caso de México, los valores de C almacenado en la biomasa aérea de los estratos arbóreos según los tipos de vegetación son variables, por ejemplo, Paz-Pellat *et al.* (2019) mencionan que los bosques templados en el país pueden acumular entre  $29.0$  y  $74.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . En este sentido, las comunidades de *Quercus spp.* y *Quercus - Pinus* se ubican por abajo del intervalo antes mencionado, condición que indica un deterioro que ha sido el resultado de acciones como la extracción de árboles y la frecuencia de incendios, además de su colindancia con las áreas urbanas. Las comunidades que se encuentran dentro del intervalo convencional mencionado por Paz-Pellat *et al.* (2019) son *Cupressus-Pinus* y *Pinus-Quercus*, aunque también han sido afectadas por la extracción de árboles como parte del saneamiento para el control del escarabajo descortezador.

Tabla 4. Valores estimados de carbono arbóreo-aéreo (Mg C ha<sup>-1</sup>) para las comunidades vegetales y áreas administrativas presentes en el PECEF, conforme al muestreo realizado en 2018

Estadísticos	Comunidad Vegetal				Área Administrativa	
	<i>Quercus-Pinus</i> (3.7 ha)	<i>Cupressus-Pinus</i> (12.2 ha)	<i>Pinus-Quercus</i> (11.6 ha)	<i>Quercus</i> spp. (2.6 ha)	Zona de Conservación (24.1 ha)	Zona de Manejo (16.3 ha)
Mínimo	2.7	2.3	2.2	4.2	2.2	2.7
Promedio	5.2	92.8	35.8	20.0	54.3	27.7
Máximo	6.7	225.0	120.1	38.1	225.0	120.1
Desviación Estándar	1.8	59.4	39.6	12.4	61.4	34.9

### Representación cartográfica del carbono arbóreo-aéreo

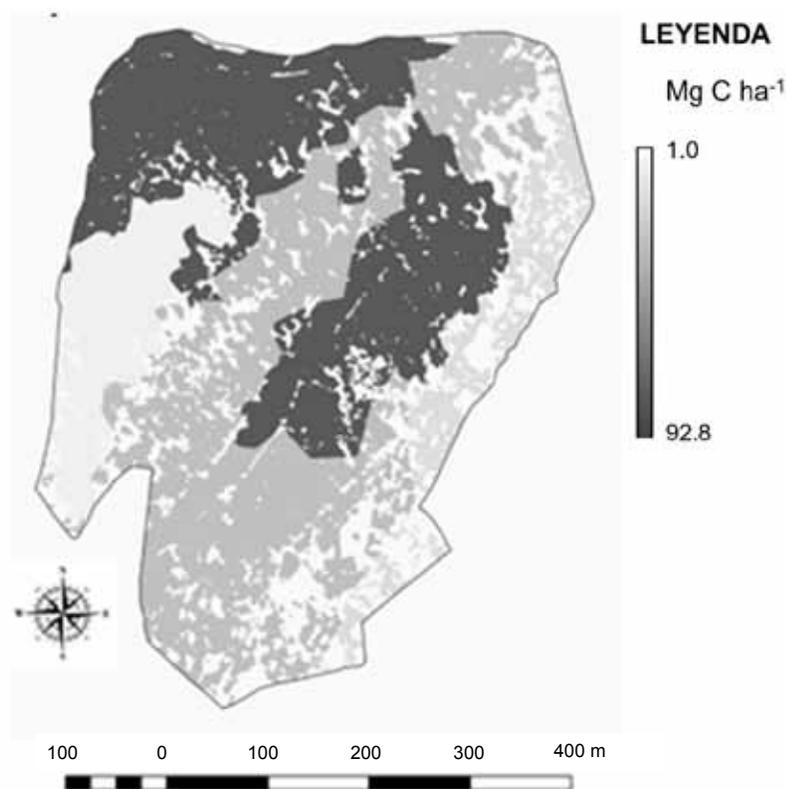
Cuando consideramos al PECEF como una unidad, se tiene que el valor promedio de carbono en la biomasa arbórea aérea es de  $51.9 \pm 54.5$  Mg ha<sup>-1</sup>, con valor mínimo de 2.2 Mg ha<sup>-1</sup> y máximo de 225.0 Mg ha<sup>-1</sup>. En este mismo sentido, Cano-Flores *et al.* (2021) estiman valores semejantes (56.40 Mg C ha<sup>-1</sup>) al de la presente investigación.

