



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

**“ESQUEMA COMPENSATORIO PARA LA REDUCCIÓN DEL
CARBONO ATMOSFÉRICO, EN BASE AL MANEJO DE
BOSQUES TEMPLADOS EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO”**

Para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Ambientales

P R E S E N T A

Ing. Noé Ronquillo Gorgúa

Director

Dr. Ramón Razo Zárate

Codirector

Dr. Juan Hernández Ortiz

Mineral de la Reforma, Hidalgo. Junio de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo. a 19 de junio de 2023

Número de control: ICBI-D/748/2023

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al Ing. Noé Ronquillo Gorgúa, alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales (Directo) con número de cuenta 394512, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Esquema compensatorio para la reducción del carbono atmosférico, en base al manejo de bosques templados en Zacualtipán, Hidalgo" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

SECRETARIO Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

1er VOCAL Dr. Juan Hernández Ortiz

2do VOCAL Dr. Ramón Razo Zárate

3er VOCAL Dra. Claudia Romo Gómez



Four handwritten signatures in blue ink, each on a horizontal line, corresponding to the names listed to the left.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Director del ICBI

CRG

Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

La presente tesis titulada: “**Esquema compensatorio para la reducción del carbono atmosférico, en base al manejo de bosques templados en Zacualtipán, Hidalgo**” realizada por el pasante **Noé Ronquillo Gorgúa**, bajo la dirección del Dr. Ramón Razo Zárate y el comité asesor indicado, ha sido aprobada por los mismos y aceptada como requisito parcial para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

Comité Asesor

Dr. Ramón Razo Zárate
Director

Dr. Juan Hernández Ortiz
Codirector

Rodrigo Rodríguez Laguna
Asesor

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Asesor

Dra. Claudia Romo Gómez
Asesor

Pachuca de Soto, Hgo. Junio de 2023.

Resumen de producción científica

Artículo científico publicado:

- Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales, 28(3). doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009 (Agosto, 2022).

Artículo científico enviado:

- Concentración de carbono para diferentes estructuras de 30 especies forestales de Hidalgo, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales (en evaluación).

Eventos académicos:

- 7° Congreso Nacional de Mitigación del Daño Ambiental en el Sector Agropecuario y Forestal de México. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro, octubre de 2020.
- I Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas, Forestales y Agronegocios. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Delicias, Chihuahua, mayo de 2021.
- XV Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Sociedad Mexicana de Recursos Forestales, A. C. y Universidad de Guadalajara. Zapopan Jalisco, octubre de 2021.
- I Congreso Forestal Internacional. Asociación Mexicana de Profesionales Forestales, A. C. Guadalajara, Jalisco, noviembre de 2022.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

Resumen	1
1. Introducción general.....	2
1.1 Objetivo general.....	16
1.1.1 Objetivos específicos:	16
1.2 Hipótesis.....	16
1.3 Referencias	16

CAPÍTULO 2

2. Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense	22
Resumen	22
Abstract.....	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 Materiales y métodos.....	25
2.2.1 Área de estudio.....	25
2.2.2 Descripción de etapas de desarrollo del bosque.....	26
2.2.3 Sitios de muestreo y medición de variables.....	29
2.2.4 Área basal	31
2.2.5 Volumen.....	31
2.2.6 Biomasa.....	32
2.2.7 Carbono aéreo	32
2.2.8 Análisis estadístico	32
2.3 Resultados y discusión	33
2.3.1 Características dasométricas por etapa de desarrollo.....	33
2.3.2 Biomasa aérea y contenido de carbono	34

2.4 Conclusiones.....	39
2.5 Referencias.....	40

CAPÍTULO 3

3. Concentración de carbono para diferentes estructuras de 30 especies forestales de Hidalgo, México.....	45
Resumen.....	45
Abstract.....	46
3.1 Introducción.....	47
3.2 Materiales y métodos.....	48
3.2.1 Área de estudio.....	48
3.2.2 Selección de sitios de muestreo.....	49
3.2.3 Preparación de la muestra.....	49
3.2.4 Análisis estadístico.....	52
3.3 Resultados y discusión.....	52
3.3.1 Especies leñosas identificadas en el área de estudio.....	52
3.3.2 Características por componente estructural.....	53
3.3.3 Coeficientes de carbono para especies forestales.....	53
3.4 Conclusiones.....	57
3.5 Referencias.....	57

CAPÍTULO 4

4. Secuestro de carbono atmosférico por bosques cultivados y su potencial en el mercado voluntario de carbono.....	60
Resumen.....	60
Abstract.....	61
4.1 Introducción.....	61
4.2 Materiales y métodos.....	65
4.2.1 Área de estudio.....	65
4.2.2 Estándares del mercado voluntario de carbono para bosques mexicanos.....	66
4.2.2.1 Atributos de acción climática.....	66
4.2.2.2 Alternativas viables para bosques mexicanos.....	68

4.3 Resultados y discusión	71
4.3.1 Análisis de estándares del mercado voluntario de carbono	71
4.3.2 Selección de estándar	74
4.3.3 Selección del área	75
4.3.4 Evaluación de factibilidad.....	75
4.3.5 Registro de proyecto.....	80
4.3.6 Línea base y salvaguardas	80
4.3.7 Verificación inicial.....	83
4.3.8 Emisión de bonos	84
4.3.9 Monitoreo, Reporte y Verificación	86
4.4 Conclusiones.....	87
4.5 Referencias	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales estándares que figuran en el mercado voluntario de carbono para el sector forestal (silvicultura).	10
Cuadro 2. Variables dasométricas por etapa de desarrollo de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.	33
Cuadro 3. Biomasa aérea y contenido de carbono por árbol durante las etapas de desarrollo del bosque cultivado de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.	35
Cuadro 4. Estimación de biomasa y carbono aéreos para cada etapa de desarrollo del bosque cultivado de <i>Pinus patula</i> en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.	37
Cuadro 5. Estimaciones de carbono almacenado en bosques templados de México.	38
Cuadro 6. Concentración de carbono para 30 especies forestales de Hidalgo, México.	53
Cuadro 7. Concentración de carbono por componente estructural.	55
Cuadro 8. Enfoques y soluciones a los desafíos metodológicos de los estándares principales del mercado voluntario de carbono.	71
Cuadro 9. Resumen de los enfoques y soluciones a los desafíos críticos de implementación para estándares principales.....	72
Cuadro 10. Valoración de aplicabilidad de estándares del mercado voluntario de carbono para los bosques del ejido Atopixco.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presupuesto histórico CONAFOR (Fuente: SEMARNAT, 2022).	12
Figura 2. Etapas de crecimiento del arbolado de un bosque de <i>Pinus patula</i> en la Sierra Alta Hidalguense.	29
Figura 3. Sitios de muestreo de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México.	30
Figura 4. Crecimiento del arbolado en las etapas de desarrollo de <i>Pinus patula</i> en ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.	34
Figura 5. Biomasa aérea y densidad de arbolado promedio por etapa de desarrollo en el bosque cultivado de <i>Pinus patula</i> del ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.	36
Figura 6. Colecta y preparación de muestras, donde: a). muestra botánica de especies, b). Identificación y c). Secado y seccionado de muestras.	49
Figura 7. Triturado y homogeneización de muestras, donde: a). mortero triturador y b). muestras trituradas de las partes estructurales (hoja, rama, tallo).	50
Figura 8. Preparación de muestras individuales, donde a). esterilización de boats con ácido nítrico, b). desecador de cristal con vacío, c), secado en Mufla y d). peso de muestra en balanza analítica.	51
Figura 9. Equipo TOC Analyzer, modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®.	51
Figura 10. Concentración promedio de carbono por especie (Fuente: ejido Atopixco 2021).	55
Figura 11. Concentración de carbono para la especie <i>Pinus patula</i> en sus diferentes etapas de desarrollo: brinjal (BR), monte bravo (MB), vardascal (VR), latizal (LT) y fustal (FT), (Fuente: ejido Atopixco 2021).	56
Figura 12. Proceso de certificación de bonos de carbono en bosques bajo manejo forestal del ejido Atopixco.	74
Figura 13. Asamblea general de ejidatarios para tratar asuntos relacionados con el proyecto de carbono forestal en ejido Atopixco.	77
Figura 14. Esquema ilustrativo de adicionalidad de carbono en el bosque.	83

