



Estimation of carbon stocks in forests of Durango, Mexico, using two sampling protocols

Estimación de los almacenes de carbono en bosques de Durango, México, mediante dos protocolos de muestreo

Jesús A. Soto Cervantes¹; José J. Corral-Rivas²;
Jaime R. Padilla-Martínez^{3,4}; Benedicto Vargas-Larreta^{1*}

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Tecnológico 101, col. La Forestal. C. P. 34942. Durango, México.

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Río Papaloapan y bulevar Durango s/n, col. Valle del Sur. C. P. 34120. Durango, México.

³Northwest German Forest Research Institute, Department of Forest Growth. Grätzelstraße 2. 37079. Göttingen, Germany.

⁴University of Göttingen, Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology, Department of Forest Economics and Sustainable Land-Use Planning. Büsgenweg 1, 37077. Göttingen, Germany.

*Corresponding author: bvargas@itelsalto.edu.mx; tel.: + 52 (675) 105 65 68

Abstract

Introduction. Accuracy in carbon quantification is essential to ensure the traceability of forest projects that contribute to the reduction of greenhouse gas emissions.

Objective. To compare the estimated carbon content through two sampling protocols.

Materials and methods. The study was conducted in three ejidos in the municipality of Pueblo Nuevo, Durango. Data from the Forest Protocol for Mexico (PFM) v3.0 of the Climate Action Reserve (CAR) were used, comprising 1 356 plots with an area of 400 m² for mature trees (diameter at breast height \geq 30 cm) and 100 m² for small trees (diameter at breast height from 7.5 to 29.9 cm); the sampling intensity was 0.43 %. Additionally, data from 6 615 plots of 1 000 m² from the Forest Management Inventory (FMI) were used, with a sampling intensity of 4.64 %

Results and discussion. Significant differences ($P < 0.001$) were found in carbon estimates between sampling protocols. On average, 53.56 Mg·ha⁻¹ were estimated with the PFM sampling method, and 43.80 Mg·ha⁻¹ with the FMI method in the three ejidos. The PFM scheme showed a coefficient of variation of 60 %, whereas the FMI presented 49 %. Moreover, the sampling error was 2.99 % for PFM and 0.93 % for FMI.

Conclusions. Combining both sampling approaches could optimize inventory costs, while providing robust data suitable for both forest management planning and the development of carbon credit projects.

Keywords: aboveground biomass, carbon credits, Forest management inventory, Forest Protocol for Mexico, Climate Action Reserve.

Resumen

Introducción. La precisión en la cuantificación del carbono es importante para el aseguramiento de la trazabilidad de los proyectos forestales que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Objetivo. Contrastar el contenido de carbono estimado mediante dos protocolos de muestreo.

Materiales y métodos. El estudio se realizó en tres ejidos del municipio de Pueblo Nuevo, Durango. Se usaron datos del Protocolo Forestal para México (PFM) v3.0 de la Reserva de Acción Climática (CAR) provenientes de 1 356 sitios con tamaño de 400 m² para arbolado adulto (diámetro normal \geq 30 cm) y 100 m² para arbolado pequeño (diámetro normal de 7.5 a 29.9 cm); la intensidad de muestreo fue 0.43 %. También se usaron datos de 6 615 sitios de 1 000 m² del inventario de manejo forestal (IMF) con intensidad de muestreo de 4.64 %.

Resultados y discusión. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.001$) en la estimación de carbono entre esquemas de muestreo. En promedio, se estimaron 53.56 Mg·ha⁻¹ para el muestreo del PFM y 43.80 Mg·ha⁻¹ para el IMF en los tres ejidos. El esquema del PFM presentó coeficiente de variación de 60 % y el IMF 49 %. Asimismo, el error de muestreo fue 2.99 % para el PFM y 0.93 % para el IMF.

Conclusiones. La integración de ambos esquemas de muestreo podría optimizar los costos de inventario. De esta forma, serían igualmente útiles para la elaboración de programas de manejo forestal y para el desarrollo de proyectos de bonos de carbono.

Palabras clave: biomasa aérea, bonos de carbono, inventario de manejo forestal, Protocolo Forestal para México, Reserva de Acción Climática.

Please cite this article as follows (APA 7): Soto Cervantes, J. A., Corral-Rivas, J. J., Padilla-Martínez, J. R., & Vargas-Larreta, B. (2025). Estimation of carbon stocks in forests of Durango, Mexico, using two sampling protocols. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24048. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.10.048>



Introduction

Mexico is considered one of the main emitters of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere (Climate Transparency, 2022), despite having approximately 64 million hectares of temperate forests and tropical rainforests, which represent about 32 % of its territory (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022), deforestation and land degradation are among the leading global sources of greenhouse gas (GHG) emissions, contributing between 10 % and 20 % of the total – equivalent to 4 to 6 Gt of CO₂ per year. In Mexico, approximately 30 % of national GHG emissions are attributed to the agriculture, livestock, and forestry sectors (Zamora-Morales et al., 2018). These activities are the second-largest source of emissions after fossil fuel combustion (Sapkota et al., 2022).

Carbon credits are a global management tool aimed at reducing CO₂ emissions, while providing companies with a mechanism to offset their emissions through the implementation of projects focused on the conservation of forests, soils, and water (Cruz-Aviña et al., 2022; Ranero & Covalada, 2018). A carbon credit is a commercial certificate that represents the prevention or removal of one metric ton of carbon dioxide from the atmosphere. These certificates are used as financial instruments in carbon markets. In 2020, the sale of carbon credits generated revenues of 53 billion (MXN); however, the COVID-19 pandemic led to an increase in GHG emissions, causing imbalances in the market (Estrada-Chavira, 2022). The effectiveness of carbon credits depends on reliable measurement methodologies that require detailed examination and documentation processes. These procedures are essential to ensure data authenticity and to demonstrate the positive impact of projects on climate change mitigation (Estrada-Chavira, 2022). For this reason, accurate quantification of biomass and carbon has emerged as a critical research topic for the development of carbon credit projects.

Biomass estimation is essential to determine carbon storage potential (Rincón-Ruíz et al., 2014; Sáenz et al., 2021). To estimate it, allometric equations have been developed based on easily measurable tree attributes such as diameter at breast height and total height (Eker et al., 2017). These equations are derived from the application of destructive sampling and regression techniques (Fonseca et al., 2013; Montes de Oca-Cano et al., 2011; Quiñonez-Barraza et al., 2019). In this context, sampling is a key component in forest inventories, as it allows the estimation of population attributes without assessing each individual tree. Sample representativeness is crucial for the validity of results,

Introducción

México es considerado uno de los principales emisores de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Climate Transparency, 2022), a pesar de que el país cuenta con aproximadamente 64 millones de hectáreas de bosques de clima templado y selvas (32 % de su territorio; Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). De acuerdo con la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022), la deforestación y la degradación del suelo representan una de las principales fuentes de emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo entre el 10 % y el 20 % del total (entre 4 y 6 Gt de CO₂ por año). En México, cerca del 30 % de las emisiones nacionales de GEI se atribuyen a los sectores agrícola, pecuario y forestal (Zamora-Morales et al., 2018). Estas actividades son la segunda fuente de emisiones después de la quema de combustibles fósiles (Sapkota et al., 2022).

Los bonos de carbono son una herramienta global de gestión destinada a la reducción de emisiones de CO₂ que, a su vez, ofrecen a las empresas un mecanismo para compensar sus emisiones mediante la implementación de proyectos enfocados en la conservación de bosques, suelos y agua (Cruz-Aviña et al., 2022; Ranero & Covalada, 2018). Un crédito (bono) de carbono es un documento comercial (certificado) que representa la prevención o eliminación de una tonelada de dióxido de carbono de la atmósfera. Estos certificados se utilizan como instrumentos financieros en los mercados de carbono. En 2020, la venta de bonos generó una recaudación de 53 000 millones de pesos (MXN); no obstante, la pandemia de COVID-19 provocó aumento en las emisiones de GEI, situación que generó desequilibrios en el mercado (Estrada-Chavira, 2022). La efectividad de los bonos depende de metodologías confiables de medición que requieren procesos rigurosos de verificación y documentación. Estos procedimientos son esenciales para garantizar la autenticidad de los datos y demostrar el impacto positivo de los proyectos en la mitigación del cambio climático (Estrada-Chavira, 2022). Por ello, la precisión en la cuantificación de la biomasa y carbono ha emergido como un tópico de investigación necesario para la formulación de proyectos de créditos de carbono.