De acuerdo con los valores de carbono arbóreo-aéreo estimado en las comunidades vegetales, previamente cartografiadas, los valores promedio más elevados se encuentran en las zonas noroeste y centro del PECEF (Figura 5); que son áreas que corresponden principalmente a las comunidades de *Cupressus-Pinus* y *Pinus-Quercus*. Contrariamente, los valores menores se distribuyen al suroeste, sur y este del Parque, áreas en donde se encuentran las comunidades de *Quercus-Pinus* y *Quercus* spp.

El programa de manejo del PECEF presentado por Moctezuma y González (2007) establece dos zonas administrativas (Figura 1), las cuales almacenan distintas cantidades de C. De esta forma, la “Zona de Conservación” almacena en promedio por hectárea ( $54.3 \pm 61.4$  Mg ha<sup>-1</sup>) aproximadamente dos veces más C que la “Zona de Manejo” ( $27.7 \pm 34.9$  Mg ha<sup>-1</sup>), lo que confirma que las zonas del suroeste, sur y este del PECEF son las que han estado y están sujetas a una mayor presión antrópica y, como consecuencia, han disminuido la capacidad del ANP como sumidero de C.

Con base en los valores estimados, el total de C almacenado en los estratos arbóreos de las comunidades vegetales del PECEF asciende a 1,603.9 Mg, en una superficie de 30.3 ha, puesto que esta es la extensión que ocupan las comunidades arbóreas; el resto de la superficie en el PECEF es ocupada por casas, suelo descubierto y por comunidades arbustivas y herbáceas, que si bien, estas últimas también contribuyen al almacenamiento de C, lo hacen en menor cantidad, como lo menciona Pérez (2011), quien a partir de datos obtenidos en bosques templados del cerro del Tláloc, en la Sierra Nevada, estima que las comunidades arbustivas y herbáceas almacenan en promedio  $1.55 \pm 1.73 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . En síntesis, las coberturas carentes de vegetación en el PECEF ocupan aproximadamente 5% del área, lo que ha significado una pérdida de 539.5 MgC, situación que no abona al cumplimiento de los objetivos del Parque.

Figura 5. Carbono arbóreo-aéreo promedio estimado ( $\text{MgC ha}^{-1}$ ) en el Parque Estatal Cerro



## CONCLUSIONES

Vega-López (2009) han mencionado que el valor de las áreas naturales protegidas radica en su capacidad para generar servicios ecosistémicos de diverso tipo, entre ellos el almacenamiento de C. Para ello, es necesario establecer una línea base que permita conocer su estado y que permita que los encargados de la administración del ANP tengan información objetiva para la mejor gestión y seguimiento de las acciones de manejo.

Entre los principales aportes del presente trabajo para contribuir al establecimiento de una línea base se encuentran que:

- La composición de especies de árboles del PECEF y sus valores de importancia son parecidos a los reportados para los bosques templados de la región;
- Los valores de densidad de árboles son semejantes a otros estudios realizados en el PECEF y a los de bosques con manejo forestal, sin embargo, son inferiores a los valores reportados para bosques conservados o sin manejo forestal. En cuanto al área basal los resultados muestran que las cifras se ubican dentro del intervalo comúnmente reportado para bosques mixtos de pino-encino y encino-pino;
- La distribución de clases diamétricas de los árboles en el PECEF no se apega a la forma común de "J" invertida, principalmente para el caso de las coníferas, puesto que los individuos de este grupo se encuentran en las clases intermedias y superiores, condición que implica un escaso reemplazo de individuos maduros e insuficiente regeneración. Este mismo patrón abona a que 80% del C almacenado en la parte aérea de los árboles en el PECEF se encuentre en individuos con un DAP superior a los 40 cm.
- El valor promedio de C estimado en la parte arbórea-aérea en el PECEF fue de  $51.9 \pm 54.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , con un total de C almacenado de 1603.9 Mg. en las 30.3 ha arboladas del área. Sin embargo, el valor total de carbono almacenado es un poco más al mencionado, debido a la contribución de las comunidades herbáceas y arbustivas que ocupan una superficie del 4% en el Parque;
- En cuanto a las estimaciones de carbono almacenado en la parte aérea de los árboles, se encontró que están por debajo de los valores de referencia para bosques templados de Norte América aunque parecidos con los de los bosques degradados y manejados. En cambio, cuando se comparan con los valores reportados para México, las comunidades vegetales de *Cupressus-Pinus* y *Pinus-Quercus* se encuentran entre los valores comunes de almacenamiento y, las comunidades de *Quercus-Pinus* y *Quercus* spp. por debajo de ellos. Además, la distribución del almacenamiento

de carbono mostró que las comunidades vegetales con los valores mas bajos son las que están en colindancia con las áreas urbanas, que a la vez, han sido las más afectadas debido a la frecuencia de incendios y extracción de árboles, resultado esto último del saneamiento forestal, así, las zonas con menor cantidad de C se encuentran al suroeste, sur y este del Parque;