CAPITULO 1

Resumen

Los bosques son el ecosistema terrestre que captura la mayor cantidad de CO₂ en el mundo, constituyen un elemento trascendental con relación al combate del cambio climático, no solo por su rol en la captura y secuestro de carbono a través del proceso denominado fotosíntesis, sino también por el efecto de sustitución de materiales útiles a la humanidad, mediante la utilización de productos maderables que implica una potencial disminución en el empleo de energías fósiles. En ese contexto, los bosques cultivados en la Sierra Alta Hidalguense generan bienes y servicios ambientales asociados al ecosistema forestal, como la captura de carbono que tiene potencial de mercado para contribuir a la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad silvícola. El presente estudio realiza una estimación por métodos no destructivos de la biomasa y carbono aéreo secuestrado en un bosque bajo manejo forestal en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, cuya especie de principal interés comercial es *Pinus patula* Schiede ex Schldl. & Cham., cultivado en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, donde los árboles en etapa de fustal tuvieron en promedio 294.8 kg de biomasa. Las estimaciones de carbono aéreo en las etapas de desarrollo de *P. patula* fueron: brinzal (0.94 Mg C·ha⁻¹), monte bravo (3.73 Mg C·ha⁻¹), vardascal (5.05 Mg C·ha⁻¹), latizal (18.18 Mg C·ha⁻¹) y fustal (81.40 Mg C·ha⁻¹). El método no destructivo permitió estimaciones confiables sobre el contenido de carbono de dicha especie, las variables dasométricas (altura y diámetro normal) permitieron realizar dichas estimaciones.

De igual manera se logró identificar el potencial de captura de carbono en las secciones estructurales de 30 especies forestales presentes en el área de estudio, mediante el uso el equipo *Toc Solids Analyzer* para determinar el contenido de carbono orgánico. Se realizaron tres repeticiones para cada componente estructural (hojas, ramas

y fuste). Agrupando los tres componentes estructurales, la especie que presentó mayor concentración fue *Pinus pseudostrabus* (50.28 %), seguido por *P. greggii*, *P. teocote* y *P. patula*; y la de menor concentración promedio fue *Quercus deserticola* (43.44 %). Es importante destacar que los máximos valores son ocupados por el grupo de coníferas existentes en el bosque del ejido. Las estimaciones realizadas indican que las coníferas favorecen la producción maderable y, su eficiencia como sumideros de carbono en los bosques cultivados motiva su incorporación a esquemas diseñados para mitigar el calentamiento global.

En los últimos años el Mercado Voluntario de Carbono (MVC) se consolida como un instrumento económico atractivo y socialmente responsable para empresas, industrias, organizaciones e individuos que buscan rentabilidad y compensar las emisiones de GEI. Dado que los árboles absorben CO₂ de la atmósfera de manera natural y lo almacenan en su biomasa a través del proceso fotosintético, y destacando el continuo incremento en la demanda global voluntaria de créditos de carbono; se propone un esquema de compensación financiera para los bosques cultivados en la Sierra Alta Hidalguense, mediante su incorporación a un estándar internacional de certificación del MVC que permita validar y apreciar la contribución del manejo forestal sustentable en el combate al Cambio Climático. El MVC representa una importante oportunidad de diversificación productiva e incremento a la rentabilidad silvícola en terrenos forestales que actualmente y desde hace décadas generan beneficios económicos debido al aprovechamiento de productos forestales maderables que permite mejorar continuamente la calidad de vida de los dueños de bosques en la zona de estudio.

1. Introducción general

Considerado como un fenómeno que se manifiesta mediante una variación estadística en la temperatura promedio del planeta, que persiste durante un período prolongado, y que provoca el incremento de los gases de efecto invernadero (principalmente el CO₂), teniendo consecuencias en la intensidad de los fenómenos

hidrometeorológicos a nivel mundial, el cambio climático es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad (Jiménez *et al.*, 2013). Debido a la gran cantidad de factores implicados, este nunca ha sido estático. Como consecuencia de alteraciones en el balance energético, el clima está sometido a variaciones en todas las escalas temporales desde decenios a miles y millones de años (Dickie y Coronel, 2016).

La respuesta política internacional al cambio climático comenzó con la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992. Esta convención establece un marco para la acción cuyo objetivo es la estabilización de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, para evitar que interfiera peligrosamente con el sistema climático (Eguren, 2004). Entró en vigor el 21 de marzo de 1994 y actualmente está ratificada por 197 partes o países. De acuerdo con Ranero y Covalada (2018), de manera general, sus dos grandes logros en la lucha contra el cambio climático han sido el alcance de dos acuerdos globales: el Protocolo de Kyoto (adoptado en 1997) y el Acuerdo de París (adoptado en 2015).

Entre las referencias más relevantes, destaca el protocolo de Kyoto, que se establece durante la tercera Conferencia de las partes (COP3), celebrado en 1997. En donde indica que los denominados Países industrializados (para efectos del protocolo de Kyoto se denominan “países Anexo 1”) deben reducir sus emisiones y países sin obligaciones de reducción No Anexo 1. Establece mecanismos válidos para que los países (Anexo 1) den cumplimiento de sus metas en tres formas, también denominados mecanismos de mercado (Álvarez-Gallego, 2009):

- En el propio país.
- En otro país Anexo 1 (IC).
- En un país No Anexo 1 (MDL).

Lo anterior, podría ser cubierto conforme a los mecanismos de flexibilidad, y transacción de emisiones, previsto en el Artículo 17. Régimen de transacción de emisiones internacional que permite a los países industrializados comprar y vender créditos de emisiones entre ellos mismos.

Implementación Conjunta (IC). Los países Anexo 1 pueden adquirir unidades de reducción de emisiones a través de financiamiento de ciertos tipos de proyectos en otros países industrializados.

Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Artículo 12. Países industrializados pueden financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo, y recibir créditos por ello. EL MDL es un esquema creado por el Protocolo de Kyoto que permite a los proyectos de reducción de emisiones de GEI el acceso a financiamiento a través de la venta de bonos de carbono. Existe una gran variedad de tipos de proyecto, los cuales abarcan desde actividades industriales hasta medidas de ahorro energético en hogares, sin embargo, cualquier oportunidad de proyecto identificada debe cumplir con ciertos criterios de elegibilidad y pasar por un procedimiento riguroso para garantizar que la reducción de emisiones es real, medible, verificable, y adicional.

La limitación del “derecho de emisión de carbono” a que dio lugar el Protocolo de Kyoto, posicionó a los países desarrollados en una disyuntiva, en favor del cumplimiento del compromiso de reducir sus emisiones: sustituir las fuentes de combustible, adquirir tecnología amigable con el ambiente y/o bajar los niveles de producción (consumo energético). Una alternativa más económica, que están siguiendo en su mayoría estos países, es la aportación de fondos para el desarrollo de proyectos en América Latina y el Caribe.

Los mecanismos de comercio de reducción de emisiones propuestos y regidos por el Protocolo de Kyoto, constituyen el mercado regulado. En él participan países, empresas e individuos que quieren disminuir sus emisiones de carbono a la atmósfera. El mercado regulado comprende tres esquemas de comercio. Comercio internacional de emisiones (CIE), derecho de comerciar parte de sus “derechos de emisión” a otros países y se venden como unidades de monto asignado (UMA). Mecanismo de implementación conjunta (MIC), reclama crédito por la reducción de emisiones, producto de inversiones realizadas en otros países desarrollados, con lo que se transfieren unidades de reducción de emisiones (URE). Mecanismo de desarrollo limpio (MDL), proyectos realizados en países en vías de desarrollo que generan certificados de reducción de emisiones (CER, por sus siglas en inglés).