La estimación de la biomasa es necesaria para determinar el potencial de almacenamiento de carbono (Rincón-Ruíz et al., 2014; Sáenz et al., 2021). Para estimarla se han generado ecuaciones alométricas en función de atributos del árbol que son fácilmente medibles como el diámetro normal y la altura total (Eker et al., 2017); dichas ecuaciones se derivan de la aplicación de muestreos destructivos y del uso de técnicas de regresión (Fonseca et al., 2013; Montes de Oca-Cano et al., 2011; Quiñonez-Barraza et al., 2019). En este sentido, el muestreo es un componente esencial en

as inadequate sampling design introduces biases and lead to misinterpretation (Barrios et al., 2024).

The Forest Management Inventory (FMI) is important for decision-making in the development of management plans and the quantification of volume stocks. Given its relevance in the formulation of management strategies, it is necessary for the inventory to be conducted with high levels of precision while optimizing time and costs. In this context, the inventory design is based on establishing temporary plots, with the quantity estimated to reach the required precision level for volume stock measurements by minimizing the variance among sampling sites (Corral-Rivas et al., 2015).

Regarding forest carbon projects, comparing the sampling schemes of the Forest Protocol for Mexico (PFM) and the Forest Management Inventory (FMI) is essential for evaluating the precision and reliability of carbon content estimates. Analyzing their differences allows for the identification of potential biases, improves data quality, and ensures that the applied methodology estimates carbon stocks with greater accuracy.

The PFM of the Climate Action Reserve (CAR) was specifically developed to estimate the carbon sequestration, storage, and emission capacity of the country's forests (González-Cásares et al., 2019; Patiño et al., 2018; Pompa-García & Sigala-Rodríguez, 2017) and it plays a crucial role in the sustainable management of forest resources, because it is considered a additional component to the production-oriented forest management program. The protocol's design involves the establishment of permanent plots, with their number proportional to the activity areas of the carbon project. Furthermore, the PFM defines standardized methods for measuring and monitoring carbon stocks and sequestration, ensuring that GHG removals generated by the projects are quantified in a consistent, transparent, and accurate manner.

The objective of this study was to compare the estimates of stored carbon in the forests of three ejidos in the state of Durango, Mexico, using two sampling protocols: the Forest Protocol for Mexico (PFM) developed by the Climate Action Reserve (CAR), and the Forest Management Inventory (FMI). The study discusses the potential use of these two data sources in the development of carbon credit projects and compares aboveground carbon estimates obtained through both protocols. The initial hypothesis suggested that, although statistically significant differences would arise between the carbon estimates produced by the two sampling protocols, both could be effectively integrated for use in forest management planning

los inventarios forestales, ya que permite la estimación de las características de una población sin evaluar cada uno de sus individuos. La representatividad de la muestra es clave en la validez de los resultados, pues un diseño inadecuado introduce sesgos y conduce a interpretaciones erróneas (Barrios et al., 2024).

El inventario con fines de manejo forestal (IMF) es importante para la toma de decisiones en la elaboración de planes y la cuantificación de existencias volumétricas. Dada su relevancia en el desarrollo de estrategias de manejo, es necesario que el inventario se realice con niveles altos de precisión y con optimización de tiempo y costos. En este contexto, el diseño del inventario se basa en el establecimiento de sitios temporales, cuya cantidad se estima para alcanzar el nivel de precisión requerido en términos de existencias volumétricas, al reducir la varianza entre sitios de muestreo (Corral-Rivas et al., 2015).

En el ámbito de los proyectos forestales de carbono, la comparación entre los esquemas de muestreo del Protocolo Forestal para México (PFM) y del IMF es fundamental para evaluar la precisión y confiabilidad de las estimaciones del contenido de carbono. El análisis de sus diferencias permite la identificación de posibles sesgos, mejora la calidad de los datos y asegura que la metodología aplicada estime los reservorios de carbono con mayor exactitud.

El PFM de la Reserva de Acción Climática (CAR) fue desarrollado específicamente para estimar la capacidad de secuestro, almacenamiento y emisión de CO₂ de los bosques del país (González-Cásares et al., 2019; Patiño et al., 2018; Pompa-García & Sigala-Rodríguez, 2017) y es crucial en la gestión sostenible de los recursos forestales, ya que se considera un componente adicional al programa de manejo con fines de producción. El diseño implica el establecimiento de sitios permanentes con un número proporcional a las áreas de actividad del proyecto de carbono. Asimismo, el PFM establece métodos estandarizados para la medición y monitoreo de los almacenes y la captura de carbono, asegurando que las remociones de GEI generadas por los proyectos se cuantifiquen de manera consistente, transparente y precisa.

El objetivo de este estudio fue contrastar las estimaciones del carbono almacenado en los bosques de tres ejidos del estado de Durango, México, a partir de dos protocolos de muestreo: el Protocolo Forestal para México (PFM) de CAR y el inventario con fines de manejo forestal (IMF). El estudio discute el uso potencial de estas dos fuentes de información en el desarrollo de proyectos de bonos de carbono y compara las estimaciones del carbono aéreo con ambos protocolos. La hipótesis de partida fue que existen diferencias estadísticamente significativas en las

and carbon credit project development, offering a technically sound and cost-efficient approach.

Materials and Methods

Study area location

The study was conducted in the ejidos Chavarría Viejo, La Cueva y Anexos, and El Brillante, located in the municipality of Pueblo Nuevo, Durango (Figure 1). These forests are managed under the Silvicultural Development Method (MDS) and the Mexican Method for the Management of Irregular Forests (MMOBI) (Lira-Tuero et al., 2019).

Study area

The predominant climate is temperate with summer rainfall (C_w) (García, 2004), with an average annual temperature ranging from 12 to 18 °C and an average annual precipitation of 1300 mm. The rainy season occurs from June to September, with the first frosts typically occurring in October and the last occurring in June (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010). Vegetation is characterized by mixed conifer and broadleaf forests. The main pine species

estimaciones de carbono entre esquemas de muestreo, pero que pueden ser utilizados de manera combinada tanto para la elaboración de programas de manejo forestal como para proyectos de bonos de carbono, de tal forma que sean costo-beneficio viables.

Materiales y métodos

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en los ejidos Chavarría Viejo, La Cueva y Anexos, y El Brillante del municipio de Pueblo Nuevo, Durango (Figura 1). Sus bosques están bajo manejo con el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) (Lira-Tuero et al., 2019).

Área de estudio

El clima predominante es templado con lluvias en verano (C_w) (García, 2004) con temperatura media anual que oscila entre 12 y 18 °C y precipitación media anual de 1300 mm. El régimen de lluvias abarca de junio a septiembre con las primeras heladas en octubre y las últimas en junio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010). La vegetación se caracteriza

