



Artículo / Article

Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México

Tree carbon estimation in the forest management area of *Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico*

Guadalupe Pacheco-Aquino¹, Elvira Durán Medina¹ y José Antonio Benjamín Ordóñez-Díaz²

Resumen

Los bosques son claves para mitigar el cambio climático global, y con un adecuado manejo pueden conciliar la producción de madera con la captura de carbono. Este estudio usó una metodología general que a partir de información del programa de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca consistente en los volúmenes existentes y extraídos de pino y encino y el incremento corriente anual, permitió estimar el potencial de captura, el almacén y la dinámica del carbono en el área de manejo forestal (AMF). En esta, el potencial de captura fue de 58 577.24 MgCO₂e año⁻¹, con un promedio de 1.36 MgC ha⁻¹año⁻¹ (± 0.31). El almacén de carbono en las zonas de reservas comerciales y de conservación fue de 2 942 558.22 MgCO₂e. No obstante en 1 211.00 ha se removió 63.0 % del carbono inicial, ocho años después ya se había recuperado 11.7 % del carbono extraído. Los resultados mostraron que en el AMF, a la par del aprovechamiento de madera, se captura y mantiene un importante almacén de carbono. Lo anterior constituye una línea base de carbono forestal, con la cual se podría implementar un proyecto de captura, para que la comunidad pudiese recibir ingresos adicionales para mejorar el manejo del bosque, y generar información para afinar la estimación del carbono. La metodología empleada fue práctica y los valores obtenidos coincidieron, en orden de magnitud, con los citados para otros bosques mexicanos. La aproximación propuesta es posible implementarla en otras comunidades, con programas de manejo forestal para extracción de madera.

Palabras clave: Almacén de carbono, captura de carbono, incentivos por carbono, Ixtlán de Juárez, manejo forestal comunitario, Oaxaca.

Abstract

Forests are crucial for the abatement of the global climate change, and an adequate management can create a balance between logging and carbon sequestration. This study, which was carried out using a general methodology based on information collected by the forest management program in *Ixtlán de Juárez, Oaxaca*, on the existing and extracted volumes of pine and oak and the current annual increase, made it possible to estimate the potential carbon uptake, storage and dynamics in the forest management area (FMA). As for the latter, the potential uptake was 58 577.24 MgCO₂e year⁻¹, with an average of 1.36 MgC ha⁻¹año⁻¹ (± 0.31). Carbon storage in the commercial reserve and conservation area was 2 942 558.22 MgCO₂e. However, 63.0 % of the baseline carbon stock was removed in 1 211.00 ha; eight years later, 11.7 % of the extracted carbon had already been recovered. The results showed that, simultaneously with logging, the FMA sequesters an important amount of carbon. This generates a forest carbon baseline stock with which an uptake project may be implemented allowing the community to obtain additional income to improve its forest management, as well as generate information in order to fine-tune carbon estimation. The methodology utilized was practical, and the resulting values are in agreement with those cited for other Mexican forests. It is possible to apply the proposed approach in other communities with forest management programs for timber exploitation.

Key words: Carbon storage, carbon uptake, carbon incentives, community forest management, *Ixtlán de Juárez, Oaxaca*.

Fecha de recepción/ date of receipt: 8 de mayo de 2014; Fecha de aceptación/date of acceptance: 15 de octubre de 2014.

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional. Correo-e: eduran3@hotmail.com

² Servicios Ambientales y Cambio Climático A.C.

Introducción

Los bosques tienen capacidad para almacenar y capturar carbono, por lo que con un manejo sustentable podría contribuir a la mitigación del cambio climático global. Las prácticas de manejo forestal inadecuadas hacen que las zonas forestales sean una fuente de emisión de CO₂ a la atmósfera (Canadell y Raupach, 2008; Putz *et al.*, 2008; Skutsch y McCall, 2012). Cuando ello ocurre en donde se extrae madera, se limita su potencial para alcanzar balances positivos en las estimaciones de carbono (Griscom *et al.*, 2009). Por el contrario, si el aprovechamiento es adecuado, además de producir madera se reducirían sus emisiones de CO₂ a la atmósfera y se capturaría carbono (IPCC, 2007; Olschewski y Benítez, 2010).

Existen distintos estándares del manejo forestal sustentable (FSC 2014a), pero para conocer su impacto en el carbono se deben hacer estimaciones. Algunas aproximaciones metodológicas para estimar cuantitativamente el carbono forestal son complejas, demandan tiempo y de grandes bases de información, además son costosas (Bateman y Lovett, 2000; Hoover, 2008; Asner *et al.*, 2010; Bucki *et al.*, 2012; Saynes *et al.*, 2012).

Dada la emergencia que representa el cambio climático (IPCC, 2014), las limitantes metodológicas no son razón para retardar la ejecución de estrategias que promuevan acciones para cuidar los almacenes de carbono y la captura de CO₂ (Angelsen *et al.*, 2013). Una alternativa es recurrir a metodologías sencillas, accesibles, baratas y relativamente rápidas; por ejemplo, las que se basan en el mapeo participativo de la cobertura forestal y los modelos generales para la cuantificación de carbono (McCall, 2011; Bucki *et al.*, 2012). Esas aproximaciones son más acordes con las condiciones (información disponible y de capacidad técnica) de gran parte de las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en donde urge emprender acciones de mitigación del cambio climático (Skutsch y McCall, 2012; Edwards *et al.*, 2014; IPCC, 2014).

México se ha comprometido a promover acciones para reducir emisiones y aumentar los almacenes de carbono en sus bosques, a través de la iniciativa para la reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques, mejor conocida como REDD+ (Semarnat-Conafor, 2010). Dado que más de 60 % de los bosques del país son de propiedad social (Bray, 2013), iniciativas como REDD+ y otros proyectos de carbono deben ser incluyentes de la gente que ostenta la propiedad y derechos sobre el bosque (Bray y Duran, 2014; CCMSC, 2014).

La captura de carbono forestal bajo el esquema de mercados en los bosques de propiedad social está operando y tiene un gran potencial, sobre todo en comunidades donde se aprovecha madera con planeación y supervisión legal, técnica y social;

Introduction

Forests have the ability to uptake and store carbon; therefore, their sustainable management may contribute to abate the global climate change. Inadequate forest management practices render forest areas a source of CO₂ emission to the atmosphere (Canadell and Raupach, 2008; Putz *et al.*, 2008; Skutsch and McCall, 2012). When this occurs in logging areas, the potential to attain a positive balance in the carbon estimate is restricted (Griscom *et al.*, 2009). By contrast, adequate timber harvesting allows not only to produce timber but also to reduce CO₂ emissions to the atmosphere and uptake carbon (IPCC, 2007; Olschewski and Benítez, 2010).

There are various standards for sustainable forest management (FSC, 2014a); however, estimations must be made in order to determine their impact on the carbon stock. Certain methodological approaches to the quantitative estimation of forest carbon are complex and costly and demand time as well as large databases (Bateman and Lovett, 2000; Hoover, 2008; Asner *et al.*, 2010; Bucki *et al.*, 2012; Saynes *et al.*, 2012).

Given the emergency posed by the climate change (IPCC, 2014), the methodological constraints are no reason to delay the execution of strategies for the promotion of actions to monitor CO₂ sequestration and carbon storage (Angelsen *et al.*, 2013). One option is to resort to simple, accessible, cheap and relatively rapid methodologies, like those based on participative mapping of the forest cover and on general models for the quantification of carbon (McCall, 2011; Bucki *et al.*, 2012). These approaches are more in conformity with the conditions (available information and technical capacity) of the larger part of the tropical and subtropical regions of the world, where there is an urgency to implement measures to abate climate change (Skutsch and McCall, 2012; Edwards *et al.*, 2014; IPCC, 2014).

Mexico has committed itself to promote actions to reduce CO₂ emissions through the initiative to reduce deforestation and the degradation of the forests known as REDD+ (Semarnat-Conafor, 2010), and to increase the carbon stocks of its forests. Since over 60 % of the forests across the country are social property (Bray, 2013), initiatives like REDD+ and other carbon projects must include those people who own and have rights over the forest (Bray and Duran, 2014; CCMSC, 2014).

Forest carbon uptake operates within market frameworks in those forests that are social property and has a great potential, particularly in communities that practice planned logging under legal, technical and social supervision, because they have not only safe land ownership but also a forest management culture (Bray *et al.*, 2005; Bray, 2012).

porque, además de seguridad en la tenencia de la tierra, se cuenta con cultura de manejo forestal (Bray *et al.*, 2005; Bray, 2012).

El manejo forestal comunitario ha evidenciado la posibilidad de conciliar la extracción de madera con logros económicos, sociales y ecológicos (Bray *et al.*, 2006; Duran *et al.*, 2011; Bray *et al.*, 2012). Aunque Oaxaca no está incluido entre la primera etapa de las áreas de acción temprana de REDD+, que trata de impulsar el gobierno mexicano (CCMSC, 2014), en algunas de sus comunidades forestales ya operan proyectos de carbono forestal en el mercado voluntario (Bray, 2012) e Ixtlán, potencialmente, también podría trabajar en forma exitosa alguno de ellos. Esto debido a que realiza acciones acordes con el denominado manejo forestal mejorado (Putz *et al.*, 2008), con las cuales disminuye los impactos durante la extracción (reducción de carriles de arrime), reduce emisiones de CO₂ en corto plazo al proteger el bosque de incendios y plagas forestales, y fabrica muebles con parte de la madera extraída, lo que retarda la liberación del carbono (Griscom *et al.*, 2009; Profft *et al.*, 2009; Bray *et al.*, 2010). Además, promueve la fijación del CO₂ que fue emitido al cortar árboles, a través de prácticas de reforestación, de esta manera acelera el restablecimiento de la masa forestal de áreas aprovechadas y promueve que la tasa de captura sea mayor (Pacheco-Aquino, 2014). Si bien el manejo de los bosques sujetos a aprovechamiento maderable en Ixtlán se ha calificado como sustentable (Bray, 2010; FSC, 2014b), para fines de incentivos de carbono se requiere de contar con estimaciones cuantitativas, toda vez que los proyectos de carbono hacen pago por resultado (Olschewski y Benítez, 2010; CCMSS, 2014). Con base en la complejidad que implica la cuantificación de todos los compartimentos de carbono arbóreo, y que el principal puede encontrarse en los troncos, se usaron datos disponibles de los volúmenes maderables del programa de manejo forestal para estimar el potencial de captura, el almacén y la dinámica del carbono en el área de manejo forestal (AMF). El objetivo fue generar una línea base de carbono para el AMF de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Esta información servirá para gestionar algún proyecto de carbono y, en el futuro, usarse como referente para su monitoreo.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

La comunidad de Ixtlán de Juárez, ubicada en la región Sierra Norte de Oaxaca, coordenadas 17° 18' 16" N, 96° 20' 00" O y 17° 34' 00" N, 96° 31' 38" O (Figura 1A). La superficie total del predio comunal es de 19 310 ha, y específicamente se analizó el área de manejo forestal (AMF), que corresponde a 46.6 % (8 997 ha), donde predominan los bosques de pino, pino-encino y encino-pino (Pacheco-Aquino, 2014). La zona se divide en área de aprovechamiento forestal, para la extracción