La Convención Marco de 1992 supuso un parteaguas climático en la política global, al establecer, por medio de un tratado internacional, el propósito de acción climática de los países: la estabilización de las emisiones de GEI con el fin de limitar sus efectos en el clima. Desde entonces se han venido firmando distintos tratados dirigidos al cumplimiento de este objetivo (Garay, 2020). El primero fue el Protocolo de Kyoto de 1997, en el que se establecieron límites concretos a las emisiones de los países desarrollados. Sin embargo, la no ratificación de Estados Unidos, por ser entonces el más contaminante, así como la escasa participación en el segundo periodo de compromiso, debilitaron el espíritu del acuerdo de conseguir un compromiso de reducción global.

Con objeto de resolver estos problemas y avanzar hacia el establecimiento de objetivos más ambiciosos, en diciembre de 2015 se adoptó un nuevo tratado conocido como el Acuerdo de París. A diferencia del Protocolo, en el Acuerdo se fijó un objetivo general de limitación del aumento de la temperatura media del planeta en un máximo de 2 grados. En este caso no solo quedaron obligados los Estados desarrollados, sino que el Acuerdo recogió también a los países en desarrollo.

El Acuerdo de París reconoce el papel fundamental que cumplen los bosques en la lucha contra el cambio climático, ya que almacenan carbono y evitan el calentamiento global. El objetivo del acuerdo es prevenir la deforestación y promover el cuidado de los bosques, a través de mecanismos como el Programa REDD+, que actúa generando incentivos positivos a los países en vías de desarrollo para proteger y usar sus bosques de manera sostenible, en un marco jurídico adecuado, con la implementación de políticas concretas orientadas hacia una mayor sostenibilidad en los usos del territorio y el desarrollo (Zeman, 2018).

En lo referente a la gestión forestal, el Acuerdo de París realza la importancia de los bosques para responder al cambio climático y adopta el mandato a todos los países firmantes para conservar los sumideros de carbono en los bosques (Martínez-Navarro, 2022).

En concreto, en el Artículo 5.1 del Acuerdo de París se expone que:

“Las Partes deberían adoptar medidas para conservar y aumentar, según corresponda, los sumideros y reservorios de gases de efecto invernadero a que se hace referencia en el artículo 4, párrafo 1 d) de la Convención, incluidos los bosques”.

De igual manera, en el apartado 2 del artículo continúa:

“Se alienta a las Partes a que adopten medidas para aplicar y apoyar, también mediante los pagos basados en los resultados, el marco establecido en las orientaciones y decisiones pertinentes ya adoptadas en el ámbito de la Convención respecto de los enfoques de política y los incentivos positivos para reducir las emisiones debidas a la deforestación y la degradación de los bosques, y de la función de la conservación, la gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono en los países en desarrollo, así como de los enfoques de política alternativos, como los que combinan la mitigación y la adaptación para la gestión integral y sostenible de los bosques, reafirmando al mismo tiempo la importancia de incentivar, cuando proceda, los beneficios no relacionados con el carbono que se derivan esos enfoques”.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2023) (IPCC, por sus siglas en inglés), el cambio climático causado por el hombre es una consecuencia de más de un siglo de emisiones netas de GEI derivadas del uso de la energía, el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra, el estilo de vida y los patrones de consumo y la producción. Son tres grupos principales de trabajo de las Naciones Unidas los que componen el IPCC. El Grupo I aporta las bases científicas del cambio climático desde la perspectiva de las ciencias naturales; el Grupo II evalúa los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación ante el cambio climático; y el Grupo III se refiere a la mitigación. Los informes emitidos por el IPCC, constituyen las referencias documentales para las negociaciones políticas multilaterales, a instancias de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto. El proceso que condujo al Acuerdo de París, adoptado en 2015, contó con los insumos de la ciencia como base para la toma de decisiones políticas (Madruga, 2017).

Tanto el Acuerdo de París, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados en septiembre de 2015 constituyen dos elementos clave de la nueva arquitectura del desarrollo sostenible, donde integran temas básicos como la erradicación de la pobreza, la reducción de las desigualdades y la equidad.

Los impactos del cambio climático son evidentes alrededor del mundo y algunos de los efectos se materializarán en el futuro cercano, debido a las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que ya han sido depositadas en la atmósfera debido a las actividades humanas, entre las que destacan el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados del cambio de uso de suelo, generan importantes cantidades de emisiones de GEI como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), clorofluorocarbonados (CFC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metano (CH₄), principalmente, considerando al CO₂ uno de los GEI más importantes por las altas cantidades en las que se emite (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

En este contexto, la vegetación forestal tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura, es decir, lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos de tiempo, a través de la fotosíntesis (Benjamín y Masera, 2001). Los principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo, donde la vegetación cumple la importante función de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Es por esta razón que los bosques son importantes sumideros de carbono.

Considerando la problemática social, económica y ambiental específica de cada sociedad, los programas de captura de carbono en bosques se constituyen como instrumentos con enorme potencial para contribuir a la transición hacia el desarrollo sustentable (Amescua & Sandoval, 2004).

Numerosos autores refieren que parte de la solución al problema del cambio climático global, debe basarse en la reducción de las emisiones de carbono originadas por el ser humano y en el aumento de la capacidad de absorción de carbono. El monitoreo de reservas de carbono en regiones boscosas a nivel global, ha sido objeto de atención en los últimos años ya que la deforestación y la degradación forestal, aunados a las actividades agrícolas representan hasta el 30% de las emisiones de carbono antropogénicas de origen no industrial (Harris, J., Birjandi, M., & García, A., 2011). La pérdida de cobertura forestal debido al cambio de uso de suelo ha contribuido significativamente en la emisión de CO₂ a la atmosfera. Esta pérdida de bosque también se traduce en la liberación a la atmósfera del carbono almacenado en el ecosistema forestal (Leija *et al.*, 2021).

Es así como Martínez-Navarro (2022), menciona que aun cuando la gestión forestal habría sido una herramienta obviada en las estrategias iniciales frente al cambio

climático, las evidencias actuales le han concedido la relevancia merecida a estas políticas, pues en esta nueva etapa de lucha frente al cambio climático que inicia la Agenda 2030 y el Acuerdo de París, muchas de las medidas implantadas se centran no sólo en reducir las emisiones de GEI, sino en incrementar los valores de sumidero, en donde la denominada neutralidad climática, en este sentido, la gestión forestal sostenible surge como un elemento de carácter imprescindible. Destacando que, aunque para algunos gobiernos la gestión forestal sostenible tradicionalmente se ha identificado como una carga financiera para las administraciones públicas y privadas, que requiere una compleja planificación e importantes inversiones, los recientes programas de bioeconomía contribuyen a demostrar que la rentabilidad de los bosques está subestimada. Por lo tanto, los bosques templados representan importantes áreas de oportunidad hacia los mecanismos de comercialización de servicios ambientales, mismos que pudieran significar una relevante contribución a la rentabilidad financiera de las actividades silvícolas, así como una alternativa de mitigación a los efectos del cambio climático.

En materia de política ambiental, Ávalos-Rodríguez (2022), menciona que los bienes públicos ambientales (servicios ambientales), son cualquier cosa que los mercados no producen, sugiere que el uso y disfrute de este bien no condiciona su propia existencia. En este contexto, podemos ubicar el servicio ambiental de secuestro o fijación de carbono atmosférico, también socializado como *Bonos de Carbono*.

Los bonos de carbono son una herramienta de gestión que se está implementado de forma global para reducir las emisiones de CO₂ al ambiente, esto a través de protocolos de conservación de bosques, suelo y agua. Forma parte fundamental de los compromisos adquiridos en el Protocolo de Kyoto para la reducción del calentamiento global (Cruz-Aviña *et al.*, 2022).

Los bonos de carbono son un instrumento económico y de mercado, que sirve para disminuir los gases de efecto invernadero, y también para mitigar el cambio climático. Un bono de carbono es un certificado comercial que evita o elimina una tonelada de emisiones de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}) (Estrada-Chavira, 2022), existen dos tipos de bonos de carbono: los regulados denominados *Certified Emission Reduction* (CER) y los de tipo voluntario, denominados *Voluntary Emission Reduction* (VER). Ambos se cotizan en el mercado, los primeros en el mercado regulado y los segundos en el mercado voluntario.