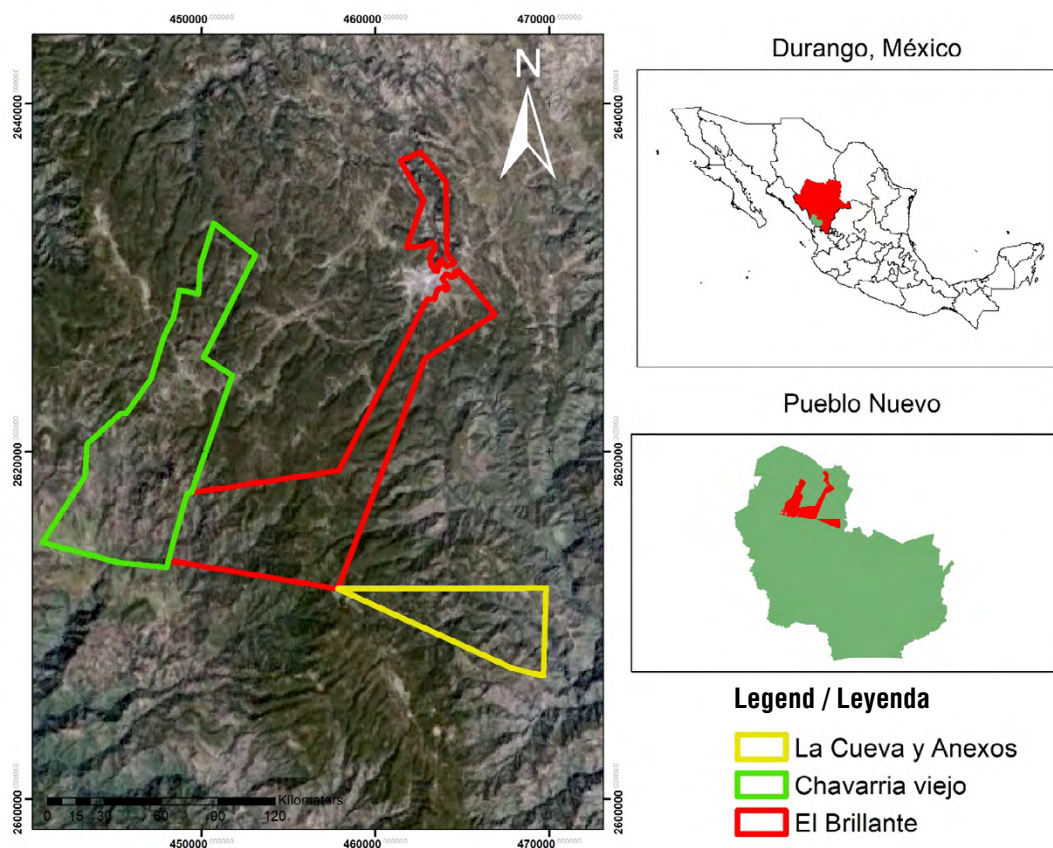


Figure 1. Study area location in the national, state, and municipal context.

Figura 1. Localización de área de estudio en el contexto nacional, estatal y municipal.

are *Pinus cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. engelmannii* Carr., *P. teocote* Schiede ex Schltdl., *P. herrerae* Martínez, *P. leiophylla* Schl. & Cham., and *P. strobiformis* Engelm. The most representative oak species are *Quercus sideroxylo* Bonpl. and *Q. rugosa* Née. In addition, other tree and shrub species from the genera *Juniperus*, *Arbutus*, and *Alnus* are also present (González-Elizondo et al., 2012).

Data collected using the Forest Protocol for Mexico v3.0 (PFM)

In each ejido, sampling plots were established (1 356 in total) in accordance with the PFM of the Climate Action Reserve (CAR). This sampling scheme uses two plot sizes: one of 400 m² (radius = 11.28 m) for measuring large trees (diameter at breast height [DBH] ≥ 30 cm; height [h] ≥ 3 m), and another of 100 m² (radius = 5.64 m) for small trees (5 ≤ DBH < 30 cm). To ensure comparability between sampling protocols and considering that the minimum recordable diameter in the Forest Management Inventory is 7.5 cm, only trees with DBH ≥ 7.5 cm were included in the analysis.

At each sampling plot, general data were recorded, including date, plot number, latitude, longitude, slope, and aspect, using a GPS device. Detailed tree-level information was also collected, including species, DBH, and h, measured with a diameter tape and a Suunto® analog clinometer. Additionally, tree vigor was assessed and categorized as 'high or moderately vigorous', and radial growth (mm) over the past five years was measured. Data for the PFM plots were collected in 2022.

Data from the Forest Management Inventory (FMI)

The FMIs were conducted in 2015, and the data were obtained from the Temperate Forest Planning System platform (SiPlaFor; CONAFOR, 2023). This inventory uses fixed-size circular plots (1000 m²) randomly established across all areas of the ejidos with timber forest harvesting activities.

Data were collected from 6615 sampling plots distributed across the three ejidos. In each plot, general information such as plot number, coordinates, slope, and aspect were recorded using GPS and a Suunto® analog clinometer. Additionally, dendrometric data for commercial trees (DBH ≥ 7.5 cm) were collected, including species, dominance, DBH, total height, and crown height (hc, m). The latter variables were measured using calipers and a clinometer. Radial growth (mm) was also recorded by extracting increment cores from one dominant, one intermediate, and one suppressed tree.

por bosques mixtos de coníferas y latifoliadas. Las principales especies de pino son *Pinus cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. engelmannii* Carr., *P. teocote* Schiede ex Schltdl., *P. herrerae* Martínez, *P. leiophylla* Schl. & Cham. y *P. strobiformis* Engelm. Las especies de encino más representativas son *Quercus sideroxylo* Bonpl. y *Q. rugosa* Née. Además, existen otras especies arbóreas y arbustivas de los géneros *Juniperus*, *Arbutus* y *Alnus* (González-Elizondo et al., 2012).

Datos colectados con el Protocolo Forestal para México v3.0 (PFM)

En cada ejido se instalaron sitios de muestreo (1 356 en total) de acuerdo con el PFM de CAR. Este esquema de muestreo emplea dos tamaños de sitio: uno de 400 m² (radio = 11.28 m) para medir árboles grandes (diámetro normal [dap] ≥ 30 cm; altura [h] ≥ 3 m) y otro de 100 m² (radio = 5.64 m) para árboles pequeños (5 ≤ dap < 30 cm). Para asegurar la comparabilidad entre esquemas de muestreo y dado que el diámetro mínimo registrable en el IMF es 7.5 cm, en el análisis solo se incluyeron los árboles con dap ≥ 7.5 cm.

En cada sitio de muestreo se registraron datos generales como fecha, número de sitio, latitud, longitud, pendiente y exposición, mediante GPS. También se recopiló información detallada de los árboles, incluyendo especie, dap y h medidos con cinta diamétrica y clinómetro análogo tipo Suunto®. Adicionalmente, se determinó el vigor del árbol calificado como 'alto o moderadamente vigoroso' y se midió el incremento radial (mm) de los últimos cinco años. La información de los sitios del PFM se recolectó en el año 2022.

Datos del Inventario de Manejo Forestal (IMF)

Los IMF se realizaron en el año 2015 y los datos se obtuvieron de la plataforma del Sistema de Planeación Forestal para Bosques Templados (SiPlaFor; CONAFOR, 2023). Este inventario utiliza sitios circulares de tamaño fijo (1000 m²) establecidos aleatoriamente en todas las áreas de los ejidos con aprovechamiento forestal maderable.

Se recopiló información de 6615 sitios de muestreo distribuidos en los tres ejidos. En cada sitio se registraron datos generales como número de sitio, coordenadas, pendiente y exposición medidos con GPS y clinómetro análogo tipo Suunto®; así como información dasométrica del arbolado comercial (dap ≥ 7.5 cm), incluyendo especie, dominancia, dap, h y altura de copa (hc, m). Estas últimas variables se midieron con forcípula y clinómetro. También se registró el incremento radial (mm) mediante la extracción de virutas de un árbol dominante, uno intermedio y uno suprimido.

Biomass and carbon estimation

Aboveground biomass was estimated for both sampling schemes using the CALCBOSK equations, a tool that integrates equations compiled by the Climate Action Reserve for use in PFM v3.0. Carbon content by species was determined based on carbon proportions reported by Vargas-Larreta et al. (2017). These estimates were calculated at the tree, plot, and hectare levels in order to compare the results from both sampling schemes. Additionally, the biomass of the main species in the region (*Pinus*, *Quercus*, *Juniperus*, and *Arbutus*) was compared using both the CALCBOSK equations and those developed by Vargas-Larreta et al. (2017). The latter were specifically generated to estimate biomass for the most important forest species in temperate forests located in the northwestern region of Mexico.

Statistical Analysis

First, the Shapiro-Wilk test ($P \geq 0.05$) was applied to assess the normality of carbon estimates obtained from both sampling schemes. Since the normality assumption was not met ($P < 0.05$), the non-parametric Kruskal-Wallis test was used to analyze the existence of significant differences between the sampling schemes and biomass equations. The precision of the carbon estimates was determined using the coefficient of variation (CV) and the sampling error.