Community forest management has shown that it is possible to reconcile timber exploitation with economic, social and ecological benefits (Bray *et al.*, 2006; Duran *et al.*, 2011; Bray *et al.*, 2012). Although the state of Oaxaca is not included among of the areas for early action in the first stage of REDD+ which the Mexican government is trying to launch (CCMSC, 2014), forest carbon projects are already in operation in the voluntary market in some of its forest communities (Bray, 2012), and Ixtlán may potentially be able to work successfully in one of these projects. This is because this community carries out actions in keeping with the so-called improved forest management (Putz *et al.*, 2008), through which it diminishes the impacts during timber extraction (reduction of haul roads) and lessens CO₂ emissions in the short term by protecting the forest from fires and pests, and manufactures furniture with some of the extracted timber, thereby delaying carbon release (Griscom *et al.*, 2009; Profft *et al.*, 2009). Furthermore, it carries out reforestation practices to promote the fixation of the CO₂ emitted during the felling of the trees and thus accelerates the reestablishment of the forest mass in the exploited areas and increases carbon sequestration (Pacheco-Aquino, 2014). Although the management of forests that are exploited for timber in Ixtlán has been rated sustainable (Bray, 2010; FSC, 2014b), quantitative estimations must be made for carbon incentive related purposes, as carbon related projects make payments by results (Olschewski and Benítez, 2010; CCMSS, 2014). Considering the complexity of quantifying all the tree carbon compartments, and that the main compartment may be found in the tree stems, available data on the timber volumes from the forest management program were used to estimate potential carbon uptake, storage and dynamics in the forest management area (FMA). The objective was to develop a baseline carbon stock for the FMA of the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca. This information will be useful for the community to manage carbon projects and may be used in the future as a referent for monitoring.

Materials and Methods

Study site

The community of Ixtlán de Juárez is located in the region of the Northern Sierra of Oaxaca, at 17° 18' 16" N, 96° 20' 00" W and 17° 34' 00" N, 96° 31' 38" W (Figure 1A). The total surface area of the communal plot is 19 310 ha; the forest management area (FMA), corresponding to 46.6 % (8 997 ha), where pine, pine-oak and oak-pine forests are prevalent, was specifically analyzed (Pacheco-Aquino, 2014). The area is divided into a forest exploitation area for timber extraction (1 211.00 ha; 6.3 %) and an area of conservation and commercial reserves (7 786 ha; 40.3 %). The altitude of the FMA is 1 000 to 3 1000 masl; the dominant climate is humid temperate and subhumid (García, 1987).

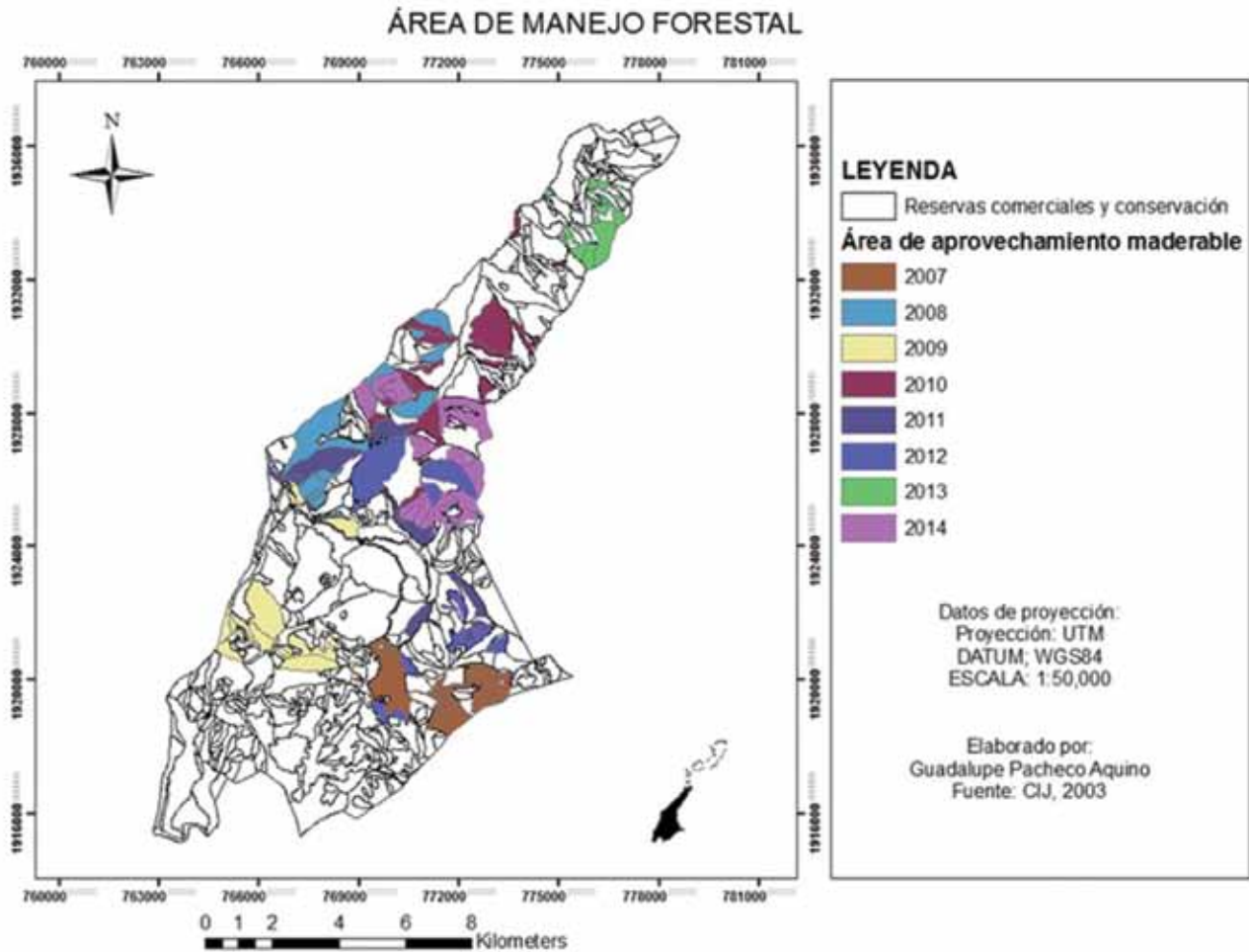


Figura 1. A) Polígono de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, B) Área de aprovechamiento forestal, donde anualmente se hace extracción de madera conforme el programa de manejo forestal vigente (2006-2014).
 Figure 1. A) Area of the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, B) Forest exploitation area, from which timber is annually extracted according to the current forest management program (2006-2014).

de madera (1 211.00 ha; 6.3 %); y área de conservación y de reservas comerciales (7 786 ha; 40.3 %). La altitud del AMF es de 1 000 a 3 100 msnm; prevalecen climas templado húmedo y subhúmedo (García, 1987).

El AMF está dividida en 23 rodales, que a su vez se subdividen en 466 subrodales (Figura 1B); de estos últimos, 136 fueron intervenidos con el programa de manejo forestal vigente. El aprovechamiento de madera se hizo mediante extracción selectiva y selección grupal en franjas, conocido como matarrasa (CIJ, 2003) y se extrajo madera de pino y en menor cantidad de encino.

The FMA is divided into 23 stands, which are in turn subdivided into 466 sub-stands (Figure 1B). Of the latter, 136 were intervened by the current forest management program. Timber exploitation was carried out through selective extraction and alternate-strip clear cutting (CIJ, 2003); the extracted timber was pine and, in lesser amounts, oak.

The remaining surface area of the plot includes 10 311.5 ha of uninhabited tropical and mesophylic forests, with no soil use, because the community is keeping it under observation (Pacheco-Aquino, 2014). There is also an area of 380 ha that is used for crops, particularly corn; the only human settlement in the plot occupies a surface area of 207.73 ha.



El resto de la superficie del predio corresponde a 10 311.5 ha de bosques tropicales y bosques mesófilos no habitados, y sin ningún uso del suelo; porque la comunidad la mantiene bajo conservación (Pacheco-Aquino, 2014). Existe, también, un polígono de 380 ha usado para cultivos, principalmente de milpas, y en 207.73 ha se encuentra el único asentamiento humano.

Antecedentes del manejo forestal

En Ixtlán de Juárez se extrae madera con programas de manejo forestal autorizados por Semarnat desde 1993 y a partir del 2001 obtuvo la certificación internacional del *Forest Stewardship Council* (FSC), que mantiene hasta la fecha. El manejo forestal y las acciones de conservación de los bosques son participativos, a partir de sólidas instituciones de gobernanza local, que tienen como eje de las decisiones a la Asamblea de Comuneros (Ostrom, 1990; Canadell y Raupach, 2008; Bray *et al.*, 2012). Además, cuenta con sistemas eficientes de rendición de cuentas, sanciones y resolución de conflictos producto de la llamada "comunalidad" (*sensu* Martínez, 2010). Aunque el manejo del bosque tiene fines comerciales, no busca maximizar ganancias, sino ayudar a la economía local mediante la generación de empleos e ingresos para cubrir demandas sociales (Bray, 2010; Mathews, 2010).

El manejo del bosque está a cargo de los Servicios Técnicos Forestales Comunes y es supervisado externamente (FSC, 2014b). El programa de manejo forestal vigente fue elaborado por técnicos de la comunidad, y contiene información confiable, a partir de la cual se estimó el carbono contenido en la madera del AMF.

Estimación del potencial de captura de CO₂

El potencial de captura de CO₂ (PCC) se calculó para los 23 rodales del AMF (8 997 ha); para ello, se usó el incremento corriente anual (ICA) de todos los subrodales (CIJ, 2003). Debido a las complicaciones para determinar la edad de los encinos y, en general, en las latifoliadas, el ICA solo se estimó para el género *Pinus*, y se usó el valor de densidad de 0.512 Mg m⁻³ (Ordóñez *et al.*, 2013). El PCC se obtuvo mediante la siguiente ecuación (Ordóñez, 2008):

$$PCC = ICA * \delta * CC \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

PCC = Potencial de captura de carbono (MgCO₂ ha⁻¹ año⁻¹)

ICA = Incremento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹)

δ = Densidad de la madera para el género *Pinus* (Mg m⁻³)

CC = Contenido de carbono de 0.5 Mg⁻¹ (valor por defecto; IPCC, 2003)

Forest management history

Logging in *Ixtlán de Juárez* is carried out according to forest management programs authorized by Semarnat since 1993; in the year 2001 this district obtained international certification from the Forest Stewardship Council (FSC) and has kept it up to the present date. Forest management and actions for the preservation of forests are participative and are based on solid local governance institutions revolving around the decisions of the Communal Landowners' Assembly (Ostrom, 1990; Canadell and Raupach, 2008; Bray *et al.*, 2012). Furthermore, it has efficient accounting, penalization and conflict resolution systems as a result of the so-called "communalidad" (*sensu* Martínez, 2010). Although forest management has certain commercial purposes, it seeks not to maximize profits but to assist local economy by generating jobs and income to meet social demands (Bray, 2010; Mathews, 2010).