Los MDL son el único esquema, dentro del mercado regulado, que permite la participación en el comercio de reducción de emisiones a los países en vías de desarrollo, con lo cual se tienen beneficios ambientales, reducción de gases de efecto invernadero, y se contribuye al desarrollo sustentable de los países donde se establecen. El esquema de mercado voluntario comprende un contrato entre empresas e individuos que desean compensar el impacto ambiental que generan con sus actividades productivas, definiendo de manera unilateral las metas de reducción de emisiones. La unidad de comercio son las reducciones de emisiones verificadas (VER) y se obtienen a través de proyectos que permiten la participación de países que no ratificaron el protocolo de Kyoto o que no cuentan con las condiciones de infraestructura para el desarrollo de proyectos MDL (Lucatello, 2012).

Cuadro 1. Principales estándares que figuran en el mercado voluntario de carbono para el sector forestal (silvicultura).

Estándar	Antecedente	Características principales
Verified Carbon Standard (VERRA)	Posee más de 1700 proyectos. Han logrado remover 922 millones de toneladas de GEI. Alrededor de 200 proyectos. Abarcan alrededor de 10 millones de hectáreas alrededor del mundo.	Procedimientos detallados para cuantificar los beneficios reales de los GEI. Brindan orientación para ayudar a los desarrolladores de proyectos a determinar límites del proyecto. Establece líneas de base, evaluar la adicionalidad y, cuantificar las emisiones de GEI que se redujeron.

Estándar	Antecedente	Características principales
Gold Standard	ONG Suiza. 2300 proyectos en 100 países. Reducción de 191 millones de toneladas de CO ₂ .	Metodología para cuantificar carbono almacenado en suelos. Cuantificación de secuestro de carbono en proyectos de reforestación. Reducción de emisiones de metano en ganado vacuno. Evaluación de impacto de proyectos de agricultura sustentable.
Climate Action Reserve	El registro de California elaboró una serie de protocolos estandarizados, basados en el desempeño y específicos del proyecto. Desarrolló uno específicamente para manejo forestal mejorado. Principal modelo adoptado en América del Norte.	Diseñaron el Protocolo Forestal para México. Actualmente cuentan con más de 200 proyectos registrados en México. Establece línea de base, evalúa la adicionalidad y, cuantifica las emisiones de GEI que se redujeron. Implementa la estrategia de Monitoreo Reporte y Verificación.
American Carbon Registry	Maximiza la flexibilidad y la facilidad de uso para los promoventes de proyectos mientras mantienen la integridad ambiental y el rigor científico.	Presentan requisitos de verificación que las compensaciones basadas en proyectos que representen reducciones y remociones de emisiones que sean reales, adicionales, permanentes, netas de fugas, cuantificadas de manera precisa y conservadora, verificadas por un tercero.
Plan Vivo	Ayuda a aliviar la pobreza ofreciendo medios de vida sostenibles. Restaurar y proteger los entornos para ayudar a proteger a las comunidades.	Certificados Plan Vivo (PVC) representan reducciones de emisiones reales, adicionales y verificables donde 1 PVC equivale a 1 tonelada de CO ₂ reducida.

El Mercado de compensaciones con el que opera *Climate Action Reserve* es una lista de los titulares registrados que compran, venden o retiran créditos de compensación de carbono emitidos por la Reserva y que desarrollan proyectos de compensación de carbono.

Los créditos de compensación emitidos se denominan Toneladas de Reserva Climática (CRT) cada CRT representa una tonelada métrica de reducción o secuestro de emisiones de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). Los CRT son muy respetados por estar entre las compensaciones de mayor calidad disponibles. Cumplen con los criterios

de ser reales, permanentes, adicionales, verificables y exigibles, por lo que los compradores de CRT pueden estar seguros de que las compensaciones que compran brindan un beneficio real y creíble para el medio ambiente (Climate Action Reserve, 2021a).

A partir de la definición de Cambio Climático, como la variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables (DOF, 2012), se consideran estrategias de mitigación que a su vez han sido compromisos internacionales.

A pesar de reconocer que en México se observan efectos verídicos del cambio climático, tales como los que reporta el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018) incremento en la temperatura desde la década de 1960, las temperaturas promedio a nivel nacional aumentaron 0.85 °C y las temperaturas invernales 1.3 °C; también se ha reducido la cantidad de días más frescos desde los años sesenta del siglo pasado y hay más noches cálidas y la precipitación ha disminuido en la región sureste desde hace medio siglo; las políticas públicas que el país ha implementado para abordar la problemática derivada del calentamiento global, actualmente destina recursos limitados para emprender acciones congruentes con los compromisos adquiridos. La Figura 1, muestra la tendencia histórica de inversiones en el sector forestal mexicano durante los últimos 20 años.

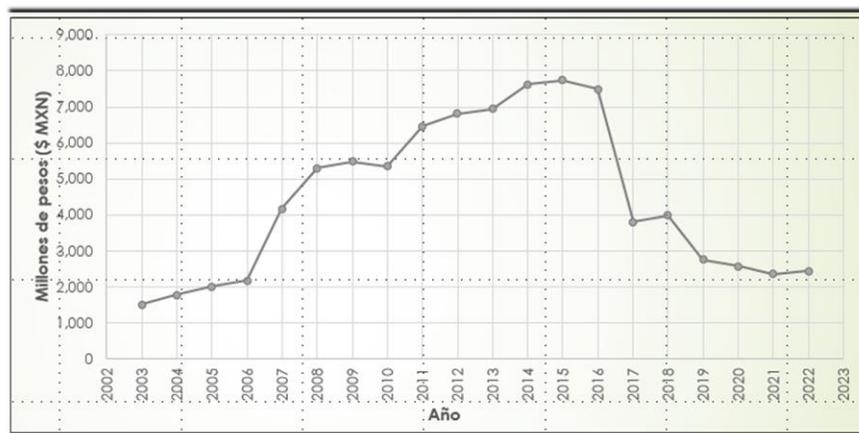


Figura 1. Presupuesto histórico CONAFOR (Fuente: SEMARNAT, 2022).

México es un país con un alto compromiso ambiental y en materia de cambio climático, ha sido promotor de acuerdos relevantes en las diferentes Conferencias de las Partes (COP), ejes fundamentales de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Particularmente el Estado de Hidalgo da cumplimiento a la Ley General de Cambio Climático (LGCC), con la elaboración del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (PEACCH).

El PEACCH es el resultado de la integración del conocimiento generado por el desarrollo de proyectos de investigación realizados sobre diferentes tópicos de cambio climático para el Estado de Hidalgo, considerando las siguientes temáticas: Inventario de emisiones de GEI, Balance energético estatal, Predicción de escenarios de emisiones y cálculo del potencial de mitigación, Análisis de variabilidad climática y fenómenos hidrometeorológicos extremos, Proyecciones del clima, Análisis de vulnerabilidad ante el cambio climático en los diferentes sectores, Estrategias de adaptación al cambio climático, Medidas de mitigación de GEI, Transversalidad y coordinación de políticas públicas.

En México, el ecosistema templado representa el 17.4% (aproximadamente 34 millones de hectáreas) de la superficie del país (195 millones de hectáreas), se agrupa al bosque mesófilo de montaña y al bosque de coníferas y latifoliadas (INEGI, 2015). En estos bosques se estima que la tasa de captura de carbono es de $3.431 \pm 0.870 \text{ Mg} \cdot \text{C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018). Como reservorios de carbono, los bosques absorben aproximadamente el 30% de las emisiones de CO₂ en un año y aumentan considerablemente su importancia cuando se incorporan al manejo silvícola (Pan *et al.*, 2011).

La silvicultura es crucial para mitigar el cambio climático, principalmente a través de la capacidad de los bosques para secuestrar carbono, que puede mejorarse significativamente mediante una gestión adecuada. Los proyectos para capturar y almacenar carbono dependen de inversiones e incentivos financieros y se pueden comercializar en el mercado voluntario de carbono para fines como el cumplimiento de compromisos ambientales, sociales, de gobernanza y de sostenibilidad (Pan *et al.*, 2022).