- La distribución de C en las zonas administrativas establecidas en el programa de manejo del PECEF, muestra que la Zona de Conservación almacena en promedio dos veces más C por unidad de área que la Zona de Manejo, lo que implica que esta última área presenta un mayor deterioro y, tendría que ser prioritaria para disminuir las amenazas sobre el bosque y para la ejecución de programas de restauración ambiental.

## AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al personal del Centro para la Sustentabilidad Incalli Ixcahuicopa, Centli por todo el apoyo brindado en la logística del estudio y a los guardabosques del Parque Estatal Cerro El Faro por su apoyo en el trabajo de campo. De igual forma a todos los estudiantes de la Licenciatura en Biología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco que han participado en alguna etapa del estudio y al maestro Iván Roldán por proporcionar el mapa de uso del suelo y vegetación del Parque Estatal Cerro El Faro, Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar H. L., García M. R., Gómez M. A. y Martínez G. O., 2016, Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). pp. 529-530. In: Magdaleno-Villar, J. J., Martínez-Solís, J., Magaña-Lira N. y López R. M. (eds.). *Memoria del IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. Universidad Autónoma Chapingo, 20 al 22 de abril de 2016. Chapingo, Estado de México, México.
- Aguirre C. O. A. y Jiménez P. J., 2011, Evaluación del Contenido de Carbono en Bosques del Sur de Nuevo León, *Rev. Mex. Cienc. For.*, 2: 73-84.
- Barrales O. S., 2019, *Caracterización de las asociaciones vegetales de invierno, en el Parque Estatal "Cerro El Faro", Tlalmanalco de Velázquez, Edo. de México*, Servicio Social Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. México.
- Benjamin J. A. y Masera O., 2001, "Captura de carbono ante el cambio climático", *Madera y Bosques*, 7(1): 3-12.
- Bezaury C. J. E., 2009, *El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos*, The Nature Conservancy Programa México - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- Bolaños G. Y., Bolaños G. M. A., Paz P. F. y Ponce P., J. I., 2017, "Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México", *Terra Latinoamericana*, 35: 73-86.
- Caballero C. P., Treviño G. E. J., Mata B. J. M., Alanís R. E., Yerena Y. J. I. y Cuéllar R. L. G., 2022, "Análisis de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados en la ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México", *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(71): 76-102.
- Cabañas M. A., 2020, *Diversidad arbórea y arbustiva de tres temporadas en el Parque Estatal Cerro El Faro, municipio de Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México*, Servicio social Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México.
- Canadell J. G., Monteiro P. M. S, Costa M. H., Cotrim da Cunha L., Cox P. M., Eliseev A. V., Henson S., Ishii M., Jaccard S., Koven C., Lohila A., Patra P. K., Piao S., Rogelj J., Syampungani S., Zaehle S. y Zickfeld K., 2021, "Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks". En Masson D. V., Zha P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. y Zhou B., (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of*