Forest management is in the charge of the Communal Technical Forest Services and is supervised externally (FSC, 2014b). The forest management program currently in force was crafted by community technicians and contains reliable information, based on which the carbon content of the wood in the FMA was determined.

Estimation of the carbon sequestration potential

The carbon sequestration potential (CSP) was estimated for the 23 stands of the FMA (8 997 ha), using the annual current increase (ACI) of all the sub-stands (CIJ, 2003). Due to the difficulties in determining the age of the oak trees and, in general, of the broadleaves, the ACI was estimated only for the *Pinus* genus, using the density value of 0.512 Mg m⁻³ (Ordóñez *et al.*, 2013). The CSP was obtained using the following equation (Ordóñez, 2008):

$$CSP = ACI * \delta * CC \quad \text{Equation (1)}$$

Where:

CSP= Carbon sequestration potential (MgCO₂ ha⁻¹ year⁻¹)

ACI = Annual current increase (m³ ha⁻¹ year⁻¹)

δ = Wood density for the *Pinus* genus (Mg m⁻³)

CC = Carbon content of 0.5 Mg⁻¹ (value by default; IPCC, 2003)

The results were gathered in a spreadsheet; the CSP value of each sub-stand was multiplied by its corresponding area. The CSP value of the sub-stands was added up in order to calculate the total for each stand in both the logging area and in the conservation and commercial reserve area (Table 1).



Los resultados se concentraron en una hoja de cálculo, el valor de PCC de cada subrodal se multiplicó por su área. Se sumó el valor del PCC de los subrodales para generar el total de cada rodal, lo correspondiente al área de aprovechamiento maderable, la de reservas comerciales y la de conservación (Cuadro 1). Para registrar las estimaciones en toneladas métricas de carbono equivalente por año ($\text{MgCO}_2\text{e año}^{-1}$ unidad en la que operan los mercados de carbono, se multiplicaron los valores expresados en MgC año^{-1} por 3.67 (Rügnitz *et al.*, 2009).

Estimación del almacén de carbono

El almacén de carbono se estimó a partir de los volúmenes de madera de los géneros *Pinus* y *Quercus* (existencias reales) en el área de reservas y conservación (7 786 ha). El valor de densidad de *Pinus* usado fue 0.512 Mgm^{-3} y el de *Quercus* 0.684 Mgm^{-3} (Ordóñez *et al.*, 2013), para el contenido de carbono se utilizó el valor por defecto de 0.5 (IPCC, 2003). Ecuación (2):

$$CA = VM * \delta * CC \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

CA = Carbono almacenado en madera de *Pinus* y *Quercus* (MgCO_2)

VM = Volumen de madera de *Pinus* y *Quercus* ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)

δ = Densidad de la madera por género (Mgm^{-3})

CC = Contenido de carbono (0.5 valor por defecto, IPCC, 2003).

Los resultados de carbono almacenado por subrodal se sumaron para consignarse a nivel de rodal (MgC) (Cuadro 1), y se calculó el promedio por hectárea (Mg C ha^{-1}). Las unidades se cambiaron a carbono equivalente (MgCO_2e), multiplicando por 3.67 (Rügnitz *et al.*, 2009).

Dinámica del carbono en el área de aprovechamiento maderable

La dinámica del carbono se analizó únicamente para el área de aprovechamiento maderable (1 211.00 ha), para ello se usaron los datos de volumen de madera correspondientes al plan de cortas del programa de manejo forestal (relacionadas con la estimación de carbono inicial), los volúmenes extraídos (carbono removido) y los volúmenes que quedaron, porque no se extrajo la madera de toda el área, o bien se practicó extracción selectiva (carbono residual). Asimismo, se estimó el carbono almacenado actual en las áreas aprovechadas (Ecuación 3); para esto, se ocupó el valor del PCC ($\text{MgC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en cada subrodal intervenido. El valor generado se multiplicó por la edad de su masa forestal, de acuerdo al año de intervención y, posteriormente, se multiplicó por la superficie del subrodal. Ecuación (3):

$$CAA = PCC_i * Edad_i * Superficie \quad \text{Ecuación (3)}$$

In order to record the estimates in metric tons of equivalent carbon dioxide per year ($\text{MgCO}_2\text{e year}^{-1}$) for every unit in which the carbon markets operate, the values expressed in MgC year^{-1} were multiplied by 3.67 (Rügnitz *et al.*, 2009).

Carbon storage estimation

Carbon storage was estimated based on the timber volumes of the *Pinus* and *Quercus* genera (actual stock) in the reserve and conservation area (7 786 ha). The density value used for was *Pinus* was 0.512 Mgm^{-3} , and the value used for *Quercus* was 0.684 Mgm^{-3} (Ordóñez *et al.*, 2013); the value by default utilized for the carbon content was 0.5 (IPCC, 2003).

$$CS = LV * \delta * CC \quad \text{Equation (2)}$$

Where:

CS = Carbon storage in *Pinus* and *Quercus* wood (MgCO_2)

LV = *Pinus* and *Quercus* lumber volume ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)

δ = Density of the wood by genus (Mgm^{-3})

CC = Carbon content (0.5 value by default, IPCC, 2003).

The level of the stands (Mc) was obtained by adding the estimated the carbon storages of the sub-stands (MgC) (Table 1), and the average per hectare (Mg C ha^{-1}) was calculated. The units were multiplied by 3.67 in order to convert them to carbon equivalents (MgCO_2e) (Rügnitz *et al.*, 2009).

Carbon dynamics in the timber exploitation area

The carbon dynamics were analyzed only for the timber exploitation area (1 211.00 ha), using the lumber volume data for the felling plan of the forest management program (related with the baseline carbon stock estimation), the extracted volumes (removed carbon) and the volumes that remained because the area was only partially exploited or because selective logging was carried out (residual carbon). Likewise, the current carbon stock present in the exploited areas was estimated (Equation 3) based on the CSP value ($\text{MgC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) of each intervened sub-stand. The generated value was multiplied by the age of its forest mass, according to the year of the intervention was then multiplied by the surface area of the sub-stand.

$$CCS = CSP_i * Age_i * Surface area \quad \text{Equation (3)}$$

Where:

CCS = Current carbon stock (MgCO_2)

CSP_i = Carbon sequestration potential in each sub-stand ($\text{MgCO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)

Age_i = Time elapsed since the last felling in each sub-stand (years)

Surface area = Intervened surface area (ha)

Donde:

- CAA = Carbono almacenado actual (MgCO₂)
- PCC_i = Potencial de captura de carbono en cada subrodal (MgCO₂ ha⁻¹ año⁻¹)
- Edad_i = Tiempo transcurridos desde el último año de corta en cada subrodal (años)
- Superficie = Superficie intervenida (ha)



The data for the baseline carbon stock, removed carbon, residual carbon and sequestered carbon were tabulated and charted to show the changes that occurred during the period of the forest management program period (2006-2014) (Table 3, Figure 2). Carbon recovery since the year of the extraction was estimated based on the ratio of the carbon sequestered by the year 2014 and the baseline carbon at the time of the exploitation. The units were multiplied by 3.67 in order to convert them to carbon equivalents (MgCO₂e) (Rügnitz *et al.*, 2009).

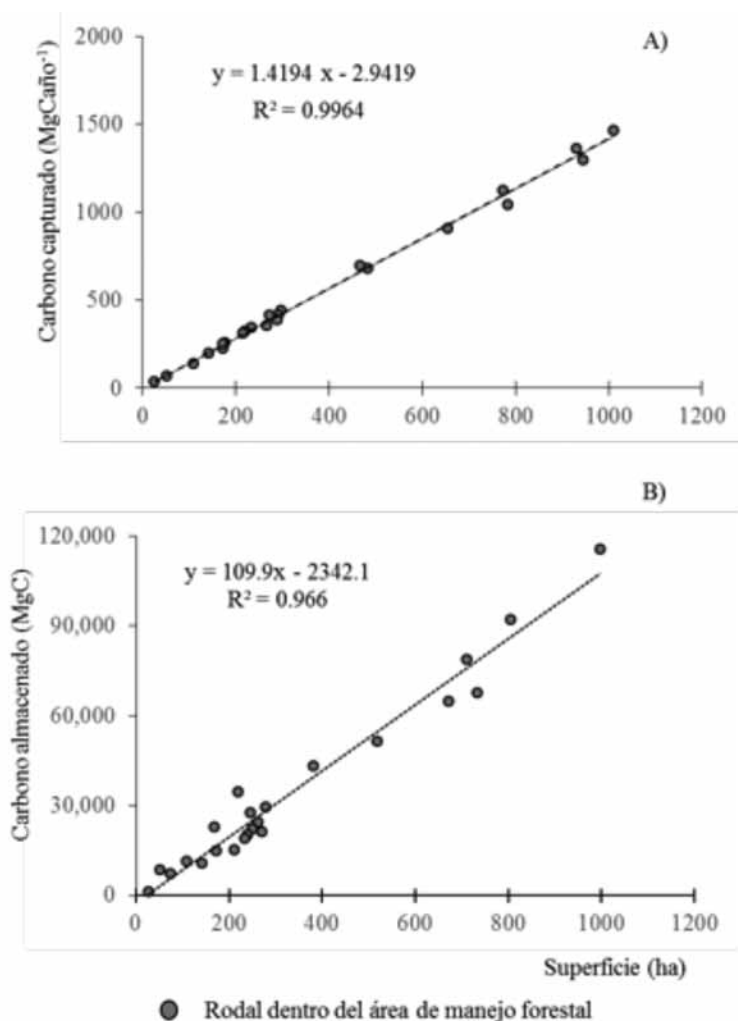


Figura 2. A) Relación del carbono capturado y la extensión de los rodales del área de manejo forestal; B) Relación del carbono almacenado y la extensión de los rodales.

Figure 2. A) Relation of the captured carbon and the extension of the stands of the forest management area; B) Relation of the stored carbon and the extension of the stands.

Los datos de carbono inicial, carbono removido, carbono residual y carbono capturado-almacenado se tabularon y graficaron para mostrar los cambios durante el periodo del programa de manejo forestal (2006-2014) (Cuadro 3, Figura 2). La recuperación de carbono desde el año en que se hizo la extracción se calculó con base en el porcentaje entre el carbono capturado-almacenado al 2014; respecto del carbono inicial, cuando se hizo el aprovechamiento. Las unidades se cambiaron a carbono equivalente ($MgCO_2e$) multiplicando por 3.67 (Rügnitz *et al.*, 2009).