To strengthen the statistical robustness of the comparison between sampling schemes, the bootstrap resampling method was employed to estimate the mean, standard deviation, and confidence intervals of the carbon estimates. This approach involves generating multiple subsets of data through random sampling with replacement, allowing the same plot to be selected more than once within a single subset. The bootstrap means, which approximate a normal distribution, were used to calculate the sample confidence intervals. Following recommendations from authors such as Lee-Ing et al. (2012) for evaluating variability and uncertainty in estimates, each plot was resampled 1000 times. All statistical analyses were conducted using R[®] 4.3.1 (R Core Team, 2023).

Results

Table 1 shows the number of plots used per ejido for carbon assessment, as well as the sampling intensity and estimated carbon content ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) obtained with both sampling schemes. In all three ejidos, the number of plots and sampling intensity in the FMI were higher than those in the PFM. Regarding carbon estimates, the PFM yielded an average of $53.56 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ for the three ejidos, whereas the FMI produced $43.80 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, representing a difference of $9.76 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ between the two sampling schemes.

Estimación de biomasa y carbono

La biomasa aérea se estimó para ambos esquemas de muestreo utilizando las ecuaciones de CALCBOSK, una herramienta que integra ecuaciones compiladas por CAR para su uso en el PFM v3.0. El contenido de carbono por especie se determinó a partir de las proporciones de carbono reportadas por Vargas-Larreta et al. (2017). Estas estimaciones se realizaron a nivel de árbol, sitio y hectárea, con el fin de comparar los resultados de los dos esquemas de muestreo. Adicionalmente, se contrastó la biomasa de las principales especies de la región (*Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*), calculada tanto con las ecuaciones del CALCBOSK como con las ecuaciones de Vargas-Larreta et al. (2017). Estas últimas fueron desarrolladas específicamente para estimar la biomasa de las especies forestales más importantes de los bosques templados en el noroeste de México.

Análisis estadístico

En un primer paso se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks ($P \geq 0.05$) para evaluar la normalidad de las estimaciones de carbono obtenidas con ambos esquemas de muestreo. Al no cumplirse el supuesto de normalidad ($P < 0.05$), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para analizar la existencia de diferencias significativas entre los esquemas de muestreo y las ecuaciones de biomasa. La precisión de las estimaciones de carbono se determinó mediante el coeficiente de variación (CV) y el error de muestreo.

Con el fin de reforzar la solidez estadística de la comparación entre esquemas de muestreo, se empleó el método de remuestreo *bootstrap* para estimar el promedio, la desviación estándar y los intervalos de confianza de las estimaciones de carbono. Este enfoque consiste en la generación de múltiples subconjuntos de datos mediante selección aleatoria con reemplazo, el cual permite que un mismo sitio pueda ser seleccionado más de una vez en un mismo subconjunto. Los promedios obtenidos mediante *bootstrap*, al ajustarse a una distribución normal, se utilizaron para el cálculo de los intervalos de confianza de la muestra. Con base en la recomendación de autores como Lee-Ing et al. (2012) para evaluar la variabilidad e incertidumbre de las estimaciones, cada sitio se remuestreó 1000 veces. Los análisis estadísticos se realizaron en el entorno de programación R[®] 4.3.1 (R Core Team, 2023).

Resultados

El Cuadro 1 presenta el número de sitios utilizados por ejido para la evaluación de carbono, así como la intensidad de muestreo y el contenido de carbono ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) estimado con ambos esquemas de muestreo. En los tres ejidos, el número de sitios y la intensidad de muestreo en el IMF fue mayor que el del PFM. En

Table 1. Carbon estimates per ejido using the sampling schemes of the Forest Protocol for Mexico (PFM) from the Climate Action Reserve (CAR) and the Forest Management Inventory (FMI).

Cuadro 1. Estimaciones de carbono por ejido con los esquemas de muestreo del Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) e inventario de manejo forestal (IMF).

Ejido	Area (ha) / Superficie (ha)	Plots / Sitios		Sampling intensity (%) / Intensidad de muestreo (%)		Carbon (Mg·ha ⁻¹) / Carbono (Mg·ha ⁻¹)	
		PFM-CAR	FMI/IMF	PFM-CAR	FMI/IMF	PFM-CAR	FMI/IMF
Chavarría Viejo	5 772.93	413	2 865	0.29	4.96	57.05	49.75
La Cueva y Anexos	2 056.31	349	1 080	0.68	5.25	52.50	42.13
El Brillante	7 220.67	594	2 670	0.33	3.70	51.13	39.53
Promedio	5 016.64	452	2 205	0.43	4.64	53.56	43.80

Table 2. Precision of carbon estimates based on the coefficient of variation (CV) and sampling error in the Forest Protocol for Mexico (PFM) from the Climate Action Reserve (CAR) and the Forest Management Inventory (FMI) sampling schemes.

Cuadro 2. Precisión de las estimaciones de carbono a través del uso del coeficiente de variación (CV) y error de muestreo en los esquemas del Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) y del inventario de manejo forestal (IMF).

Ejido	Sampling / Muestreo	Average (Mg·ha ⁻¹) / Promedio (Mg·ha ⁻¹)	Variance (Mg·ha ⁻¹) / Varianza (Mg·ha ⁻¹)	Standard deviation	CV	Sampling
				(Mg·ha ⁻¹) / Desviación estándar (Mg·ha ⁻¹)		error (%) / Error de muestreo (%)
Chavarría Viejo	PFM-CAR	57.05	1 031.92	32.12	0.56	3.10
	IMF	49.75	506.93	22.52	0.45	0.82
La Cueva y Anexos	PFM-CAR	52.50	880.06	29.67	0.57	3.11
	IMF	42.13	343.85	18.54	0.44	1.11
El Brillante	PFM-CAR	51.13	1 171.39	34.23	0.67	2.75
	IMF	39.53	519.09	22.78	0.58	0.86
Promedio	PFM-CAR	53.56	1 027.79	32.01	0.60	2.99
	IMF	43.80	456.62	21.28	0.49	0.93

Table 2 presents the precision indicators for both sampling schemes in estimating carbon for the three ejidos. On average, the PFM showed a coefficient of variation of 60 %, while the FMI recorded 49 %. Similarly, the average sampling error was 2.99 % for the PFM and 0.93 % for the FMI, reflecting lower variability and, consequently, higher precision in the latter.

On the other hand, Table 3 shows the results of the Kruskal-Wallis test applied to the carbon estimates; the analysis indicates statistically significant differences ($P < 0.001$) between the two sampling schemes for the three ejidos.

According to Table 4, the average carbon estimates obtained through bootstrap resampling analysis were 53.54 Mg·ha⁻¹ for the PFM scheme and 43.81 Mg·ha⁻¹ for the FMI for the three ejidos. The standard deviation was 1.49 Mg·ha⁻¹ for the PFM and 0.49 Mg·ha⁻¹ for the FMI, indicating lower variability in the latter's estimates. The

cuanto a las estimaciones de carbono, el PFM arrojó un promedio de 53.56 Mg·ha⁻¹ para los tres ejidos, mientras que con el IMF se obtuvieron 43.80 Mg·ha⁻¹, lo que representa una diferencia de 9.76 Mg·ha⁻¹ entre ambos esquemas de muestreo.

El Cuadro 2 presenta los indicadores de precisión de ambos esquemas de muestreo para la estimación del carbono de los tres ejidos. En promedio, el PFM mostró un coeficiente de variación del 60 %, mientras que el IMF registró 49 %. De manera similar, el error de muestreo promedio fue 2.99 % en el PFM y 0.93 % en el IMF, lo que refleja menor variabilidad y, por tanto, mayor precisión en este último.

Por otra parte, el Cuadro 3 muestra los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis aplicada a las estimaciones de carbono; el análisis indica diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.001$) entre ambos esquemas en los tres ejidos.

Table 3. Kruskal-Wallis test for carbon estimates using the sampling schemes of the Forest Protocol for Mexico (PFM) from the Climate Action Reserve (CAR) and the Forest Management Inventory (FMI) by ejido.