- Working Group to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cano F. O., Vela C. G., Acevedo S. O. A. y Valera P. M. Á., 2020, "Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México", *Terra Latinoamericana*, 38(4): 895-905.
- Cartus O., Kellndorfer J., Walker W., Franco C., Bishop J., Santos L. y Fuentes J. M. M., 2014, "A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico", *Remote sensing*, 6(6): 5559-5588.
- Ceballos G., List R., Garduño G., López C. E., Muñozcaño Q. M. J., Collado E., San Román J. E. (Comp.), 2009. *La diversidad biológica del Estado de México: estudio de estado*. Gobierno del Estado de México.
- CEPANAF (Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna), 2023, Ubicación de Áreas Naturales Protegidas. Consultado 2/IX/2023, disponible en: [https://cepanaf.edomex.gob.mx/ubicacion\\_areas\\_naturales\\_protegidas](https://cepanaf.edomex.gob.mx/ubicacion_areas_naturales_protegidas).
- Chimal A., González M. y Hernández C., 2013, *La flora vascular del Parque Estatal "El Faro", Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México*, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Xochimilco, México.
- CONANP, 2023, Listado de las Áreas Naturales Protegidas de México, disponible en: <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/listanp/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), s/f, "CNA-SMN Red de Estaciones Climatológicas. Estación 15106. San Rafael. Normales 1951-2010", disponible en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>, consultado el 7/01/2021, Fecha última actualización s/f.
- Conafor (Comisión Nacional Forestal), 2018, *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2009-2014*, Presidencia de la República, Zapopan, Jal., México, 200 p.
- De Jong B. H., Masera O. y Hernández T. T., 2004, "Opciones de captura de carbono en el sector forestal", en Fernandez, A., Martinez, J., y Osnaya, P., (eds.), *Cambio Climático: una Visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología, Mexico.
- De Jong B. H., Paz P. F., Rojas G. F., Aryal D. R., Masera C. O., Martínez B. R. D., Salas A. V., Casiano D. M., Covalada O. S., Etchevers B. J. D., Velázquez R. A. y Vargas R., 2019, "Capítulo 19: Bosques y selvas", en Paz P. F., Hernández A. J. M., Sosa Á. R. y Velázquez R. A. S., (eds.), *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*, Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México.
- Eastman J. R., 2012, *IDRISI Selva - Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*, Clark Labs, Clark University, Ellenberg, D. y Mueller D. D., 1974, *Aims and methods of vegetation ecology*. New York, Wiley, USA.

- GCP, 2021, "Global Carbon Project", disponible en <https://www.globalcarbonproject.org/index.htm>
- Gobierno del Estado de México, 2003, Declaratoria del ejecutivo del estado por la que se establecen las áreas naturales protegidas con categoría de parque estatal "CERRO EL FARO" Y "CERRO DE LOS MONOS", en el municipio de Tlalmanalco, Estado de México. Gaceta del Gobierno. *Periódico oficial del Gobierno del Estado de México*. Toluca de Lerdo, Mex., viernes 8 de agosto del 2003. No. 29.
- Gómez M. F. F. y Rodríguez T. D. A., 2021, "Fuego, mortalidad y rebrotación en especies forestales de la Sierra Norte de Puebla", *Madera y bosques*, 27(3): 1-15.
- Hernández M. J. A., Velázquez M. A., Fierros G. A. M., Gómez G. A., Reyes H. V. J. y Vera C. J. A. G., 2020, "Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca", *Madera y Bosques*, 26(1): 1-17.
- INEGI, 2005, "Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Serie III", DGG-INEGI, México, disponible en <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks3gw.html>, consultado 19/06/2022.
- IPCC, 2003, "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Reporting Instructions, Intergovernmental Panel on Climate Change", Geneve, Switzerland, 294 p.
- IPCC, 2021, "Intergovernmental Panel on Climate Change", disponible en <https://www.ipcc.ch/>, consultado 2/12/2021.
- IPCC, 2023, "Intergovernmental Panel on Climate Change", disponible en <https://www.ipcc.ch/>, consultado 18/09/2023.
- Juárez B. J. E., 2011, *Tolerancia al fuego en árboles del bosque de encino-pino de Chignahuapan, Puebla*, tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Kurz W. A., Birdsey R. A., Mascorro V. S., Greenberg D., Dai Z., Olguin M. y Colditz R., 2016, *Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear, registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canada.
- Leon C. E., Guzmán M. M. y Sánchez R. J., 2019, *Diversidad de las aves en el Parque Estatal Cerro El Faro: Un área protegida entre la urbanización y conservación*, XVII Congreso para el estudio y conservación de las aves en México, Mérida, Yucatán, México.
- Manzanilla Q. G. E., Mata B. J. M., Treviño G. E. J., Aguirre C. Ó. A., Alanís R. E. y Yerena Y. J. I., 2020, "Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León", *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(61):94-123.