Cuadro 1. Potencial de captura y almacén de carbono en los rodales del área de manejo forestal de la comunidad de Ixtlán de Juárez Oaxaca.

| Rodal ^a | Carbono Total Capturado en el Área de Manejo Forestal | | Carbono Almacenado en el Área de Reservas Comerciales ^c | |
|--------------------|---|-----------------------------|--|--------------|
| | Superficie (ha) | $MgCO_2e$ año ⁻¹ | Superficie ^b (ha) | $MgCO_2e$ |
| 1 | 1010.25 | 5 369.58 | 998.43 | 423 532.79 |
| 2 | 945.25 | 4 749.82 | 806.06 | 337 142.31 |
| 3 | 930.75 | 4 986.25 | 734.11 | 248 026.93 |
| 4 | 784.25 | 3 828.95 | 711.74 | 288 257.40 |
| 5 | 774.00 | 4 115.54 | 671.81 | 237 390.50 |
| 6 | 655.25 | 3 321.57 | 518.5 | 188 850.68 |
| 7 | 483.75 | 2 499.93 | 381.62 | 158 421.94 |
| 8 | 466.50 | 2 540.19 | 280.05 | 107 469.01 |
| 9 | 298.75 | 1 617.59 | 270.75 | 77 376.74 |
| 10 | 292.50 | 1 525.62 | 262.37 | 89 636.34 |
| 11 | 290.50 | 1 424.47 | 250.37 | 80 743.85 |
| 12 | 273.50 | 1 512.33 | 246.25 | 100 435.17 |
| 13 | 267.00 | 1 291.95 | 240.52 | 73 592.42 |
| 14 | 234.75 | 1 250.48 | 234.75 | 69 919.15 |
| 15 | 220.00 | 1 181.34 | 219.00 | 126 697.54 |
| 16 | 216.50 | 1 131.72 | 211.62 | 54 912.04 |
| 17 | 177.00 | 944.88 | 172.25 | 54 369.58 |
| 18 | 173.25 | 819.00 | 169.69 | 83 358.29 |
| 19 | 172.25 | 915.37 | 142.00 | 39 159.52 |
| 20 | 142.00 | 718.66 | 110.25 | 41 172.67 |
| 21 | 110.25 | 496.37 | 74.99 | 26 649.23 |
| 22 | 51.75 | 244.90 | 51.75 | 30 825.32 |
| 23 | 26.75 | 130.03 | 26.75 | 4 618.81 |
| Total | 8 996.75 | 58 577.24 | 7 786.00 | 2 942 558.22 |

^aEl número del rodal no es un identificador, se ordenaron de mayor a menor área; ^b Este dato difiere del área total porque se le resta la superficie donde se hizo aprovechamiento de madera; ^c Calculado con la ecuación 2.

Table 1. Carbon uptake and storage potentials in the stands of the forest management area of the community of *Ixtlán de Juárez, Oaxaca*.

| Stand ^a | Total carbon uptake in the Forest Management Area | | Carbon storage in the Commercial Reserve Area ^c | |
|--------------------|---|--|--|---------------------|
| | Surface area (ha) | MgCO ₂ e year ⁻¹ | Surface area ^b (ha) | MgCO ₂ e |
| 1 | 1 010.25 | 5 369.58 | 998.43 | 423 532.79 |
| 2 | 945.25 | 4 749.82 | 806.06 | 337 142.31 |
| 3 | 930.75 | 4 986.25 | 734.11 | 248 026.93 |
| 4 | 784.25 | 3 828.95 | 711.74 | 288 257.40 |
| 5 | 774.00 | 4 115.54 | 671.81 | 237 390.50 |
| 6 | 655.25 | 3 321.57 | 518.5 | 188 850.68 |
| 7 | 483.75 | 2 499.93 | 381.62 | 158 421.94 |
| 8 | 466.50 | 2 540.19 | 280.05 | 107 469.01 |
| 9 | 298.75 | 1 617.59 | 270.75 | 77 376.74 |
| 10 | 292.50 | 1 525.62 | 262.37 | 89 636.34 |
| 11 | 290.50 | 1 424.47 | 250.37 | 80 743.85 |
| 12 | 273.50 | 1 512.33 | 246.25 | 100 435.17 |
| 13 | 267.00 | 1 291.95 | 240.52 | 73 592.42 |
| 14 | 234.75 | 1 250.48 | 234.75 | 69 919.15 |
| 15 | 220.00 | 1 181.34 | 219.00 | 126 697.54 |
| 16 | 216.50 | 1 131.72 | 211.62 | 54 912.04 |
| 17 | 177.00 | 944.88 | 172.25 | 54 369.58 |
| 18 | 173.25 | 819.00 | 169.69 | 83 358.29 |
| 19 | 172.25 | 915.37 | 142.00 | 39 159.52 |
| 20 | 142.00 | 718.66 | 110.25 | 41 172.67 |
| 21 | 110.25 | 496.37 | 74.99 | 26 649.23 |
| 22 | 51.75 | 244.90 | 51.75 | 30 825.32 |
| 23 | 26.75 | 130.03 | 26.75 | 4 618.81 |
| Total | 8 996.75 | 58 577.24 | 7 786.00 | 2 942 558.22 |

^a The stand number is not an identifier, the stands were ordered in descending order by surface area; ^b This datum differs from the total area because the logging surface area has been subtracted; ^c Calculated using equation 2.

Resultados

Potencial de captura y almacén de carbono forestal

En el AMF de la comunidad de Ixtlán (8 996.75 ha) hubo captura de carbono; el promedio por rodal fue de 1.36 MgC ha⁻¹año⁻¹(± 0.31) y la captura total de 58 577.24 MgCO₂e año⁻¹ (Cuadro 1). Mientras que el carbono almacenado en la madera de pino

Results

Forest carbon sequestration and storage potential

Carbon sequestration occurred in the FMA of the community of Ixtlán (8 996.75 ha); the average per stand was 1.36 MgC ha⁻¹year⁻¹(± 0.31), and the total sequestration was 58 577.24 MgCO₂e year⁻¹ (Table 1), while the carbon stored in the pine and oak lumber

y encino de las áreas de reservas comerciales y conservación (7 786 ha) correspondió a 2 942 558.22 MgCO₂e. El promedio del almacén de carbono en toda el AMF fue 115.7 MgC ha⁻¹.

Las áreas donde se extrae madera presentaron mayor potencial de captura de carbono por hectárea, con respecto a las de reservas comerciales y de conservación, pero se observó lo opuesto con el carbono almacenado (Cuadro 2), el cual tuvo registros, notablemente, superiores en las áreas de reservas comerciales, en relación con lo estimado en las áreas de aprovechamiento maderable. El promedio del almacén de carbono en el AMF fue 115.7 MgC ha⁻¹.

of the commercial reserve and conservation area (7 786 ha) was 2 942 558.22 MgCO₂e. The average carbon storage in the entire FMA was 115.7 MgC ha⁻¹.

The logging areas had a higher carbon uptake potential per hectare than the conservation and commercial reserve areas; however, the opposite is true of the carbon storage (Table 2), which was considerably higher in the commercial reserve areas than in the logging areas. The average carbon storage in the FMA was 115.7 MgC ha⁻¹.

Cuadro 2. Potencial de captura y almacén de carbono en las áreas de aprovechamiento maderable, de reservas comerciales y de conservación.

| Área de Manejo Forestal | Potencial de Captura de Carbono | Carbono almacenado |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | MgCO ₂ e año ⁻¹ | MgCO ₂ e |
| Reservas comerciales y conservación | 38 861.48 (4.99) | 2 942 558.22 (377.93) ^a |
| Aprovechamiento de madera (2006-2014) | 19 715.76 (16.28) | 32 380.22 (26.74) ^b |
| Total | 58 577.24 (6.51) | 2 974 938.44 (330.67) |

^a Calculado con la ecuación 2; ^b Calculado con la ecuación 3.

En paréntesis se indica el valor correspondiente por hectárea.

Table 2. Carbon uptake and storage potentials in the stands in the logging area and in the conservation and commercial reserve area.

| Forest Management Area | Carbon Uptake Potential | Carbon storage |
|--|--|------------------------------------|
| | MgCO ₂ e year ⁻¹ | MgCO ₂ e |
| Conservation and commercial reserve area | 38 861.48 (4.99) | 2 942 558.22 (377.93) ^a |
| Logging area (2006-2014) | 19 715.76 (16.28) | 32 380.22 (26.74) ^b |
| Total | 58 577.24 (6.51) | 2 974 938.44 (330.67) |

^a Estimated using equation 2; ^b Estimated using equation 3. The value in parentheses is the value per hectare.

Dinámica del carbono en el área de aprovechamiento maderable

En las 1 211.4 ha, donde se extrajo madera en los últimos ocho años, se removió 63.03 % del carbono contenido en la biomasa del bosque de pino-encino (Cuadro 3). Al año 2013, en todas las áreas intervenidas hubo captura de carbono, y ya se tenía 7.38 %, respecto del carbono inicial y 11.7 % del carbono removido. Específicamente, para las dos primeras anualidades se había recuperado 15.03 % y 20.48 % del carbono inicial (Cuadro 3; Figura 3B).

Carbon dynamics in the logging area

63.03 % of the carbon sequestered in the pine-oak forest biomass was removed from the 1 211.4 ha from which timber was extracted during the last eight years (Table 3). By the year 2013, carbon uptake occurred in all the intervened areas; 7.38 % of the baseline carbon stock and 11.7 % of the removed carbon had already been sequestered. During the first two one-year periods, specifically, 15.03 % and 20.48 % of the baseline carbon stock had already been recovered (Table 3; Figure 3B).



Cuadro 3. Dinámica del carbono en el área de aprovechamiento maderable durante los últimos ocho años, conforme el programa de manejo forestal vigente.

| Anualidad | Superficie (ha) | Carbono (Mg CO ₂ e) | | | Capturado-Almacenado* | Recuperación de carbono (%) |
|---------------|-----------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | Inicial | Removido | Residual | | |
| 1 (2006-2007) | 429.50 | 104 672.03 | 19 441.46 | 85 230.58 | 15 734.54 | 15.03 |
| 2 (2007-2008) | 102.32 | 36 757.95 | 7 242.49 | 27 927.89 | 7 528.38 | 20.48 |
| 3 (2008-2009) | 115.35 | 45 054.02 | 39 810.47 | 5 243.59 | 3 142.18 | 6.97 |
| 4 (2009-2010) | 108.59 | 41 826.51 | 41 826.51 | 0.00 | 2 407.26 | 5.76 |
| 5 (2010-2011) | 106.38 | 54 958.91 | 54 958.91 | 0.00 | 1 708.86 | 3.11 |
| 6 (2011-2012) | 114.78 | 47 340.94 | 40 660.15 | 6 680.83 | 1 255.58 | 2.65 |
| 7 (2012-2013) | 110.27 | 69 464.99 | 33 999.32 | 35 465.71 | 603.42 | 0.87 |
| 8 (2013-2014) | 124.18 | 38 543.07 | 38 543.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total (%) | 1211.37 | 438 618.44 (100) | 276 482.39 (63.03) | 160 548.59 (36.6) | 32 380.23 (7.38) | |

* Carbono capturado-almacenado hasta 2013.