La captura y almacenamiento de carbono por la vegetación forestal se presenta en dos escenarios: bosques naturales y áreas bajo manejo. Los bosques manejados fijan cantidades altas de CO₂ en función de la edad del rodal, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, y tratamiento silvícola (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009; Pan *et al.*, 2011). La capacidad de captura de carbono atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del bosque; en edades tempranas e intermedias, la tasa de captura de carbono es alta (Fonseca, Benayas, & Alice, 2011). Esto se relaciona con la velocidad de acumulación de biomasa, de tal manera que los bosques con crecimiento neto son capaces de capturar más CO₂ del que emiten, a través de la respiración, y la velocidad de captura es directamente proporcional a dicho crecimiento (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018). En general, es aceptado que la tasa de fijación de carbono por medio de procesos de fotosíntesis es más alta en rodales jóvenes que en los bosques maduros, pero el almacenamiento total de carbono en el sistema es mayor en estos últimos.

El presente trabajo plantea un esquema de comercialización del servicio ambiental que brindan los bosques para la reducción del carbono atmosférico, en base al manejo forestal sustentable, cuya trazabilidad es posible mediante bonos de carbono destinados al mercado voluntario.

A diferencia de lo planteado por Amezcua & Sandoval (2004), donde menciona que, debido a la deforestación y degradación forestal, los bosques mexicanos puedan ser

considerados más como fuente de emisiones netas de carbono a la atmósfera que como sumideros para su captura; incorporar áreas boscosas al manejo forestal sustentable garantiza la renovación de masas forestales en el mediano y largo plazo.

El manejo forestal puede servir como estrategia de mitigación de impactos asociados al cambio climático, como parte de los beneficios del manejo forestal, Rodríguez (2007), plantea tres estrategias principales de manejo de carbono, que consisten en 1) Incrementar la cantidad o tasa de acumulación de carbono, al crear o incrementar sumideros de carbono, 2) Prevenir o reducir la tasa de liberación de carbono ya fijado en los sumideros existentes y 3) Reducir la demanda de combustibles fósiles incrementando el uso de productos de madera renovables.

La captura de carbono forestal bajo el esquema de mercados en bosques de propiedad social está operando y tiene gran potencial, sobre todo donde se aprovecha madera a partir de la planeación y supervisión legal, técnica y social; ya que, además de seguridad en la tenencia de la tierra, se cuenta con cultura de manejo forestal (Pacheco-Aquino *et al.*, 2015). De igual manera, Álvarez y Rubio (2013) mencionan que, aunque actualmente el principal valor del bosque de pino-encino reside en su uso como fuente de madera, el secuestro de carbono podría representar un valor adicional importante.

Es por ello que la conservación activa de bosques promueve de manera simultánea la producción maderable y servicios ambientales forestales. En México, los bosques han sido manejados para desarrollar masas coetáneas y con fines maderables. Sin embargo, generan otros bienes y servicios ambientales asociados al ecosistema forestal, como la captura de carbono que es un importante servicio ambiental con potencial de mercado para contribuir a la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad silvícola.

1.1 Objetivo general

- Analizar un esquema de comercialización como compensación de impactos ambientales generados por emisiones de CO₂, mediante esquemas de valorización de la captura de carbono que realizan los bosques cultivados en Zacualtipán, Hidalgo, para contribuir a la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad silvícola en la zona de estudio.

1.1.1 Objetivos específicos:

- Identificar y cuantificar las superficies bajo manejo silvícola, cuyos bosques presenten etapas de desarrollo similares.
- Cuantificar la biomasa y carbono en las diferentes etapas de desarrollo de bosques de *Pinus patula* bajo manejo silvícola.
- Estimar coeficientes de concentración de carbono para las especies forestales presentes en el área de estudio.
- Analizar el mercado voluntario de carbono y los estándares viables para bosques mexicanos.
- Proponer un esquema de comercialización de carbono que contribuya a la rentabilidad silvícola en el área de estudio.

1.2 Hipótesis

Ho: El mercado voluntario de carbono constituye una importante oportunidad para la comercialización de compensaciones por captura de carbono atmosférico en bosques cultivados.

1.3 Referencias

-
- Álvarez Gallego, S. (2009). Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca (México).
- Álvarez, S., & Rubio, A. (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. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005
- Amescua, A. V. M., & Sandoval, A. Y. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental?. *Gaceta Ecológica*, (70), 5-56.
- Ávalos Rodríguez, M. L., Alvarado Flores, J. J., & Alcaraz Vera, J. V. (2022). Instrumentos de política forestal en México: una revisión desde la participación en subsidios para el bosque como mecanismos de desarrollo. Escenarios regionales de la dicotomía entre sustentabilidad ambiental y aprovechamiento de los recursos naturales. UNAM-AMECIDER, México. Páginas 231-248. Retrieved from: <http://ru.iiec.unam.mx/5928/>. ISBN UNAM 978-607-30-6969-4, AMECIDER 978-607-8632-34-3.
- Avendaño Hernández, D. M., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., & Etchevers Barra, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233–238. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v32n3/v32n3a11.pdf>
- Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología (Bogotá, Colombia). 96p.

-
- Benjamín-Ordóñez, J. A. & Masera, O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 2001:3-12. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770102>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: Primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–22. doi: 10.21829/myb.2018.2401894
- 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. doi: <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14623>
- Dickie, M. J., & Coronel, A. (2016). Cambio Climático: breve historia y tendencias en la Región Húmeda. *Revista Para Mejorar la Producción*, 54. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Santa Fe, Argentina.
- Eguren, L. (2004). El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. CEPAL.
- Fonseca, W., Benayas, J. M. R., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(2011), 1400–1408. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.036
- Garay Empananza, I. (2020). Kyoto, Paris y Nueva York: cumplimiento normativo de las medidas contra el cambio climático.
- Harris, J., Birjandi, M., & García, A. (2011). Bosques, Agricultura y Clima: Consideraciones económicas y de políticas. Global Development And Environment Institute. Tufts University. Medford, MA.

-
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. Aguascalientes, México: Author.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press). Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jiménez Pérez, Javier, Treviño Garza, Eduardo Javier, & Yerena Yamallel, José Israel. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 50-61. Recuperado en 28 de enero de 2022, Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000300006&lng=es&tlng=es
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., Rodríguez-Laguna, R., & Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Revista cartográfica*, (102), 43-68. doi: <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>
- Lucatello, S. (2012). Los mercados voluntarios de carbono en Norteamérica y su gobernanza: ¿qué reglas aplican para el comercio internacional de emisiones en la región?. *Norteamérica*, 7(SPE), 107-128. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502012000300004&lng=es&tlng=es
- Madrugá, R. P. (2017). Ciencia del cambio climático, Acuerdo de París y sostenibilidad: nuevos retos. *Pensamiento Propio*, (46).
-

-
- Martínez-Navarro, J. A. (2022). El régimen jurídico forestal sostenible: residuos forestales, biomasa y bioeconomía. *Revista Catalana De Dret Ambiental*, 13(2). doi: <https://doi.org/10.17345/rcda3314>
- Pacheco-Aquino, G., Durán Medina, E., & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2015). Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 126–145. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000300009&lng=es&tlng=es
- Pan, C., Shrestha, A., Innes, J. L., Zhou, G., Li, N., Li, J., & Wang, G. (2022). Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects. *Journal of Forestry Research*, 33(4), 1109-1122. doi: 10.1007/s11676-022-01488-z
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
- Ranero, A., & Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24(e2401913), 1-28. doi:10.21829/myb.2018.2401913
- Rodríguez Laguna, R. (2007). Capacidad de almacenamiento de carbono en tres ecosistemas de la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Yerena Yamallel, J. I., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Alanís Rodríguez, E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 49-56. Recuperado en 28 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000500005&lng=es&tlng=es.