Cuadro 3. Prueba de Kruskal-Wallis para las estimaciones de carbono con los esquemas de muestreo del Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) y del inventario de manejo forestal (IMF) por ejido.

Comparison/ Comparación	Ejido	P-value < 0.001
PFM CAR-FMI/ PFM CAR-IMF	Chavarría Viejo	1.42E-05
PFM CAR-FMI/ PFM CAR-IMF	La Cueva y Anexos	1.14E-10
PFM CAR-FMI/ PFM CAR-IMF	El Brillante	2.91E-15

Table 4. Carbon estimates using the bootstrap resampling technique in the sampling schemes of the Forest Protocol for Mexico (PFM) of the Climate Action Reserve (CAR) and the Forest Management Inventory (FMI).

Cuadro 4. Estimaciones de carbono con la técnica de remuestreo *bootstrap* en los esquemas de muestreo del Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) y del inventario de manejo forestal (IMF).

Ejido	Sampling/ Muestreo	Bootstrap average (Mg·ha ⁻¹)/ Promedio <i>bootstrap</i> (Mg·ha ⁻¹)	Standard deviation (Mg·ha ⁻¹)/ Desviación estándar (Mg·ha ⁻¹)	Confidence intervals (Mg·ha ⁻¹)/ Intervalos de confianza (Mg·ha ⁻¹)
Chavarría Viejo	PFM-CAR	57.00	1.56	52.94-61.11
	FMI/IMF	49.75	0.43	48.71-50.82
La Cueva y Anexos	PFM-CAR	52.52	1.58	48.34-56.60
	FMI/IMF	42.15	0.58	40.67-43.62
El Brillante	PFM-CAR	51.11	1.34	47.47-54.71
	FMI/IMF	39.54	0.46	38.42-40.62
Average/ Promedio	PFM-CAR	53.54	1.49	49.58-57.47
	FMI/IMF	43.81	0.49	42.30-45.02

95 % confidence intervals were 49.58–57.47 Mg·ha⁻¹ for the PFM and 42.30–45.02 Mg·ha⁻¹ for the FMI.

Figure 2 shows the comparison of tree-level biomass estimates using equations from CALCBOSK and those developed by Vargas-Larreta et al. (2017) for the main *Pinus* species. In general, the equations by Vargas-Larreta et al. (2017) yielded significantly higher estimates ($P < 0.01$), except for *Pinus leiophylla*, *P. teocote*, and *P. strobiformis*. On the other hand, Figure 3 presents the tree-level aboveground biomass estimates for species of *Quercus*, *Juniperus*, and *Arbutus* obtained using both sets of equations. In contrast to the observations made for *Pinus* species, in this case, the CALCBOSK equations produced significantly higher biomass values ($P < 0.01$), except for *Quercus durifolia* Seemen.

Discussion

Carbon storage in forest ecosystems is determined by various factors, including management practices, stand age, and the structure and composition of the vegetation (Galván-Moreno et al., 2024; Medrano Meraz et al., 2017). In this study, the highest carbon stocks were recorded in *Pinus* species, reflecting the dominant

De acuerdo con el Cuadro 4, las estimaciones promedio de carbono, obtenidas mediante el análisis de remuestreo *Bootstrap*, ascendieron a 53.54 Mg·ha⁻¹ para el esquema del PFM y 43.81 Mg·ha⁻¹ para el IMF en los tres ejidos. La desviación estándar fue 1.49 Mg·ha⁻¹ en el PFM y 0.49 Mg·ha⁻¹ en el IMF, lo que evidencia menor variabilidad en las estimaciones de este último. Los intervalos de confianza al 95 % fueron 49.58-57.47 Mg·ha⁻¹ para el PFM y 42.30-45.02 Mg·ha⁻¹ para el IMF.

La Figura 2 muestra la comparación de biomasa estimada a nivel de árbol mediante las ecuaciones de la herramienta CALCBOSK y las desarrolladas por Vargas-Larreta et al. (2017), para las principales especies del género *Pinus*. En general, las ecuaciones de Vargas-Larreta et al. (2017) arrojaron estimaciones significativamente mayores ($P < 0.01$), con excepción de *Pinus leiophylla*, *P. teocote* y *P. strobiformis*. Por otro lado, la Figura 3 presenta las estimaciones de biomasa aérea a nivel de árbol para especies de *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*, obtenidas con ambos tipos de ecuaciones. A diferencia de lo observado en las especies de *Pinus*, en este caso las ecuaciones del CALCBOSK generaron valores de biomasa significativamente mayores ($P < 0.01$), excepto para *Quercus durifolia* Seemen.

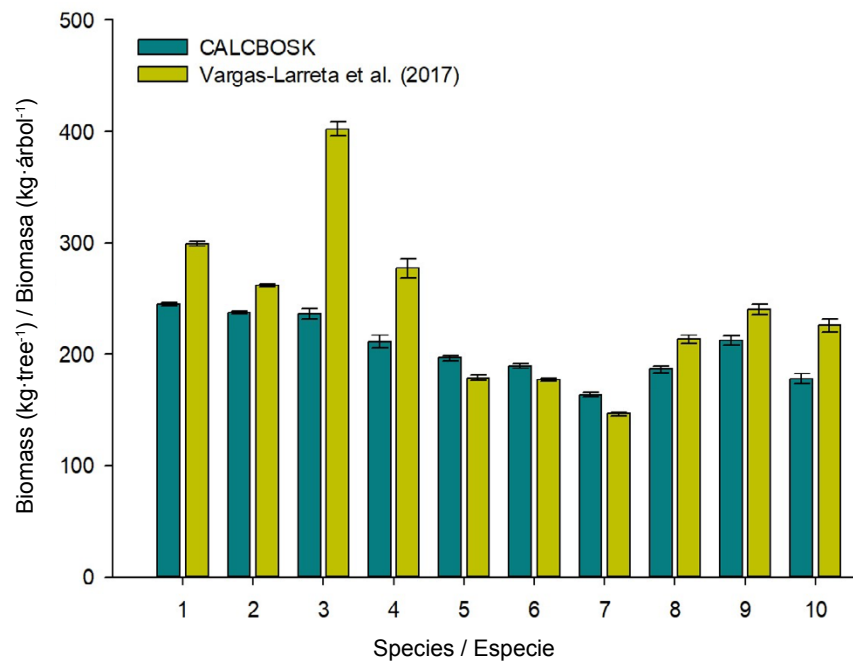


Figure 2. Mean values (bars) and standard error (whiskers) of the biomass estimated for the main species of the genus *Pinus*, using the equations from CALCBOSK and Vargas-Larreta et al. (2017). 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *Pinus durangensis*, 3 = *Pinus engelmannii*, 4 = *Pinus herrerae*, 5 = *Pinus leiophylla*, 6 = *Pinus teocote*, 7 = *Pinus strobiformis*, 8 = *Pinus lumholtzii*, 9 = *Pinus douglasiana*, 10 = *Pinus oocarpa*.

Figura 2. Valores promedio (barras) y error estándar (bigotes) de la biomasa estimada en las principales especies del género *Pinus* con las ecuaciones del CALCBOSK y de Vargas-Larreta et al. (2017). 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *Pinus durangensis*, 3 = *Pinus engelmannii*, 4 = *Pinus herrerae*, 5 = *Pinus leiophylla*, 6 = *Pinus teocote*, 7 = *Pinus strobiformis*, 8 = *Pinus lumholtzii*, 9 = *Pinus douglasiana*, 10 = *Pinus oocarpa*.