Table 3. Carbon dynamics in the logging area during the last eight years, according to the forest management program currently in force.

| One-year period | Surface area (ha) | Carbon (Mg CO ₂ e) | | | Sequestered-Stored* | Carbon recovery (%) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | | Baseline | Removed | Residual | | |
| 1 (2006-2007) | 429.50 | 104 672.03 | 19 441.46 | 85 230.58 | 15 734.54 | 15.03 |
| 2 (2007-2008) | 102.32 | 36 757.95 | 7 242.49 | 27 927.89 | 7 528.38 | 20.48 |
| 3 (2008-2009) | 115.35 | 45 054.02 | 39 810.47 | 5 243.59 | 3 142.18 | 6.97 |
| 4 (2009-2010) | 108.59 | 41 826.51 | 41 826.51 | 0.00 | 2 407.26 | 5.76 |
| 5 (2010-2011) | 106.38 | 54 958.91 | 54 958.91 | 0.00 | 1 708.86 | 3.11 |
| 6 (2011-2012) | 114.78 | 47 340.94 | 40 660.15 | 6 680.83 | 1 255.58 | 2.65 |
| 7 (2012-2013) | 110.27 | 69 464.99 | 33 999.32 | 35 465.71 | 603.42 | 0.87 |
| 8 (2013-2014) | 124.18 | 38 543.07 | 38 543.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total (%) | 1211.37 | 438 618.44 (100) | 276 482.39 (63.03) | 160 548.59 (36.6) | 32 380.2 (7.38) | |

* Carbon sequestration-storage up to the year 2013.

En las áreas correspondientes a las anualidades 4 (2009-2010) y 5 (2010-2011), el carbono residual fue cero porque se aplicó matarrasa a toda el área del subrodal, pero en subrodales en los que se dejaron áreas sin intervenir o se hizo extracción selectiva se registró carbono residual (anualidades 1, 2, 3, 6, 7 y 8), el cual correspondió a 36.96 % (Figura 3A), del carbono inicial.

In the areas corresponding to one-year periods 4 (2009-2010) and 5 (2010-2011), the residual carbon stock was zero because clear cutting was applied to the whole area of the sub-stand; however, residual carbon was detected in the sub-stands of those areas that were left unintervened or where selective extraction was carried out (one-year periods 1, 2, 3, 6, 7 and 8), in a proportion equivalent to 36.96 % of the baseline carbon stock (Figure 3A).

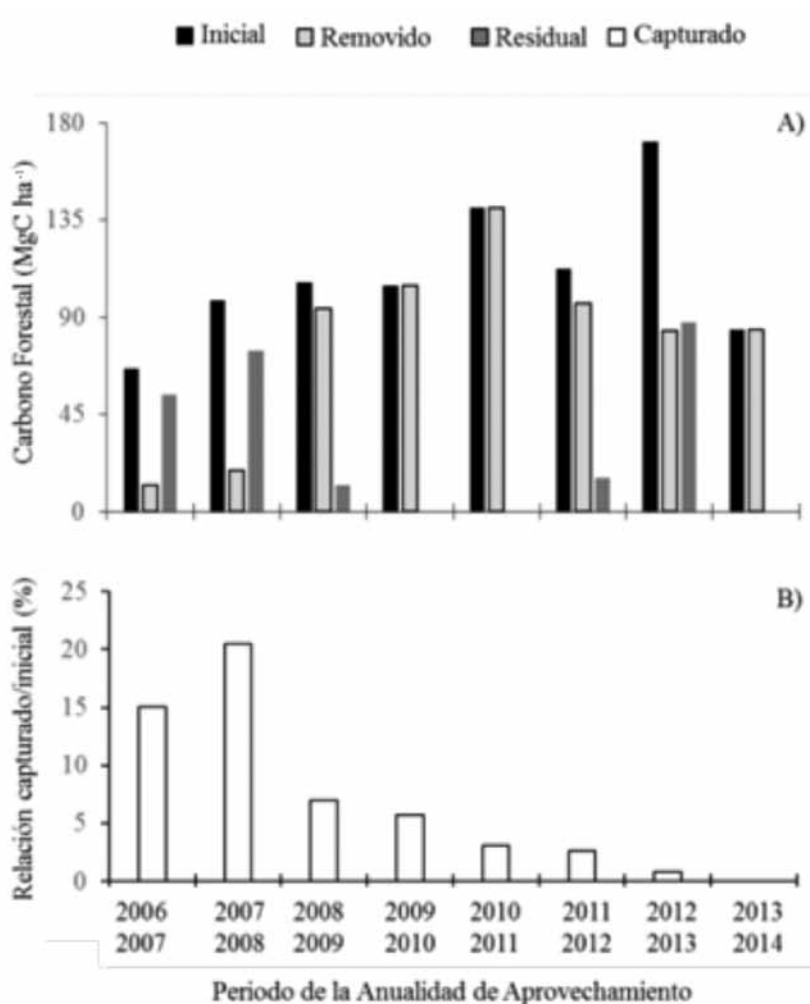


Figura 3. Dinámica de carbono en el área de aprovechamiento maderable. A) Carbono inicial, removido y residual en las áreas intervenidas en cada anualidad; B) Carbono recuperado de cada anualidad al 2013.

Figure 3. Carbon dynamics in the logging area. A) Baseline, removed and residual carbon in the intervened areas in each one-year period; B) Recovered carbon in each annual logging up to 2013.

No obstante que con las matarrasas no quedó carbono residual (Figura 3A), los resultados mostraron que posterior a la extracción hubo captura de carbono, y que podría ser comparable al método de selección (Figura 3B), aunque no se contó con datos suficientes para diferenciar la captura entre ambos métodos de manejo.

El proceso de captura de carbono en las áreas intervenidas se aceleró con la construcción de franjas de materia orgánica (ramas y follaje de los árboles cortados), inmediatamente después de la extracción de la madera (Figura 4A) y con la reforestación, al primer año de la extracción (Figura 4B), las cuales son prácticas de manejo que se hacen de manera sistemática y aseguran en pocos años la recuperación de la masa forestal (Figura 4C).

Although the clear cuttings left no residual carbon (Figure 3A), the results showed carbon uptake after the extraction; this may be comparable to the selection method (Figure 3B), although the data were insufficient to differentiate between the two management methods.

The carbon sequestration process in the intervened areas was accelerated by the construction of strips of organic matter (branches and foliage of the cut trees) immediately after the extraction of the lumber (Figure 4A), and with the reforestation, the first year after the extraction (Figure 4B); these are both management practices systematically carried out to ensure the recovery of the forest mass after only a few years (Figure 4C).



Figura 4. A) Acomodo de residuos de forma perpendicular a la pendiente para evitar la erosión en un área donde se extrajo madera, B) Reforestación con especies nativas de la región como *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Pinus pseudostrabus* Lindl., *Pinus oaxacana* Mirov, C) Masas forestales jóvenes en las áreas aprovechadas.

Figure 4. A) Residues arranged perpendicularly to the slope in order to avoid erosion in a logged area, B) Reforestation with native species of the region such as *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Pinus pseudostrabus* Lindl., *Pinus oaxacana* Mirov, C) Young forest masses in the exploited areas.

Discusión

Estimaciones de carbono en el área de manejo forestal

Los resultados constituyen una primera estimación cuantitativa del carbono arbóreo en el AMF de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, la cual podría usarse como línea base, y así cubrir un requerimiento fundamental para implementar un proyecto de carbono (Estrada y Joseph, 2012). Y con ello, la comunidad se sumaría formalmente a las estrategias de mitigación del cambio climático. En el AMF se evidenció un importante almacén de carbono, su posible captura y que en los sitios con aprovechamiento maderable se recupera relativamente rápido el carbono removido, el cual llega a 15-20% de lo que había originalmente; dichos valores se alcanzan a los 7 años de que se hizo el aprovechamiento. Aunque con variantes, las estimaciones de carbono de Ixtlán fueron acordes, en orden de magnitud, con las documentadas para otros bosques del país.

En cuanto al almacén de carbono en el AMF de Ixtlán, en los géneros *Pinus* y *Quercus*, fue de casi 3 millones de carbono equivalente, con un valor promedio de $102.98 \pm 26.18 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Cifra comparable al valor máximo alrededor del promedio ($91.5 \pm 8.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) consignado por Ordoñez *et al.* (2008) para asociaciones de bosques de pino-encino en Michoacán, también manejados por comunidades. Sin embargo, estuvo por abajo de los 110 Mg C ha^{-1} registrados por Rodríguez *et al.* (2009), para un bosque de pino-encino en Tamaulipas, de los 216 MgC ha^{-1} señalados por Olguín *et al.* (2003), y de los 195 MgC ha^{-1} estimados por Álvarez y Rubio (2013) para una comunidad forestal adyacente a Ixtlán.

Discussion

Carbon estimations in the forest management area

The results constitute a first quantitative estimation of the tree carbon stock in the FMA of the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, which may be used as a baseline. This would enable the community to meet an essential requirement to implement a carbon project (Estrada and Joseph, 2012), and therefore to formally join the climate change abatement strategy. The FMA showed major carbon storage and a potential carbon sequestration; also, the removed carbon, which amounts to 15-20% of the baseline stock, is rapidly recovered in the logging area. These values were attained 7 years after the logging. Although with certain variables, the carbon estimates for Ixtlán agreed in magnitude with those documented for other forests in the country.

The carbon storage in the *Pinus* and *Quercus* of the Ixtlán FMA was almost of 3 million metric tons of carbon equivalent, with an average value of $102.98 \pm 26.18 \text{ Mg C ha}^{-1}$. This figure is comparable to the maximum average value ($91.5 \pm 8.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) recorded by Ordoñez *et al.* (2008) for pine-oak forest associations in Michoacán, equally managed by communities. Nevertheless, it was below the 110 Mg C ha^{-1} recorded by Rodríguez *et al.* (2009) for a pine-oak forest in Tamaulipas; the 216 MgC ha^{-1} cited by Olguín *et al.* (2003), and the 195 MgC ha^{-1} estimated by Álvarez and Rubio (2013) for a forest community adjoining Ixtlán.



Es probable que las diferencias anteriores, más que relacionarse con contrastes en la calidad de sitio o variaciones en estructura y composición de especies, se deban a los criterios metodológicos empleados para la estimación del carbono.

En el presente trabajo solo se consideró la biomasa de los troncos, pero Rodríguez *et al.* (2009) incluyeron la parte aérea de árboles de latifoliadas y coníferas, la hojarasca, la madera muerta y la biomasa radicular; además es importante tomar en cuenta que su estudio se hizo en una reserva, donde el bosque no está sujeto al aprovechamiento maderable.