Zeman, C. R. (2018). El rol de los bosques en la lucha contra el cambio climático. *Revista del Cisen Tramas/Maepova*, 6 (2), 123-136, 2018. Retrieved from: <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/cisen/article/view/1087>

CAPITULO 2

2. Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense

Resumen

Los bosques generan bienes y servicios ambientales asociados al ecosistema forestal, como la captura de carbono que tiene potencial de mercado para contribuir a la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad silvícola. El objetivo del presente estudio consistió en estimar la biomasa y carbono aéreo en las etapas de crecimiento de un bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., cultivado en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, para conocer el potencial de la especie en la mitigación del cambio climático. La biomasa aérea se estimó por método no destructivo, utilizando medición directa de altura y diámetro normal. El volumen calculado para los individuos muestreados, en cada etapa de desarrollo, se multiplicó por la densidad básica de la madera y se aplicó el coeficiente de carbono de 50 %. Los árboles en etapa de fustal tuvieron en promedio 294.8 kg de biomasa. Las estimaciones de carbono aéreo en las etapas de desarrollo de *P. patula* fueron las siguientes: brinzal (0.94 Mg C·ha⁻¹), monte bravo (3.73 Mg C·ha⁻¹), vardascal (5.05 Mg C·ha⁻¹), latizal (18.18 Mg C·ha⁻¹) y fustal (81.40 Mg C·ha⁻¹). El método no destructivo permitió estimaciones confiables sobre el contenido de carbono de dicha especie. Se concluyó que la cuantificación del almacenamiento de carbono por etapas de desarrollo de *P. patula* es útil en las estrategias de comercialización de servicios ambientales por concepto de captura de carbono, el cual tiene potencial inminente de mercado para la mitigación de impactos del cambio climático.

Abstract

Forests provide environmental goods and services associated with the forest ecosystem, such as carbon sequestration, which has market potential to contribute to profitability and sustainability of forestry activities. This research pretends to estimate biomass and aboveground carbon during the development stages of a *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. forest, cultivated in the ejido Atopixco, allocated in Zacualtipán, Hidalgo, to know the potential of the species for climate change mitigation. Aerial biomass was estimated by non-destructive method, using direct measurement of height and diameter at breast height. The volume estimated for the trees sampled, at each stage of development, was multiplied by the basic wood density and the carbon coefficient of 50 % was used. The average biomass of mature trees was 294.8 kg. Estimates of aboveground carbon at the developmental stages of *P. patula* were as follows: brinzal (0.94 Mg C·ha⁻¹), monte bravo (3.73 Mg C·ha⁻¹), vardascal (5.05 Mg C·ha⁻¹), latizal (18.18 Mg C·ha⁻¹) and fustal (81.40 Mg C·ha⁻¹). The non-destructive method allowed reliable estimates of carbon content of this species. In conclusion we found that carbon storage quantification by stages of development of *P. patula* is useful marketing strategies of environmental services for carbon sequestration, which has imminent market potential to mitigate the impacts of climate change.

2.1 Introducción

En México, el ecosistema de bosque templado representa 17.4 % (34 millones de hectáreas) de la superficie del país (195 millones de hectáreas) y agrupa al bosque mesófilo de montaña y al bosque de coníferas y latifoliadas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015). En estos bosques se estima que la tasa de captura de carbono es de 3.431 ± 0.870 Mg C·ha⁻¹·año⁻¹ (Casiano-Domínguez, Paz-Pellat, Rojo-Martínez, Covalada-Ocon, & Aryal, 2018). Pan *et al.* (2011) mencionan que los bosques, como reservorios de carbono, absorben aproximadamente 30 % de todas

las emisiones de CO₂ en un año y aumentan considerablemente su importancia cuando estos se incorporan al manejo silvícola.

La captura y almacenamiento de carbono por la vegetación forestal se presenta en dos escenarios: bosques naturales y áreas bajo manejo. Los bosques manejados fijan cantidades altas de CO₂ en función de la edad del rodal, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, y tratamiento silvícola (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009; Pan *et al.*, 2011). La capacidad de captura de carbono atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del bosque; en edades tempranas e intermedias, la tasa de captura de carbono es alta (Fonseca, Benayas, & Alice, 2011). Esto se relaciona con la velocidad de acumulación de biomasa, de tal manera que los bosques con crecimiento neto son capaces de capturar más CO₂ del que emiten, a través de la respiración, y la velocidad de captura es directamente proporcional a dicho crecimiento (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018). En general, es aceptado que la tasa de fijación de carbono por medio de procesos de fotosíntesis es más alta en rodales jóvenes que en los bosques maduros, pero el almacenamiento total de carbono en el sistema es mayor en estos últimos.

Durante su establecimiento, los bosques pasan por etapas de desarrollo de brinzal, monte bravo, vardascal, latizal y fustal. El manejo forestal involucra la ejecución de un programa de prácticas silvícolas, a través de métodos de regeneración y aplicación de prácticas silviculturales (preparación del sitio, limpiezas, podas, aclareos, protección y fomento) que se realizan durante el periodo de administración del bosque (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González-Elizondo, 2018). Pacheco-Aquino, Durán-Medina, y Ordóñez-Díaz (2015) muestran evidencia de que los bosques bajo manejo forestal constituyen almacenes importantes de carbono, que tienen capacidad de captura y que los sitios con aprovechamiento maderable recuperan de 15 a 20 % del carbono removido con respecto a lo que había originalmente

en un bosque sin intervenciones previas; dichos valores se alcanzan a los siete años de que se hace el aprovechamiento.

El escenario ideal para la fijación y almacenamiento de carbono por los bosques es aquel donde las masas forestales se mantienen dinámicas mediante la incorporación constante de materia orgánica al suelo, proveniente de los árboles adultos, mientras se establece la regeneración natural de las especies y otros individuos jóvenes están en plena actividad fotosintética (Razo-Zarate, Gordillo-Martínez, Rodríguez- Laguna, Maycotte-Morales, & Acevedo-Sandoval, 2013).

La captura de carbono forestal bajo el esquema de mercados en bosques de propiedad social está operando y tiene gran potencial, sobre todo donde se aprovecha madera a partir de la planeación y supervisión legal, técnica y social; ya que, además de seguridad en la tenencia de la tierra, se cuenta con cultura de manejo forestal (Pacheco-Aquino *et al.*, 2015). De igual manera, Álvarez y Rubio (2013) mencionan que, aunque actualmente el principal valor del bosque de pino-encino reside en su uso como fuente de madera, el secuestro de carbono podría representar un valor adicional importante. En el presente estudio se planteó el objetivo de estimar la biomasa y carbono aéreo en las etapas de crecimiento de un bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., cultivado en el ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán, Hidalgo, para conocer el potencial de la especie en la mitigación del cambio climático.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la región denominada Sierra Alta Hidalguense, en áreas incorporadas al manejo silvícola en el ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán, Hidalgo, en las coordenadas 20° 37' 26" - 20° 35' 20" LN y 98° 35' 23" - 98° 37' 48" LO, con altitud promedio de 2 062 m. En el área predomina el clima tipo C(m)a, templado subhúmedo

con lluvias en verano, con precipitación de 1 780 mm y temperatura promedio de 13.5 °C (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; García, 1981), con suelos tipo Feozem haplico (Hh), ricos en materia orgánica, y Regosol calcarico (Rc) en las partes con mayor pendiente (Santiago-García, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, Valdez-Lazalde, & Ramírez-Valverde, 2013). La vegetación corresponde a bosque templado de pino-encino, donde predomina la especie *P. patula* sobre otras nativas como *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Quercus rugosa* Née, *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Alnus arguta* Schl., *Prunus serotina* Ehrh., *Vaccinium leucanthum* Schltdl., *Clethra mexicana* DC., *Crataegus mexicana* DC. y *Ternstroemia sylvatica* Schltdl. & Cham.

2.2.2 Descripción de etapas de desarrollo del bosque

El ejido Atopixco posee una superficie total de 1 188.9 ha, de las cuales 789.1 ha están cubiertas por bosque y únicamente 658.7 ha han sido incorporadas al esquema de manejo forestal sustentable. Los tratamientos silvícolas están dirigidos primordialmente a *P. patula*, que representa la principal especie de interés comercial maderable. De tal modo que, con base en lo propuesto por Aguilar-Luna (2018), Aguirre, Díaz, Muñoz y Muñoz (2019) y derivado de las experiencias de campo, el presente trabajo propone la clasificación de las etapas de desarrollo del bosque de *P. patula* que se muestran en la Figura 2.