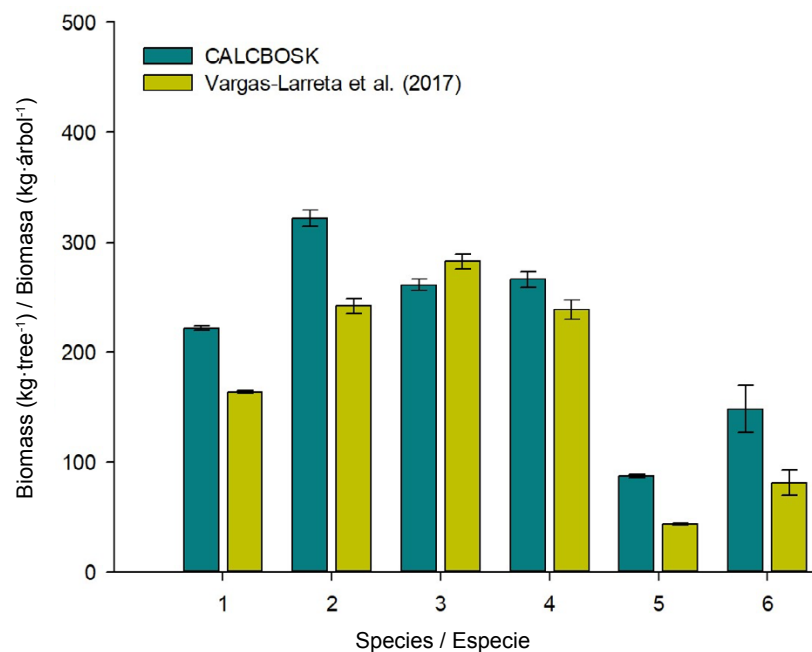


Figure 3. Mean values (bars) and standard error (whiskers) of the estimated biomass for the main species of *Quercus*, *Juniperus*, and *Arbutus*, using the equations from CALCBOSK and Vargas-Larreta et al. (2017). 1 = *Quercus sideroxylla*, 2 = *Quercus rugosa*, 3 = *Quercus durifolia*, 4 = *Quercus crassifolia*, 5 = *Juniperus deppeana*, 6 = *Arbutus bicolor*.

Figura 3. Valores promedio (barras) y error estándar (bigotes) de la biomasa estimada en las principales especies de *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus* con las ecuaciones del CALCBOSK y Vargas-Larreta et al. (2017). 1 = *Quercus sideroxylla*, 2 = *Quercus rugosa*, 3 = *Quercus durifolia*, 4 = *Quercus crassifolia*, 5 = *Juniperus deppeana*, 6 = *Arbutus bicolor*.

composition of the forest by this genus. This result is consistent with the findings of Silva-Flores et al. (2014), who emphasized that *Pinus* species represent the main carbon reservoirs in the temperate forests of the Sierra Madre Occidental.

The carbon values obtained using the PFM v3.0 sampling scheme are consistent with those reported by Pimienta et al. (2007), who estimated 51.12 Mg·ha⁻¹ in the ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. Similarly, they agree with the results of Vargas-Larreta et al. (2017), who reported values ranging from 5.12 to 232.94 Mg·ha⁻¹, with an average of 63.80 Mg·ha⁻¹ for the temperate forests of Durango. Likewise, Graciano-Ávila et al. (2019) estimated a total biomass of 130.28 Mg·ha⁻¹ and an aboveground carbon content of 65.14 Mg·ha⁻¹ for tree species in the same region. Unlike this study, where carbon concentration by species was determined through laboratory analysis (Vargas-Larreta et al., 2017), the aforementioned authors applied a fixed conversion factor of 0.50 to estimate the carbon content in *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus*, and *Arbutus* species. Additionally, the results are comparable to those reported by López-Serrano et al. (2019, 2021) for forests in the same region, which further validates the findings of this study

Avery and Burkhart (2015), as well as Alberdi et al. (2016), emphasize that an efficient forest inventory, both statistically and operationally, must include a sufficient number of sampling units to achieve the required level of precision. According to the CAR's PFM v3.0, the expected sampling error for a forest carbon project should be ± 5 % of the mean at a 90 % confidence level, depending on the number of strata defined in the project's activity area. In this study, the PFM sampling scheme showed a sampling error of 2.99 %, confirming that it meets the established precision level.

CONAFOR (2015), through SiPlaFor, establishes that the sampling error must not exceed 10 % at a 95 % confidence level to obtain acceptable results and comply with current forestry regulations, specifically NOM-152-SEMARNAT-2023 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023). To meet this criterion, a sampling intensity greater than 3 % is recommended. In this regard, the FMI scheme achieved a sampling intensity of 4.64 % (Table 1) and an average relative sampling error of 0.93 % (Table 2), which is below the limit established by NOM-152 (SEMARNAT, 2023) for the estimation of volume stocks in forest management programs. These results ensure compliance with the required regulatory standards.

The results agree with those reported by Corral-Rivas et al. (2016), who argue that it is possible to reduce sampling intensity in management-oriented inventories in Mexico, particularly on properties

Discusión

El almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales está determinado por diversos factores, entre ellos el tipo de manejo, la edad del rodal, la estructura y la composición de la vegetación (Galván-Moreno et al., 2024; Medrano Meraz et al., 2017). En este estudio, las mayores reservas de carbono se registraron en especies de *Pinus*, lo cual refleja la composición dominante del bosque por este género. Tal resultado es consistente con lo reportado por Silva-Flores et al. (2014), quienes destacan que las especies de *Pinus* representan los principales reservorios de carbono de los bosques templados de la Sierra Madre Occidental.

Los valores de carbono obtenidos mediante el esquema de muestreo del PFM v3.0 son consistentes con los señalados por Pimienta et al. (2007), quienes estimaron 51.12 Mg·ha⁻¹ en el ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. Asimismo, coinciden con los resultados de Vargas-Larreta et al. (2017), quienes reportaron valores de 5.12 a 232.94 Mg·ha⁻¹ y promedio de 63.80 Mg·ha⁻¹ para los bosques templados de Durango. De igual forma, Graciano-Ávila et al. (2019) estimaron una biomasa total de 130.28 Mg·ha⁻¹ y contenido de carbono aéreo de 65.14 Mg·ha⁻¹ en especies arbóreas de la misma región. A diferencia del presente estudio, en el que la concentración de carbono por especie fue determinada en laboratorio (Vargas-Larreta et al., 2017), los autores mencionados utilizaron un factor de conversión fijo de 0.50 para calcular el contenido de carbono en especies de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*. Los resultados también son comparables con los obtenidos por López-Serrano et al. (2019, 2021) en bosques de la misma región, lo que refuerza la validez de las estimaciones del presente estudio.

Avery y Burkhart (2015), así como Alberdi et al. (2016), destacan que un inventario forestal eficiente, tanto en términos estadísticos como operativos, debe incluir un número suficiente de unidades de muestreo para alcanzar el nivel de precisión requerido. De acuerdo con el PFM v3.0 de la CAR, el error de muestreo esperado para un proyecto forestal de carbono debe ser ± 5 % del promedio con un nivel de confianza de 90 %, dependiendo del número de estratos definidos en el área de actividad del proyecto; en este estudio, el esquema de muestreo del PFM tuvo error de muestreo de 2.99 %, lo que confirma que cumple con el nivel de precisión establecido.

Por su parte, la CONAFOR (2015), a través del SiPlaFor, establece que el error de muestreo no debe exceder de 10 % con un nivel de confianza del 95 % para obtener resultados aceptables y cumplir con la normatividad forestal vigente, en este caso, la NOM-152-SEMARNAT-2023 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023). Para alcanzar este criterio se recomienda que la intensidad de muestreo

larger than 2000 ha, without compromising data quality. According to these authors, a reduction of up to 50 % in sampling intensity could be achieved while maintaining adequate levels of precision in volume estimates. This reduction would not only help optimize the time and costs involved in conducting inventories but also maintain the accuracy of volume estimates essential for sustainable forest management.

The significant difference observed in biomass and carbon estimates between the two sampling schemes can be largely attributed to the difference in sampling intensity (0.43 % in the PFM and 4.64 % in the FMI), as greater sampling effort helps reduce variability and uncertainty in the estimates (McRoberts et al., 2013). However, additional factors such as differences in plot size and the timing of the inventories may also explain the observed discrepancies in the estimates (Navarro Cerrillo et al., 2024; Roque et al., 2023).