Olguín *et al.* (2003) incluyeron, también, el carbono del suelo, el cual suele ser un compartimento relevante de carbono en los bosques de Ixtlán (Saynes *et al.*, 2012) y llegar a constituir entre 30 y 80 % del carbono total en bosques conservados (Ordoñez *et al.*, 2008; Pérez-Ramírez *et al.*, 2013). En cuanto a la diferencia con Álvarez y Rubio (2013), esta podría explicarse por el uso del modelo CO_2 Fix, en el que se asume que la masa forestal está compuesta solo de pinos, lo que sobreestima el carbono almacenado cuando se trata de bosques de pino-encino, como los que se encuentran en esa comunidad. Asimismo, es factible que el almacén de carbono actual de Ixtlán, aún tenga un efecto histórico del manejo que hizo la empresa FAPATUX, que tuvo la concesión para extraer madera entre las décadas de los 60 a 80 del siglo pasado, y lo hizo explotando severamente los bosques, lo que disminuyó las existencias en volumen en el AMF (Bray *et al.*, 2005; Mathews, 2010).

Con el análisis de la dinámica del carbono en el área de aprovechamiento maderable de Ixtlán fue posible reconocer la remoción anual de carbono conforme el tipo de extracción de madera que se practicó; así como su recuperación en los años posteriores. Independientemente de la cantidad de carbono residual, en todas las áreas aprovechadas hubo recuperación del almacén del carbono de manera inmediata, incluidas aquellas donde la extracción con matarrasa eliminó el carbono residual arbóreo (Cuadro 3). El manejo posterior a la extracción, consistente en la colocación de franjas de materia orgánica y reforestación (Figura 4), ha sido clave para la recuperación de carbono. También se debe reconocer que las zonas de extracción están rodeadas de bosques maduros (Figura 1B), que amortiguan los impactos ecológicos de la extracción y son fuente de semillas para la regeneración natural (Ordoñez *et al.*, 2008; Hardiman *et al.*, 2013).

The above differences may be due to the methodological criteria utilized for estimating the carbon, rather than to contrasts in the quality of the site or to variations in structure and species composition.

The present research considered only the tree stem biomass; however, Rodríguez *et al.* (2009) included the aerial part of the broadleaf and conifer trees, the fallen leaves, the dead wood and the root biomass; besides, we must take into account that their study was carried out in a reserve, where the forest is not subject to logging operations.

Olguín *et al.* (2003) included, besides, the soil carbon, which usually is a relevant carbon compartment in the forests of Ixtlán (Saynes *et al.*, 2012), constituting 30 to 80 % of the total carbon stock in preserved forests (Ordoñez *et al.*, 2008; Pérez-Ramírez *et al.*, 2013). The difference in regard to the figures obtained by Álvarez and Rubio (2013) may be accounted for by the use of the CO_2 Fix model, which assumes that the forest mass is made up exclusively of pines and therefore overestimates the stored carbon in pine-oak forests like those found in Ixtlán. Likewise, the current carbon stock of Ixtlán may still have historical effects of the management by FAPATUX, which had a logging concession from the 1960s to the 1980s and exploited the forests severely, reducing the volume of the stock in the FMA (Bray *et al.*, 2005; Mathews, 2010).

The analysis of the carbon dynamics in the logging area of Ixtlán made it possible to recognize the annual carbon removal according to the type of logging practiced, and enabled its recovery in the subsequent years. Regardless of the existing residual carbon, in all the exploited areas there was an almost immediate recovery of the carbon stock, including those areas from which residual tree carbon had been eliminated by clear cutting (Table 3). The management that followed the extraction, which involved laying strips of organic matter as well as reforestation (Figure 4), has been crucial for carbon recovery. It must also be recognized that the extraction areas are surrounded by mature forests (Figure 1B) which reduce the ecological impacts of the extraction and are a source of seeds for natural regeneration (Ordoñez *et al.*, 2008; Hardiman *et al.*, 2013).



Ventajas y limitantes de la aproximación metodológica

La literatura sobre los enfoques metodológicos para cuantificar el carbono forestal es abundante; en aras de contar con información integral de todos los compartimentos de carbono de un bosque, reconocer sus tendencias temporales y asegurar la confiabilidad de las estimaciones se han desarrollado aproximaciones complejas, costosas, que recurren a tecnología de vanguardia y que a veces implican varios años para afinarse (Hoover, 2008; Asner *et al.*, 2010; McCall, 2011; Bucki *et al.*, 2012; Saynes *et al.*, 2012; Ruíz-Aquino, 2014). Hasta ahora ningún método de cuantificación del carbono es infalible en cuanto a la confiabilidad, y todavía se tienen limitaciones cuando se trata de escalar las estimaciones a grandes superficies (Doll *et al.*, 2008; Bucki *et al.*, 2012).

Los esfuerzos continúan, y se espera que a futuro la tecnología tenga un papel central para simplificar, abaratar y hacer más confiable la contabilidad del carbono (Asner *et al.*, 2010; Post *et al.*, 2012). Sin embargo, por la emergencia que representa el cambio climático, no se debe esperar a disponer de alternativas metodológicas y tecnológicas para actuar, por lo que se debería trabajar con las metodologías acordes a los contextos de las regiones que tienen potencial de ayudar a mitigar la problemática.

Una alternativa, cuando no se dispone de información, ni de recursos es utilizar metodologías generales y sencillas que podrían afinarse en el futuro (Bucki *et al.*, 2012); y, si se trata de ecosistemas donde la gente que los habita tiene algún tipo de derechos sobre el bosque (Bray, 2013; RRI, 2014), se debe involucrarla en todas las acciones (Sckutch y McCall, 2010).

Los proyectos de carbono, sobre todo aquellos implementados en los bosques comunitarios de México (Bray *et al.*, 2005), deberían tener un enfoque adaptativo y participativo (Meffe *et al.*, 2002), que con el tiempo permite la participación social, ya que representa una oportunidad de entrenamiento y de generación de datos, con los que se pueden afinar las estimaciones de carbono del bosque a nivel local (Sckutch y McCall, 2010).

La metodología empleada en el presente trabajo fue de utilidad práctica para generar estimaciones cuantitativas del carbono en las AMF de la comunidad de Ixtlán. Entre sus ventajas destacan el bajo costo y su relativa rapidez, se usó la información disponible en el programa de manejo forestal, únicamente requirió de tecnología básica, considera los géneros dominantes (*Pinus* y *Quercus*) y, como muestran los resultados, generó cifras acordes en magnitud a las derivadas para otros bosques templados de México.

Advantages and limitations of the methodological approach

There is abundant literature on the methodological approaches to forest carbon quantification. In order to obtain comprehensive information regarding all the carbon compartments in a forest, recognize their temporary tendencies and ensure the reliability of the estimations, complex and costly approximations have been developed which resort to state-of-the-art technology and whose fine tuning has sometimes taken several years (Hoover, 2008; Asner *et al.*, 2010; McCall, 2011; Bucki *et al.*, 2012; Saynes *et al.*, 2012; Ruíz-Aquino, 2014). So far, no carbon quantification method is 100 % reliable, and there are still certain limitations to escalating the estimations to large surface areas (Doll *et al.*, 2008; Bucki *et al.*, 2012).

The efforts continue, and it is to be expected that the technology will play a central role in the future to simplify, reduce costs and render carbon estimations more reliable (Asner *et al.*, 2010; Post *et al.*, 2012). However, due to the emergency represented by the climate change, one should not wait for methodological and technological alternatives to be available in order to act, and therefore one should work with the methodologies according to the contexts of the regions that have a potential to help mitigate the problems.

An alternative, when no information or resources are available, is to utilize simple, general methodologies that can be fine-tuned in the future (Bucki *et al.*, 2012); and when dealing with forests inhabited by people who have any type of rights over them (Bray, 2013; RRI, 2014), it is necessary to involve these people (Sckutch and McCall, 2010).

The carbon projects, especially those that are implemented in the community forests of Mexico (Bray *et al.*, 2005), must have an adaptive and participative approach (Meffe *et al.*, 2002), which in time allows social participation, as it represents an opportunity for training and for the generation of data with which to fine-tune the carbon estimations for the forest at a local level (Sckutch and McCall, 2010).

The methodology utilized in the present research was of practical use to carry out quantitative carbon estimations in the FMAs of the Ixtlán community. Most prominent among its advantages are its low cost and relative rapidity; the information available in the forest management program was used; only basic technology was required; the dominant genera (*Pinus* and *Quercus*) were taken into account, and, as the results show, it generated figures that agree in magnitude with those derived for other temperate forests of Mexico.



Sin embargo, es preciso reconocer que se trata de una metodología general, en relación a la complejidad que representa el carbono forestal; además subestima los contenidos de carbono almacenado y su potencial de captura, porque se basa solo en datos de los troncos. Si bien estos concentran la mayor cantidad de biomasa arbórea (Castellanos *et al.*, 1996; Avendaño *et al.*, 2009; González, 2008; Flores, 2010), no incluyen información de otros compartimentos importantes, en cuanto al contenido de carbono del bosque, sobre todo el suelo (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

Para fines de justificar apoyos para un proyecto de carbono en la comunidad de *Ixtlán*, las estimaciones generadas requieren complementarse con los mapas de cobertura arbolada del AMF y del resto del predio que permitan reconocer la prevalencia de bosques, e información adicional que muestre las acciones intencionales que hace la comunidad por cuidar sus bosques (Pacheco-Aquino, 2014).

El contexto histórico, socioeconómico y de gobernanza de las comunidades de la región de la Sierra Norte, donde se localiza *Ixtlán*, son relativamente similares. Y cuando menos 25 comunidades más disponen de programas vigentes de manejo forestal para aprovechamiento de madera (Bray y Durán 2014), con los valores de la biomasa forestal y de su incremento corriente anual. Por tanto, con una metodología como la que aquí se presenta, dichas comunidades cuantificarían el almacén y la captura de carbono en sus predios.

En *Ixtlán*, y en el resto de las localidades del entorno, los ingresos económicos por la venta de bonos de carbono aumentarían la valoración y el cuidado de los bosques, toda vez que se ha mostrado la factibilidad de conciliar el aprovechamiento de madera con los proyectos de captura de carbono (Olschewski y Benítez, 2010, Bray, 2012).

Manejo e incentivos para favorecer el balance de carbono

La comunidad de *Ixtlán* tomó el control del manejo de sus bosques a partir de 1980, cuando terminó el periodo de las concesiones forestales, y desde ese entonces ha tratado de aprovecharlos de manera racional, para ello han invertido trabajo y recursos con el fin de mejorar las características de la masa forestal; como resultado, no hay amenaza de deforestación, ni degradación de los bosques (Pacheco-Aquino, 2014).

However, it must be recognized that it is a general methodology, given the complexity of the forest carbon stock; furthermore, it underestimates the carbon storage and its sequestration potential because it is based exclusively on data related to the tree stems. Although these concentrate the largest amount of tree biomass (Castellanos *et al.*, 1996; Avendaño *et al.*, 2009; González, 2008; Flores, 2010), no information was included regarding the forest carbon content of other important compartments, particularly the soil (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

In order to justify supports for a carbon project in the community of *Ixtlán*, carbon estimations must be complemented with maps of the tree cover of the FMA and of the rest of the plot showing the prevalence of the forests, as well as with additional information attesting to the intentional actions carried out by the community to take care of its forests (Pacheco-Aquino, 2014).