Brinzal

Es la etapa de desarrollo inicial del bosque, desde la aparición de las plántulas hasta aproximadamente 1 m de altura. En bosques cultivados regularmente se establece durante el primer periodo de lluvias posterior a los tratamientos de corta de regeneración o matarrasa. En el caso de *P. patula*, en el área de estudio, se manifiesta en individuos de hasta dos años (Figura 2). En esta etapa no se obtienen productos forestales derivados de las limpiezas de vegetación realizadas para favorecer el desarrollo de las especies de interés.

Monte bravo

Es la segunda etapa de desarrollo y se identifica por la marcada competencia por luz, espacio y nutrientes entre individuos del ecosistema, lo que provoca mayor incremento en altura; los árboles alcanzan entre 1 y 3 m y diámetros en la base menores de 5 cm, presentan ramas bajas secas abundantes que se entrelazan formando una masa impenetrable. La edad promedio de esta etapa en la zona de estudio se alcanza a los cuatro años (Figura 2). Al ser un bosque cultivado se realizan actividades de preaclareos y podas de las ramas basales, y se inicia con el proceso de obtención de productos como es material dendroenergético en cantidades bajas para uso doméstico, dando lugar a la dinámica de la biomasa y carbono aéreo extraído del bosque.

Vardascal

Estado en que la masa presenta densidad alta con individuos delgados y flexibles que han perdido sus ramas bajas (inicio de poda natural) generando material muerto abundante en el piso. La mayoría de los individuos tienen edades promedio de hasta 6 años, diámetro normal en promedio menor de 10 cm y alturas de 3 a 8 m (Figura 2). Con la aplicación de aclareos no comerciales se obtienen productos como leña, puntales y postes para autoconsumo, lo que representa el inicio de extracción de biomasa y carbono aéreo del bosque.

Latizal

Es la etapa de desarrollo en que los árboles muestran mayor crecimiento en altura y la poda natural se intensifica; además, la mayoría del arbolado presenta diferenciación de copas con alturas medias de 10 m y diámetro normal promedio de 15 cm. En el área de estudio, *P. patula* alcanza esta condición en promedio a los 11 años (Figura 2). Periódicamente, se aplican aclareos intermedios que permiten la obtención de puntales, polines, madera en rollo para aserrío y material celulósico para venta. La extracción de

biomasa y carbono aéreo del bosque se destina a productos de mediana duración de vida en el ambiente, antes de que el carbono se libere a la atmósfera.

Fustal

Es la etapa final de desarrollo del bosque en la que los árboles alcanzan su madurez fisiológica, se termina la poda natural y producen cantidades grandes de semillas viables para la regeneración natural. La altura de los árboles supera los 20 m y el diámetro normal es mayor de 20 cm (Figura 2). En esta etapa se realiza la cosecha final del bosque, en la que el arbolado alcanza sus dimensiones máximas y genera mayor cantidad de productos de aserrío culminando el ciclo de cultivo, correspondiente al turno comercial. Los volúmenes de madera y biomasa que se obtienen son abundantes. La madera extraída se destina a la elaboración de productos de larga duración donde el carbono queda retenido por muchos años.

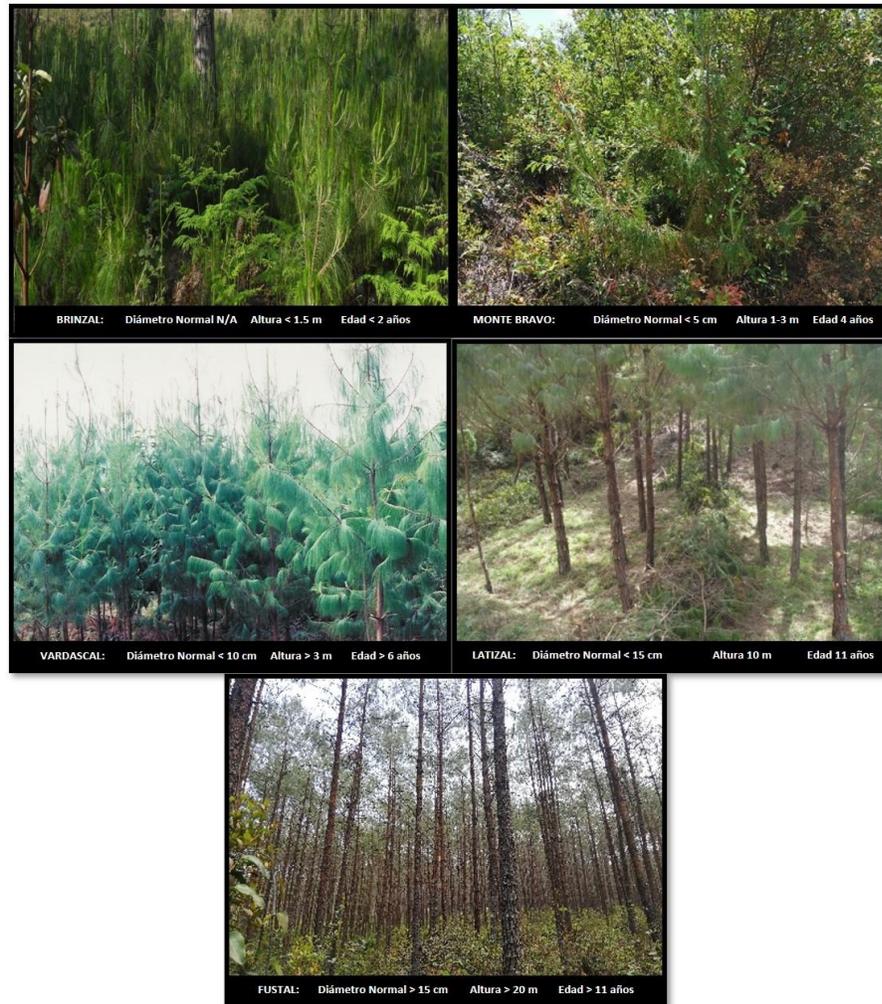


Figura 2. Etapas de crecimiento del arbolado de un bosque de *Pinus patula* en la Sierra Alta Hidalguense.

2.2.3 Sitios de muestreo y medición de variables

Con el uso de Sistemas de Información Geográfica y la herramienta de QGIS® se delimitó el polígono incorporado al manejo forestal del ejido y se ubicaron y seleccionaron las áreas que presentaban las cinco etapas de desarrollo del bosque en las condiciones similares de exposición y pendiente del terreno. Posteriormente, se diseñó el muestreo sistemático estratificado, considerando 15 sitios circulares de 1 000 m² (Figura 3), se midieron las características dasométricas (altura y diámetro normal), el estado de desarrollo del bosque y el número de individuos por sitio con el apoyo de un equipo de

orientación y navegación terrestre (brújula SUUNTO® Mc-2 Compass y GPS Garmin® 60Cx). El diámetro basal en la etapa de brinzal y monte bravo se midió con un vernier digital Steren® de 150 mm con precisión de 1 mm. Para las etapas de vardascal, latizal y fustal, la lectura se tomó a la altura de 1.30 m (diámetro normal), utilizando la forcípula Haglof Sweden®, modelo Mantax Blue 800 mm. La altura total de cada árbol se midió con cinta métrica Truper® para individuos de hasta 2.0 m y con apoyo de un clinómetro Suunto® para alturas mayores.