The variability of carbon estimates in relation to sampling intensity was evaluated using the bootstrap resampling technique. This tool is widely recognized for its utility in statistical inference, because it provides a data-driven approach to estimate the uncertainty associated with a population distribution (Quiñonez-Barraza, 2024). According to Egbert and Plonsky (2021), the bootstrap method enables the quantification of the precision of sample estimates and is particularly effective when dealing with small sample sizes or with data that follow unknown or non-normal distributions. Additionally, it has been proposed as a valid method for assessing data homogeneity, validating statistical results, and supporting randomized decision-making processes in forestry contexts.

In this study, biomass estimates for species of the genus *Pinus* were significantly higher when using the equations developed by Vargas-Larreta et al. (2017), compared to those generated by the CALC BOSK tool, except for *P. leiophylla*, *P. teocote*, and *P. strobiformis*. In contrast, biomass estimates for the genera *Quercus*, *Juniperus*, and *Arbutus* were higher when using the CALC BOSK equations, except for *Q. durifolia*. These differences reflect variations arising from the use of different sampling schemes and support the observations of authors such as Rahman et al. (2021), who emphasize the importance of selecting appropriate allometric models to minimize uncertainty in aboveground biomass estimates. They also caution that applying equations outside the data range for which they were developed can introduce significant errors into the results.

Conclusions

The sampling schemes showed significant differences in carbon estimates for the three ejidos, with the Forest Protocol for Mexico (PFM) v3.0 of the Climate Action

sea superior al 3 %. En este sentido, el esquema del IMF alcanzó intensidad de muestreo de 4.64 % (Cuadro 1) y error de muestreo relativo promedio de 0.93 % (Cuadro 2), el cual se encuentra por debajo del límite establecido en la NOM-152 (SEMARNAT, 2023) para la estimación de existencias volumétricas en programas de manejo forestal. Estos resultados garantizan el cumplimiento de los estándares normativos requeridos.

Los resultados coinciden con lo señalado por Corral-Rivas et al. (2016), quienes argumentan que es posible reducir la intensidad de muestreo en los inventarios con fines de manejo en México, particularmente en predios con superficies mayores de 2000 ha, sin comprometer la calidad de la información. Según estos autores, podría lograrse una reducción de hasta 50 % en la intensidad de muestreo, manteniendo niveles adecuados de precisión en las estimaciones volumétricas. Esta reducción no solo facilitaría la optimización de los tiempos y costos asociados con la realización de los inventarios, sino que también mantendría la precisión de las estimaciones volumétricas necesarias para un manejo forestal sostenible.

La diferencia significativa observada en las estimaciones de biomasa y carbono entre los dos esquemas de muestreo puede atribuirse, en gran medida, a la diferencia en la intensidad de muestreo (0.43 % en el PFM y 4.64 % en el IMF), ya que un mayor esfuerzo de muestreo contribuye a reducir la variabilidad e incertidumbre en las estimaciones (McRoberts et al., 2013). Sin embargo, factores adicionales como las diferencias en el tamaño de los sitios y la temporalidad de los inventarios también podrían explicar las diferencias observadas en las estimaciones (Navarro Cerrillo et al., 2024; Roque et al., 2023).

La variabilidad de las estimaciones de carbono en función de la intensidad de muestreo se evaluó con la técnica de remuestreo *bootstrap*. Esta herramienta es ampliamente reconocida por su utilidad en la inferencia estadística, ya que ofrece un enfoque basado en datos para estimar la incertidumbre asociada a la distribución de una población (Quiñonez-Barraza, 2024). De acuerdo con Egbert y Plonsky (2021), el *bootstrap* permite cuantificar la precisión de las estimaciones muestrales, siendo especialmente eficaz en contextos con tamaños reducidos de muestra o distribuciones desconocidas o no normales; asimismo, ha sido propuesto como un método válido para la evaluación de la homogeneidad de los datos, validación de resultados estadísticos y el apoyo de procesos de decisión aleatoria en contextos forestales.

En esta investigación, las estimaciones de biomasa de especies del género *Pinus* fueron significativamente mayores cuando se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Vargas-Larreta et al. (2017), en comparación con las generadas por la herramienta CALC BOSK, con excepción de *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. strobiformis*. En contraste, las estimaciones de biomasa de

Reserve (CAR) producing the highest values. However, this scheme also exhibited greater coefficients of variation and sampling errors compared to those obtained with the forest management inventory. The differences between the equations developed by Vargas-Larreta et al. (2017) and those implemented in the CALCBOSK tool highlight the need for further research aimed at evaluating biases and precision in baseline estimation for forest carbon projects, especially those implemented under the CAR's PFM. Combining both sampling schemes could offer an efficient alternative for optimizing inventory costs by leveraging their strengths and facilitating their application in timber management programs and forest carbon projects.

Acknowledgments

The authors thank the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) for the scholarship granted to the first author (CVU 561802) under the "Postdoctoral Fellowships in Mexico 2022 (1)" call. They also thank the representatives of the ejidos and Ing. Germánico Galicia García for providing information from the inventories conducted using both sampling protocols.

Conflict of Interest Declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

References / Referencias

- Alberdi, I., Sandoval, V., Condes, S., Cañellas, I., & Vallejo, R. (2016). El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas*, 25(3), 88-97. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.10>
- Avery, T. E., & Burkhardt, H. E. (2015). *Forest measurements*. Waveland Press, Inc.
- Barrios, R. J., Reyes, M., Escalona, R. Y., Falcón, E., Trigueros, I. Y., & Gabriel-Hernández, M. (2024). Estrategias de muestreo para el inventario de combustibles forestales en un bosque de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. *Scientia Agricola Vita*, 1(2), 1-11. <https://doi.org/10.29105/agricolis.v1i2.15>
- Climate Transparency. (2022). *Climate transparency report 2022: Mexico. Iniciativa climática de México*. <https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2023/01/CT2022-Mexico-Web.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2015). *Sistema de planeación forestal para bosques templados. Manual de usuario versión 2.0*. http://siplafor.cnf.gob.mx/siplafor/archivos/manual/Manual_del_usuario_SPF.pdf

los géneros *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus* resultaron mayores con el uso de las ecuaciones de CALCBOSK, excepto para *Q. durifolia*. Estas diferencias reflejan las variaciones derivadas del uso de esquemas diferentes de muestreo y respaldan lo señalado por autores como Rahman et al. (2021), quienes enfatizan la importancia de la selección de modelos alométricos adecuados para minimizar la incertidumbre en las estimaciones de biomasa aérea. Además, advierten que el uso de ecuaciones fuera del rango de datos con los que fueron desarrolladas puede introducir errores significativos en los resultados.

Conclusiones

Los esquemas de muestreo mostraron diferencias significativas en las estimaciones de carbono en los tres ejidos, siendo el Protocolo Forestal para México (PFM) v3.0 de la Reserva de Acción Climática (CAR) el que generó los valores más altos. Sin embargo, este esquema presentó coeficiente de variación y error de muestreo mayores que los obtenidos con el inventario de manejo forestal. Las diferencias entre las ecuaciones de Vargas-Larreta et al. (2017) y las implementadas en la herramienta CALCBOSK destacan la necesidad de investigaciones orientadas a evaluar sesgos y precisión en la estimación de la línea base de proyectos forestales de carbono, especialmente aquellos implementados bajo el PFM de CAR. La combinación de ambos esquemas de muestreo podría ser una alternativa eficiente para la optimización de costos de inventarios, aprovechando sus fortalezas y facilitando su aplicación en programas de manejo forestal maderable y en proyectos forestales de carbono.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor (CVU 561802) derivada de la convocatoria "Estancias Posdoctorales por México 2022 (1)". A los representantes de los ejidos y al Ing. Germánico Galicia García por aportar información de los inventarios realizados con ambos protocolos de muestreo.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Fin de la versión en español