The historical, socioeconomic context and the governance of the communities of the *Sierra Norte* region where *Ixtlán* is located are relatively similar. At least 25 more communities currently have forest management programs for timber exploitation (Bray and Durán, 2014) which estimate the values of the forest biomass and its annual current increase. Thus, a methodology like the one used here allows these communities to quantify carbon sequestration and storage in their plots.

In *Ixtlán*, as in the rest of the localities around it, the financial income from the sale of carbon credits may contribute to enhance the valuation and care of the forests, as it has been proven that it is possible to conciliate lumber exploitation and carbon sequestration projects (Olschewski and Benítez, 2010, Bray, 2012).

Management and incentives to promote carbon balance

The community of *Ixtlán* took control of the management of its forests in 1980, when the forest logging concessions ended, and has tried ever since to exploit them rationally; for this purpose, it has invested work and resources to improve the characteristics of the forest mass; as a result, there is no threat of deforestation or forest degradation (Pacheco-Aquino, 2014).

Until 2004, only the selection method -consisting in the annual extraction of lumber from 1 000 hectares- was utilized; however, after the adoption of clear cutting by strips, an average of 150 hectares per year is being exploited,



Hasta 2004, para el aprovechamiento maderable solo se usaba el método de selección, que consiste en extraer madera anualmente en 1 000 hectáreas, pero al optar por el método de selección grupal en franjas (matarrasa), en promedio se están aprovechando 150 hectáreas al año; es decir, se ha reducido el área de impacto, e intensificado el aprovechamiento de algunas áreas. Con ello, se redujo el número y las dimensiones de los carriles de arrastre y arrime dentro de las franjas de las matarrasas. Estas prácticas, son acordes con el manejo forestal mejorado (Griscom *et al.*, 2009), que tiene como fin reducir el riesgo de degradación en los bosques por actividades de la extracción maderable. Además, con el manejo forestal sustentable que hace la comunidad (FSC, 2014b) no solo se está tratando de maximizar la producción de madera, sino que se cuidan los bosques de incendios, plagas y otros disturbios antrópicos, y con ello, se contribuye a la mitigación del cambio climático.

Con este referente, y con base en la preocupación por la amenaza que representa el cambio climático global, las acciones de mitigación son urgentes; además, dado que se dispone de grandes fondos internacionales para asegurar los almacenes de carbono forestal y promover la captura de CO₂ (CCMSS, 2014; IPCC, 2014), sería justo que comunidades como Ixtlán recibieran algún incentivo por lo que hacen, y para que continúen haciéndolo. Lo anterior, debido a que se reconoce que las acciones de mitigación del cambio climático en los bosques comerciales no son fáciles, no ocurren en automático y que el manejo mejorado implica inversiones (Putz *et al.*, 2008; Griscom *et al.*, 2009; Post *et al.*, 2012).

Aunque hay escépticos del esquema de incentivos de carbono, y a veces se duda de si con la extracción de madera hay adicionalidad, los resultados muestran que en Ixtlán es posible.

A partir de que los mercados de carbono forestal buscan implementar proyectos para captura y almacenamiento de CO₂ por cuando menos dos o tres décadas (Angelsen *et al.*, 2013), Ixtlán podría operar alguno de ellos; ya que con la construcción de franjas y las reforestaciones se logra iniciar la recuperación de la biomasa forestal casi desde el primer año posterior a la extracción, y los turnos en su programa de manejo son de 40 a 60 años. Aunado a esto, se debe tener en cuenta que del total de madera que se aprovecha, casi la mitad sigue almacenada en productos que retienen el carbono por cuando menos una década (Profft *et al.*, 2009); mientras que las ramas y hojas permanecen en el bosque para incorporarse como materia orgánica (Post *et al.* 2012).

En Ixtlán se cumplen gran parte de los requerimientos para operar proyectos de carbono, ya que ofrece seguridad en tenencia de la tierra, gobernanza local, cultura forestal, capacidad organizativa y empresarial, así como disposición para experimentar e innovar acciones de manejo en sus bosques (Canadell y Raupach, 2008; Bray, 2010; Mathews, 2010,

i.e. the impact area has been reduced by intensifying the exploitation in certain strips. This has brought about a reduction of the number and size of the haul roads within the clear-cutting strips. These practices are in compliance with the improved forest management (Griscom *et al.*, 2009), which intends to reduce the degradation risk in the forests due to lumber extraction. Furthermore, the sustainable forest management carried out by the community (FSC, 2014b) is not only trying to maximize timber production but also to prevent forest fires, pests and other anthropic disturbances and thus to contribute to abate the climate change.

With this referent, and based on the concern for the threat entailed by the global climate change, which urgently calls for abatement actions, as well as on the availability of large international funds to secure the forest carbon stocks and promote CO₂ sequestration (CCMSS, 2014; IPCC, 2014), it would be only fair to provide an incentive to communities like Ixtlán for the actions that they carry out and to provide continuity to these actions. This is because we acknowledge that it is not easy to find actions for climate change abatement in commercial forests; these actions do not occur automatically, and improved management requires some investment (Putz *et al.*, 2008; Griscom *et al.*, 2009; Post *et al.*, 2012).

Although some are skeptical of the carbon incentive scheme and sometimes there is doubt as to whether or not logging entails additionality, the results show that it is possible to apply this scheme in Ixtlán.

The forest carbon markets have been seeking to implement CO₂ sequestration projects during at least two or three decades (Angelsen *et al.*, 2013), and Ixtlán is in a position to operate one of these projects, since, with the use of clear-cutting strips and reforestations, the recuperation of the forest biomass can start little over one year after the logging, and the management program considers 40- to 60-year terms. Another factor to consider is that almost one half of the extracted lumber remains stored in products which retain carbon for at least one decade (Profft *et al.*, 2009), while the branches and leaves remain in the forest and are incorporated as organic matter (Post *et al.* 2012).

Most of the requirements to operate carbon projects are met by Ixtlán, since it offers safe land tenure, local governance, forest culture, organizational and business capacity, as well as willingness to experiment and innovate forest management actions (Canadell and Raupach, 2008; Bray, 2010; Mathews, 2010, CCMSS, 2014). This community's participative model for directing the management effectively can also be used to monitor, register and verify the carbon stocks, thereby not only contributing to improve the local technical capacity but also making it possible to attain relatively low costs (McCall, 2011; Skutsch and McCall, 2012; Edward *et al.*, 2014).

CCMSS, 2014). Este modelo participativo de la comunidad para orientar de manera eficiente el manejo también podría abarcar el monitoreo, registro y verificación del carbono, lo cual no solo ayudaría a mejorar la capacidad técnica local, sino hacerlo a costos relativamente bajos (McCall, 2011; Skutsch y McCall 2012; Edward *et al.* 2014).

Si se toma como referente el precio de 10 dólares la tonelada de CO₂e, que se maneja en el mercado voluntario (Lobos *et al.*, 2005; Bray, 2012), y que en Ixtlán se tiene un potencial de captura de carbono de 58 577.24 toneladas de CO₂e año⁻¹ en el AMF (8 996.75 ha), la comunidad podría tener ingresos adicionales que quizá no superan el ingreso anual por la venta de madera, pero les permitiría invertir en mejorar, aún más, el manejo forestal que realiza; por ejemplo, cubrir el costo de implementar el uso de cables aéreos para transportar madera de sitios con accesos difíciles, o donde los caminos inducen la erosión.

Conclusiones

La aproximación metodológica para cuantificar el carbono del área de manejo forestal (AMF) de la comunidad de Ixtlán, fue relativamente sencilla, rápida y se basó en información disponible en el programa de manejo forestal para el aprovechamiento maderable. Aunque tiene limitaciones, porque subestima el contenido de carbono del bosque al considerar solo la biomasa de troncos de pinos y encinos, permite generar una primera estimación cuantitativa, la cual indica que el AMF mantiene un importante almacén de carbono, tiene potencial para su captura y que parte del carbono removido con la madera extraída se empieza a recuperar desde el primer año, posterior a la extracción. Las estimaciones resultantes correspondieron, en orden de magnitud, con los valores citados para otros bosques de pino-encino de México.

Esta información podría servir de línea base para que la comunidad de Ixtlán, a la par que continua con la producción de madera, desarrolle un proyecto de carbono. La venta del carbono capturado es un incentivo para que la comunidad, sin sacrificar metas económicas, sociales o ambientales continúe y mejore el manejo forestal, se capacite y se involucre en el monitoreo del carbono. La aproximación del estudio podría implementarse en comunidades aledañas a Ixtlán, e incluso en otros bosques comunitarios del país que cuenten con programas de manejo forestal.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Based on the price of 10 dollars per ton of CO₂e handled by the voluntary market (Lobos *et al.*, 2005; Bray, 2012), and on the carbon sequestration potential of the FMA (8 996.75 ha) of Ixtlán, valued in 58 577.24 tons of CO₂e year⁻¹, the community would thereby obtain an additional income which might not surpass its annual income from the sale of wood but would enable it to invest in improving its forest management further; such income might, for instance, cover the costs of implementing the use of aerial cables to transport lumber from sites that are difficult to access or where roads may induce erosion.

Conclusions

The methodology used for the quantification of carbon in the forest management area (FMA) of the community of Ixtlán was relatively simple and rapid and was based on the information on timber exploitation made available by the forest management program. Although this approach has certain limitations, e.g. it underestimates the carbon content of the forest as it considers only the biomass of pine and oak tree stems, it allows a first quantitative estimation, an indication that the FMA maintains a significant carbon storage, has a potential for carbon sequestration, and allows the recovery, one year after the logging, of a part of the carbon removed along with the extracted lumber. The resulting estimated magnitudes agreed with the values quoted for other pine-oak forests of Mexico.

This information may serve as a baseline for the community of Ixtlán to develop a carbon project while it continues to produce timber. The sale of sequestered carbon is an incentive for the community to maintain and improve its forest management, receive training and become involved in carbon monitoring, without sacrificing its economic, social or environmental goals. The study approach could be implemented in communities in the vicinity of Ixtlán and even in other community forests with forest management programs across the country.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Contribution by author

Guadalupe Pacheco-Aquino: compilation of the data base, information analysis, writing, review and correction of the manuscript; Elvira Durán Medina: design, execution, study analysis, writing, review and correction of the manuscript; José Antonio Benjamín Ordóñez-Díaz: data analysis and writing of the manuscript.



Contribución por autor

Guadalupe Pacheco-Aquino: recopilación de la base de datos, análisis de la información, redacción, revisión y corrección del manuscrito; Elvira Durán Medina: diseño, ejecución, análisis de estudio, redacción, revisión y corrección del escrito; José Antonio Benjamín Ordóñez-Díaz: análisis de datos y redacción del manuscrito.