- Márquez L. M. A., González E. S. y Álvarez Z. R., 1999, "Componentes de la diversidad arbórea de pino-encino de Durango, México", *Madera y Bosques*, 5:67- 78.
- Masera O., Ordoñez M. J. y Dirzo R., 1997, "Carbon emissions from Mexican forest current situation and long term scenarios", *Clim. Changes*, 35: 265-295.
- Mendoza M. A., 2022, *Mamíferos grandes y medianos y su contribución a los servicios ecosistémicos en el Parque Estatal "Cerro El Faro", Tlalmanalco de Velázquez, Estado de México*. Servicio social, Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, México.
- Moctezuma B. P. y González M. I., (Coords.), 2009, *Programa de conservación y manejo del área natural protegida con categoría de parque estatal "Cerro el Faro" y "Cerro de los Monos"*, Línea Forestal y de Biodiversidad, CENTLI-PISN, México.
- Montes A. D., Cortes M. M. y Roldán A. I. E., 2019, *Diversidad de mamíferos medianos y grandes en el Parque Estatal Cerro El Faro, Estado de México*, IX Simposio de Investigación del Parque Nacional Iztacihuatl-Popocatepetl, Políticas públicas y riesgo Ambiental, México.
- Moreno B. R., Talavera G. K., Rivera M. S. y Hernández R. N., 2019, Evaluación de la situación actual de las Áreas Naturales Protegidas del Estado de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 21(2):113-129.
- NASA, 2021, "Global Climate Change. NASA's Jet Propulsion Laboratory", disponible en <https://climate.nasa.gov/>, consultado 2/12/2021.
- Nieves H. G., Vázquez G. J. A., Vargas R. Y. L., Vázquez G. M. y González G. J., 2009, "Small-scale environmental gradients in a pine-oak forest community in Nueva Colonia, Mezquitic, Jalisco, Mexico". *Polibotánica*, 27:31-52.
- Ordoñez M. y Galicia L., 2022, "El surgimiento de nuevos ecosistemas en los bosques templados implicaciones en la estructura, funcionamiento y provisión de servicios ambientales", *Ciencias*, 137-138: 66-72.
- Orozco H. M. E., Míreles L. P., Valdez P. M. E. y Valdés C. A. C., 2013, "Cubiertas forestales y escenarios de Carbono en el Estado de México, 2002-2010", *Revista Geográfica de América Central*, 2(51):169-188.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Hough Mg. R., Kauppi P. E., Kurz W. A. y Hayes D., 2011, "A large and persistent carbon sink in the world's forests", *Science*, 333(6045):988-993.
- Paz P. F., Hernández A. J. M., Sosa Á. R. y Velázquez R. A. S., (eds.), 2019, *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*, Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México.

- Paz P. F., Romero B. V. M., Argumedo E. J. A., Bolaños G. M., de Jong B., de la Cruz C., J. C. y Velázquez R. A., 2019, "Dinámica del uso del suelo y vegetación", en Paz P. F., Hernández A. J. M., Sosa Á. R. y Velázquez R. A. S., (eds.), *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*, Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México.
- Pérez M. R. V., 2011, *Contenido de carbono en ecosistemas del cerro Tláloc, Texcoco, México*, Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México.
- Pérez R. S., Ramírez M. I., Jaramillo L. P. F. y Bautista, F., 2013, "Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México". *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1):157-173.
- Ramírez M. N., González E. M. y Williams L. G., 2001, "Anthropogenic disturbance and tree diversity in montane rain forests in Chiapas, Mexico", *Forest Ecology and Management*, 154:311-326.
- Rascón S. J., Galván M. V. S., Aguirre C. O. A. y García G. S. A., 2022, "Caracterización estructural y carbono almacenado en un bosque templado frío censado en el noroeste de México" *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(70):136-165.
- Romahn de la Vega C. F., Ramírez M. H. y Treviño G. J. L., 1994, *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Ruiz D. C., Rodríguez O. G., Leyva L. J. C. y Enríquez Del Valle, J. R., 2014, "Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México". *Natur. Desar*, 12:28-45.
- Sánchez A. y López L., 2003, "Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal", *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 74(1):47-71.
- Vega L. E., 2009, "Importancia económica de las áreas naturales protegidas como sumideros de carbono en México", *Economía informa*, 360:114-120.
- Zacarías E. I. E., Cornejo-Tenorio, G., Cortés-Flores, J., González-Castañeda N. y Ibarra-Manríquez G., 2011, "Composición, estructura y diversidad del cerro El Águila, Michoacán, México", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82: 854-869.
- Zamora M. E., Huerta A. H., Maqueo O. P., Badillo G. B. y Bernal S. I., 2016, Cambio global: el Antropoceno, *CIENCIA ergo-sum*, 23(1): 67-75.