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). *Estado que guarda el sector forestal en México 2021*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro_completo_EGSFM_DIGITAL_1NOV_1_compressed.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). *Sistema de planeación forestal para bosques templados* [conjunto de datos]. <http://siplafor.cnf.gob.mx/siplafor/inicio/>
- Corral-Rivas, J. J., Briseño-Reyes, J., López-Sánchez, C. A., Diéguez-Aranda, U., & González-González, J. M. (2016). Sistema de Planeación Forestal para Bosque Templado (SiPlaFor). *TRESEME*, 40, 24–26. <https://asmadera.com/wp-content/uploads/2014/11/TRESEME40web.pdf>
- Corral-Rivas, J. J., Hernández-Díaz, J. C., López Sánchez, C. A., Lujan-Soto, J. E. & Gadow, K. (2015). Ejido Borbollones, Durango, México. In P. Siry, P. Bettinger, K. Merry, D. Grebner, K. Boston, & C. Cieszewski (Eds.), *Forest plans of North America* (pp. 61-68). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14010-X>
- Cruz-Aviña, J. R., Dzul-Ramírez, R. D., Díaz-Larrea, J., Castañeda-Roldán, E. I., Cruz-Díaz, Y. L., & Cabrera, R. (2022). Bonos de carbono como propuesta de conservación ambiental, para la microcuenca del Ejido la Laguna OM en Quintana Roo, México. *Nexo Revista Científica*, 35(02), 459-475. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14623>
- Egbert, J., & Plonsky, L. (2021). Bootstrapping techniques. In M. Paquot, & S. T. Gries, (Eds.), *A practical handbook of corpus linguistics* (pp. 593-610). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46216-1_24
- Eker, M., Poudel, K. P., & Ozçelik, R. (2017). Aboveground biomass equations for small trees of brutian pine in Turkey to facilitate harvesting and management. *Forests*, 8(12), 477. <https://doi.org/10.3390/f8120477>
- Estrada-Chavira, M. E. (2022). Evolución y controversias de los bonos de carbono en México. *Semestre Económico*, 11(1), 127–133. <https://doi.org/10.26867/se.2022.v11i1.132>
- Fonseca, W., Ruiz, L., Rojas, M., & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(1), 37-50. <https://www.redalyc.org/pdf/6650/665070684004.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). *State of the World's Forests 2022. Forests, climate change, biodiversity and people*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Galván-Moreno, V. S., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Cuellar-Rodríguez, L. G., Quiñonez-Barraza, G., & Rascón-Solano, J. (2024). Estimación del valor de carbono almacenado en función de dos métodos de muestreo en bosques de pino del estado de Chihuahua, México. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 12(3), e854. <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v12n3/2310-3469-cfp-12-03-e854.pdf>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (6.ª ed.) Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., Venegas-González, A., Domínguez-Calleros, P., Hernández-Díaz, J., Carrillo-Parra, A., & González-Tagle, M. (2019). Hydroclimatic variations reveal differences in carbon capture in two sympatric conifers in northern Mexico. *PeerJ*, 7, e7085. <https://doi.org/10.7717/peerj.7085>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, (100), 351–403. <http://scielo.org.mx/pdf/abm/n100/n100a12.pdf>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000200119&script=sci_arttext
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Pueblo Nuevo, Durango*. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/10/10023.pdf
- Lee-Ing, T., Chih-Wei, C., Shin-En, J., & Saminathan, R. (2012). Quantifying uncertainty of emission estimates in National Greenhouse Gas Inventories using bootstrap confidence intervals. *Atmospheric Environment*, 56, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.063>
- Lira-Tuero, L. A., Corral-Rivas, J. J., Padilla-Martínez, J. R., López-Serrano, P. M., Pompa-García, M., & Cruz-Cobos, F. (2019). Efecto del manejo forestal en biomasa y carbono en bosques de Durango. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 6(1), 89-97. https://www.voaxaca.tecnm.mx/revista/docs/RMAE%20vol%206_1_2019/9%20RMAE_2019-26-Biomasa.pdf
- López-Serrano, P. M., Cárdenas Domínguez, J. L., Corral-Rivas, J. J., Jiménez, E., López-Sánchez, C. A., & Vega-Nieva, D. J. (2019). Modeling of aboveground biomass with Landsat 8 OLI and machine learning in temperate forests. *Forests*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.3390/f11010011>
- López-Serrano, P. M., Vega-Nieva, D. J., Ramírez-Aldaba, H., García-Montiel, E., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Estimación de parámetros forestales mediante datos de Sentinel 2A en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 81-106. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1075>
- McRoberts, R. E., Naesset, E., & Gobakken, T. (2013). Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume. *Remote Sensing of Environment*, 128, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.007>
- Medrano Meraz, M. J., Hernández, F. J., Corral Rivas, S., & Nájera Luna, J. A. (2017). Diversidad arbórea a diferentes niveles de altitud en la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 57-68. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322017000200057&script=sci_abstract&tlng=pt
- Montes de Oca-Cano, E., García Ramírez, P., Nájera Luna, J. A., Méndez Gonzáles, J., & Graciano Luna, J. J. (2011). Flujos y asimilación de CO₂ de *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la Región de El Salto, Durango, México. *InterSedes*, 9(17), <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/913>
- Navarro Cerrillo, R., Varo, Á., Cachinero, A., Ruiz, F. J., & González, P. (2024). Análisis de datos de inventarios forestales. In R. M. Navarro Cerrillo, P. González Moreno, M. A. Varo Martínez,

- & A. J. Ariza Salamanca (Eds.), *Geociencias aplicadas a la gestión forestal* (pp. 440-471). UCOPress, Universidad de Córdoba. <https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/2018-07-26-11-32-47/materias-3/product/1096-ebook-geociencias-aplicadas-a-la-gestion-forestal>
- Patíño, F. S., Suárez, S. L. N., Andrade, C. H. J., & Segura, M. M. A. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 121–134. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312>
- Pimienta, T. D. J., Domínguez, C. G., Aguirre, C. O., Hernández, F. J., & Jiménez, P. J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 13(1), 35-46. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311234>
- Pompa-García, M., & Sígala-Rodríguez, J. A., (2017). Variation of carbon uptake from forest species in Mexico: a review. *Madera y Bosques*, 23(2), 225–235. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321512>
- Quiñonez-Barraza, G., Zhao, D., de los Santos-Posadas, H. M., Santiago-García, W., Tamarit-Urias, J. C., & Nájera-Luna, J. A. (2019). Sistema compatible de ahusamiento, volumen, peso verde, biomasa y concentración de carbono para *Quercus sideroxylla* Bonpl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(1), 49-69. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.050>
- Rahman, M. S., Donoghue, D. N., Bracken, L. J., & Mahmood, H. (2021). Biomass estimation in mangrove forests: a comparison of allometric models incorporating species and structural information. *Environmental Research Letters*, 16(12), 124002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac31ee>
- Ranero, A., & Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. The R foundation for statistical computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rincón-Ruiz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros-Quiceno, A., Tapia-Caicedo, C., David-Drews, A., Arias-Arévalo, P., & Zuluaga-Guerra, P. (2014). *Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. https://www.researchgate.net/publication/281243542_Valoracion_Integral_de_la_Biodiversidad_y_los_Servicios_Ecosistemicos_Aspectos_Conceptuales_y_Metodologicos
- Roque, E., Barrena, V., & Ocaña, J. (2023). Tamaño óptimo de parcela de inventarios forestales en bosques secos (Lambayeque, Perú). *Ciencia y Práctica*, 3(6), 3-17. <https://doi.org/10.52109/cyp2023649>
- Sáenz, R. J., Rueda, S. A., Benavides, S. J. D., Muñoz, F. H. J., Castillo, Q. D., & Sáenz, C. J. E. (2021). Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales tropicales en la costa de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 26-44. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.856>
- Sapkota, T. B., Dittmer, K. M., Ortiz-Monasterio, I., Mathivanan, G. P., Sonder, K., Leyva, J. C., García, M. A., Ysimoto Monroy, D., Shelton, S., & Wollenberg, E. (2022). Quantification of economically feasible mitigation potential from agriculture, forestry and other land uses in Mexico. *Carbon Management*, 13(1), 594-607. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2151939>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). NOM-152-SEMARNAT-2023. Que establece los criterios y especificaciones del contenido de los programas de manejo forestal sustentable para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Diario Oficial de la Federación, 24 de julio de 2023. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5688879&fecha=24/07/2023
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdín, G., & Wehenkel, C. (2014). Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *PLoS ONE*, 9(8), e105034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105034>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G., (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8, 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo Nolasco, A., & Navarro Bravo, A. (2018). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1787-1799. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>