Agradecimientos

Al Conacyt por la beca otorgada al primer autor, al IPN (proyecto SIP-2013-1162, y beca PIFI) y al programa UCMEXUS-Conacyt (Grant: CN-11-535) por apoyar los trabajos de campo; a la comunidad de Ixtlán por permitirnos disponer de información para el estudio. A la Dra. María de Jesús Ordóñez y la Biol. Itsel Fernanda Jiménez por apoyar con las estimaciones de carbono y al Dr. David B. Bray y dos árbitros anónimos por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Álvarez, S. y A. Rubio. 2013. Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca, México. Aplicación del modelo CO₂fix v.3.2. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 19 (1): 125-137.
- Angelsen, A., M. Brockhaus, W. D. Sunderlin y L. V. Verchot. 2013. Análisis de REDD+: Retos y Opciones. CIFOR, Bogor, Indonesia. pp. 284-285.
- Asner, G. P., G. V. N. Powell, J. Mascaro, D. E. Knapp, J. K. Clark, J. Jacobson, T. Kennedy-Bowdoin, A. Balaji, G. Páez-Acosta, E. Victoria, L. Secada, M. Valqui and R. F. Hughes. 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences 107 (38): 1-20.
- Avendaño H., D., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. Etchevers D. 2009. Estimación de la biomasa y carbono en árboles de *Abies religiosa*. RevistaFitotecnica Mexicana 32(3):233-238.
- Bateman, I. and A. A. Lovett. 2000. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. Journal of Environmental Management 60 (4):301-323.
- Bray, D. B., L. Merino P. and D. Barry. 2005. The community forests of Mexico: managing for sustainable landscapes. University of Texas Press. Austin, TX, USA. 372 p.
- Bray, D. B., C. Antinori, J. and M. Torres-Rojo. 2006. The Mexican Model of Community Forest Management. Forest Policy and Economics 8:470-484.
- Bray, D. B. 2010. When capitalism meets common property. Americas Quarterly Winter: 31-35.
- Bray, D. B., D. Barry, S. Madrid, L. Merino e I. Zúñiga. 2010. El manejo forestal sostenible como estrategia de combate al cambio climático: las comunidades nos muestran el camino. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible. México, D.F., México. 21 p.
- Bray, D. B. 2012. Carbon and Community Development: An Experiment in Oaxaca. Grassroots Development 33: 15-21.
- Bray, D. B., E. Durán and O. Molina A. 2012. Multiscale governance and indigenous/community conserved areas in Oaxaca, Mexico. International Journal of the Commons 6:151-178.
- Bray, D. B. 2013. When the State Supplies the Commons: Origins, Changes, and Design of Mexico's Common Property Regime. Journal of Latin American Geography 12(1): 33-55.
- Bray, D. B. and E. Durán. 2014. Options for Reducing Carbon Emissions in Forest Management in the Oaxaca and Chihuahua Áreas de Acción Temprana REDD+ (AATR). The Nature Conservancy (Programa M-REDD+). México, D. F., México. 173 p.
- Bucki, M., D. Cuyppers, P. Mayaux, F. Achard, C. Estreguil and G. Grassi. 2012. Assessing REDD+ performance of countries with low monitoring capacities: the matrix approach. Environmental Research Letters 7: 1-13.

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to Conacyt for the grant awarded to the first author, to IPN (project SIP-2013-1162, and PIFI scholarship) and to the UCMEXUS-Conacyt program (Grant: CN-11-535) for supporting the field work, and to the community of Ixtlán for making information available for this study. To Dr. María de Jesús Ordóñez and biologist Itsel Fernanda Jiménez, for endorsing the carbon estimations, and to Dr. David B. Bray and two anonymous arbiters, for their valuable comments, which contributed to the enhancement of the manuscript.

End of the English version



- Canadell, J. G. and M. R. Raupach. 2008. Managing Forests for Climate Change Mitigation. Science 320:1456-1457.
- Castellanos J., F., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. Agrociencia 30 (1): 123-128.
- Comunidad de Ixtlán de Juárez (CIJ). 2003. Programa de manejo forestal para la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Comunidad de Ixtlán de Juárez /Técnica Informática Aplicada S.A. (TIASA). Ixtlán de Juárez, Oax., México. 231 p.
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). 2014. La puesta en marcha de REDD+ en México: El Acuerdo con el FCPF. Red de Monitoreo de Políticas Públicas, Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible. México, D. F., México. 6 p.
- Doll, U., O. Vallejosb, N. Bilbao y C. Jara. 2008. Estimación preliminar de la retención de carbono en raíces finas y mantillo de un renoval de *Nothofagus glauca* de la precordillera andina de la Región del Maule, Chile. Bosque 29(1): 91-96.
- Durán, E., D. Bray B., A. Velázquez and A. Larrazabal. 2011. Multi-Scale Forest Governance, Deforestation, and Violence in Two Regions of Guerrero, Mexico. World Development 39:611-619.
- Edwards, K., H. Scheyvens, J. Stephenson and T. Fujisaki. 2014. Community Based Forest Biomass Monitoring. Training of Trainers Manual. Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan. 216 p.
- Estrada, M. and S. Joseph. 2012. Baselines and monitoring in local REDD+ projects. In: Angelsen, A. (ed). Analysing REDD+ Challenges and choices. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia. pp. 247-260.
- Flores N., P. 2010. Impacto del proceso de declinación sobre la productividad primaria neta en bosques de *Abies religiosa*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx., México. 74 p.
- Forest Stewardship Council (FSC). 2014a. Ten rules for responsible forest management. Forest Stewardship Council. The Rainforest Alliance. México. <https://ic.fsc.org/the-ten-principles.103.htm> (8 de julio de 2014)
- Forest Stewardship Council (FSC). 2014b. Certificado a la Unidad Comunal Forestal y de Servicios de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, de la Cadena de Custodia 2012-2017. Forest Stewardship Council/ The Rainforest Alliance. México. <http://www.tipmuebles.com> (25 de abril del 2014).
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios. México, D.F., México. 246 p.

- González Z, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de Carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* spp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Maestría. CATIE. Cartago, Costa Rica. 81 p.
- Griscom, B., D. Ganz, N. Virgilio, F. Price, J. Hayward, R. Corte, G. Dodge, J. Hurd, F. L. Lowenstein and B. Stanley. 2009. The Hidden Frontier of Forest Degradation. Review of the Science, Policy and Practice of Reducing Degradation Emissions. The Nature Conservancy. Arlington, VA, USA. 76 p.
- Hardiman, B. S., C. M. Gouch, A. Halperin, K. L. Hofmeister, L. E. Nave, G. P. Bohrer and P. S. Curtis. 2013. Maintaining high rates of carbon storage in old forests: A mechanism linking canopy structure to forest function. *Forest Ecology and Management* 298: 111-119.
- Hoover, C. M. 2008. Field measurements for forest carbon monitoring: A landscape-scale approach. Springer. Durham, NH, USA. 44 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. In: Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds.). The Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Kanagawa, Japan. 632 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza. 104 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza. 72 p.
- Lobos A., G., O. Vallejos B., C. Caroca J. y C. Marchant C. 2005. El Mercado de los Bonos de Carbono ("bonos verdes"): Una Revisión Interamericana. *Journal of Environment and Tourism* 1(1): 42-52.
- McCall, M. K. 2011. Local participation in mapping, measuring and monitoring for community carbon forestry. In: Skutsch, M. (ed.). Community forest monitoring for the carbon market: opportunities under REDD. Earthscan, London, UK. 208 p.
- Mathews, A. 2010. Instituting Nature. Authority, Expertise, and Power in Mexican Forests. The MIT Press. Cambridge, MA, USA. 304 p.
- Martínez L., J. 2010. Eso que llaman comunalidad. Conaculta-Campo-Fundación Harp Helú-Secretaría de Cultura-Oaxaca. Oaxaca de Juárez, Oax., México. 190 p.
- Meffe, G., L. Nielsen, R. L. Knight and D. Schenborn. 2002. Ecosystem Management Adaptive, Community-Based Conservation. Island Press. Washington, DC, USA. 333 p.
- Olschewski, R. and P. Benitez C. 2010. Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics* 16(1): 1-10.
- Olguín, M., O. Masera y A. Velázquez. 2003. El potencial de captura de carbono en mercados emergentes. In: Velázquez, A., A. Torres y G. Bocca (eds.). Las enseñanzas de San Juan. INE-Semarnat. México, D.F., México. pp. 489-511.
- Ordóñez D., J. A. B., B. H. J. de Jong, F. García-Oliva, F. L. Aviña, J. V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacán, México. *Forest Ecology and Management* 7 (255): 2074-2084.
- Ordóñez D., J. A. B., T. Hernández T., A. Galicia N., I. F. Jiménez Á., A. Núñez R., J. D. León G., C. Tapia, J. F. Torres O., M. H. Quiroz, M. J. Ordóñez D., F. A. González, J. A. Carrera, L. E. Piña, R. Gómez, H. Cervantes y G. E. Álvarez-Manilla F. 2013. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. Capítulo VI. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México, D. F., México. 412 p.
- Ostrom, E. 1990. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 271 p.
- Pacheco-Aquino, G. 2014. Análisis del carbono forestal en la comunidad de Ixtlán de Juárez y el potencial para que ésta reciba incentivos por carbono. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, CIDIIR-Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán, Oax., México. 109 p.
- Pérez-Ramírez, S., M. I. Ramírez, P. Jaramillo-López y F. Bautista. 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.
- Profft, M. M., G. E. Weber, E. Weller and E. D. Schulze. 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. *European Journal of Forest Research* 128:399-413.
- Post, W. M., R. C. Izaurralde, T. O. West, M. A. Liebig and A. W. King. 2012. Management opportunities for enhancing terrestrial carbon dioxide sinks. *Frontiers in Ecology and Environment* 10(10):554-561.
- Putz, F. E., P. A. Zuidema, M. A. Pinard, R. G. A. Boot, J. A. Sayer, D. Sheil, P. Sist and E. J. K. Vanclay. 2008. Improved Tropical Forest Management for Carbon Retention. *PLoS Biology* 6(7):1368-1369.
- Rights and Resources Initiative (RRI). 2014. What future for reform? Progress and slowdown in forest tenure reform since 2002. Rights and Resources Initiative. Washington, DC, USA. 76 p.
- Rodríguez L., R., J. Jiménez P., Ó. A. Aguirre C., E. J. Treviño G. y R. Razo Z. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5(3): 317-327.
- Ruiz-Aquino, F., J. Valdez-Hernández I., F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortiz, A. Romero-Manzanares y M. Fuentes-López E. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques* 20 (2): 33-48.
- Rügnitz, M. T., M. Chacón L. y R. Porro. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) - Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú. 79 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal (Semarnat-Conafor). 2010. Visión de México sobre REDD+ hacia una estrategia nacional. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jal., México. 56 p.
- Saynes, V., J. D. Etchevers, L. Galicia and J. Campo. 2012. Soil carbon dynamics in high-elevation temperate forest of Oaxaca (Mexico): thinning and rainfall effects. *Bosque* 33(1):3-11.
- Skutsch, M. and M. K. McCall. 2010. Reassessing REDD: governance, markets and the hype cycle. *Climatic Change* 100:395-402.
- Skutsch, M. and M. K. McCall. 2012. The role of community forest management in REDD+. *Unasylva* 239(63):51-56.