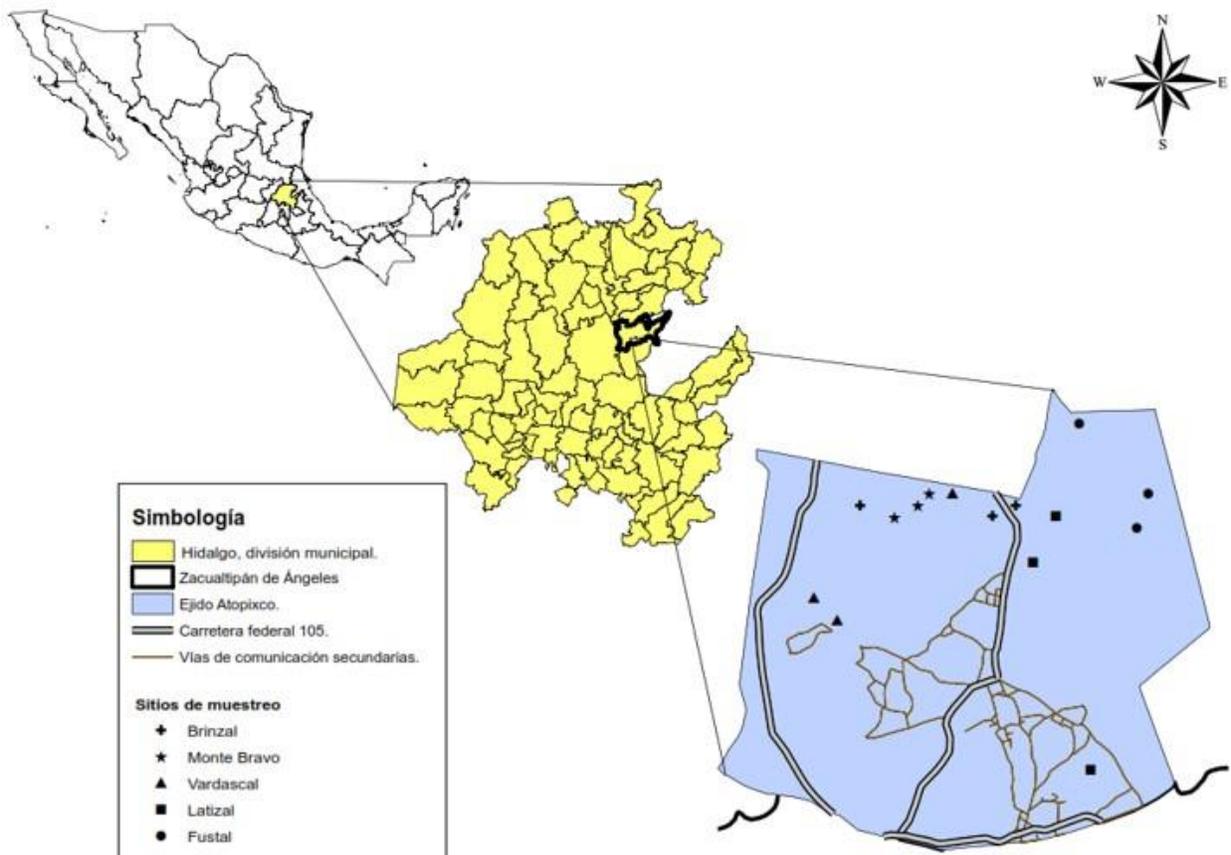


Figura 3. Sitios de muestreo de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México.

La información obtenida en campo se procesó en gabinete para obtener variables compuestas como área basal, volumen, densidad de arbolado, biomasa y contenido de carbono para cada etapa de desarrollo del bosque.

2.2.4 Área basal

En las áreas en etapas de brinzal y monte bravo, el área basal (AB) por hectárea se obtuvo mediante la suma directa del área basal de un árbol dado (ab_i , m^2) calculado a partir de los datos de diámetro en la base del tallo [$AB = (\sum ab_i)$] (Romahn de la Vega & Ramírez Maldonado, 2010), mientras que para las etapas siguientes no fue necesario estimar el área basal, debido a que el volumen se obtuvo directamente de la aplicación de un modelo biométrico desarrollado para *P. patula*.

2.2.5 Volumen

El volumen (V , m^3) en las etapas de brinzal (Br) y monte bravo (Mb) se calculó con el valor obtenido de AB (m^2) y la altura (h , m) del árbol utilizando la ecuación $V_{Br/Mb} = AB * h$. En el caso de las etapas de vardascal, latizal y fustal, el volumen individual se calculó con la ecuación desarrollada por el Sistema Biométrico Forestal (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], 2016):

$$VTACC = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + b_0 d^2$$

donde,

VTACC = volumen total árbol con corteza (m^3)

d = diámetro normal con corteza a la altura de 1.3 m (cm)

h = altura total del árbol (m)

a_0 , a_1 , a_2 , b_0 = parámetros del modelo: 0.0000253, 1.6939421, 1.4175090 y 0.0000680, respectivamente.

2.2.6 Biomasa

Entre las alternativas más comunes para estimar biomasa en bosques se encuentran los métodos destructivos (Figueroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez, & De los Santos-Posadas, 2010; Soriano-Luna, Ángeles-Pérez, Martínez-Trinidad, Plascencia-Escalante, & Razo-Zárate, 2015) y no destructivos (Razo-Zarate *et al.*, 2013; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Treviño-Garza, & Razo-Zárate, 2009). En este estudio se optó por emplear los últimos, para lo cual se utilizó el valor de densidad básica de la madera de $0.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ reportado por Vázquez-Cuecuecha, Zamora-Campos, García-Gallegos, y Ramírez-Flores (2015).

Los datos obtenidos de volumen (existencias reales [ER], m^3) en cada etapa de desarrollo se multiplicaron por la correspondiente densidad básica de la madera (D , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) para obtener el valor de biomasa (B , kg) con base en la ecuación $B = ER * D$, utilizada por Razo-Zarate *et al.* (2013).

2.2.7 Carbono aéreo

El carbono aéreo (C , kg) en cada etapa de desarrollo del bosque se estimó con el valor obtenido de la ecuación de biomasa (B , kg) multiplicado por el coeficiente de carbono (CC , 0.5) utilizado por diversos autores (Petersson *et al.* 2012; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Meza-Rangel, Aguirre-Calderón, & Razo-Zárate, 2008).

2.2.8 Análisis estadístico

Con los datos obtenidos en campo y mediante el uso de ecuaciones se obtuvieron variables compuestas que se sometieron a un análisis de varianza ($P \leq 0.05$) y pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey, para identificar las diferencias entre los contenidos medios de carbono de las etapas de desarrollo del bosque. Los datos se transformaron con logaritmo natural (\ln) y se aplicó la prueba de normalidad de

Kolmogorov-Smirnov. El análisis estadístico se hizo con el programa Minitab® versión 18.1 (Minitab, 2017).

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Características dasométricas por etapa de desarrollo

De acuerdo con el Cuadro 2, el área incorporada al manejo silvícola del ejido Atopixco, que se encuentra en diferentes etapas de desarrollo, tuvo árboles con diámetros que van de los 0.15 cm en la etapa de brinzal hasta 42 cm en el arbolado adulto. Cabe aclarar que las áreas se regeneraron de manera natural y con frecuencia caen semillas en años posteriores a la corta de regeneración, motivo por el cual hay presencia de árboles con alturas menores a las mencionadas para cada etapa de desarrollo. Los valores registrados son similares a los rangos descritos por Aguilar-Luna (2018) y Aguirre *et al.* (2019) para la especie *P. patula*, lo que indica que el método no destructivo permite obtener estimaciones confiables sobre el contenido de carbono de dicha especie. Adicionalmente, hay densidades altas en la estructura de la masa forestal ocasionando la presencia de árboles dominados o suprimidos que se caracterizan por ser delgados y de poca altura.

Con base en las etapas propuestas de desarrollo del bosque, la Figura 4 muestra que la dinámica de crecimiento en diámetro y altura de los árboles fue mayor en la etapa vardascal a latizal, con crecimiento acelerado al pasar de latizal a fustal.

Cuadro 2. Variables dasométricas por etapa de desarrollo de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Etapa	Densidad (árboles·ha ⁻¹)	Diámetro (cm)			Altura (m)		
		Mínimo	Promedio	Máximo	Mínima	Promedio	Máxima
Brinzal	2 217	0.15	0.79 ± 0.2	3.02	0.13	0.67 ± 0.2	1.70
Monte bravo	3 447	0.40	1.72 ± 1.0	4.81	0.29	1.49 ± 0.4	3.50
Vardascal	1 817	1.10	4.06 ± 2.6	9.00	0.80	2.87 ± 1.0	5.20

Etapa	Densidad (árboles·ha ⁻¹)	Diámetro (cm)			Altura (m)		
		Mínimo	Promedio	Máximo	Mínima	Promedio	Máxima
Latizal	2 093	2.00	11.35 ± 11.3	24.00	2.00	9.93 ± 7.7	15.00
Fustal	937	13.00	26.46 ± 27.9	42.00	8.00	23.19 ± 16.8	29.00

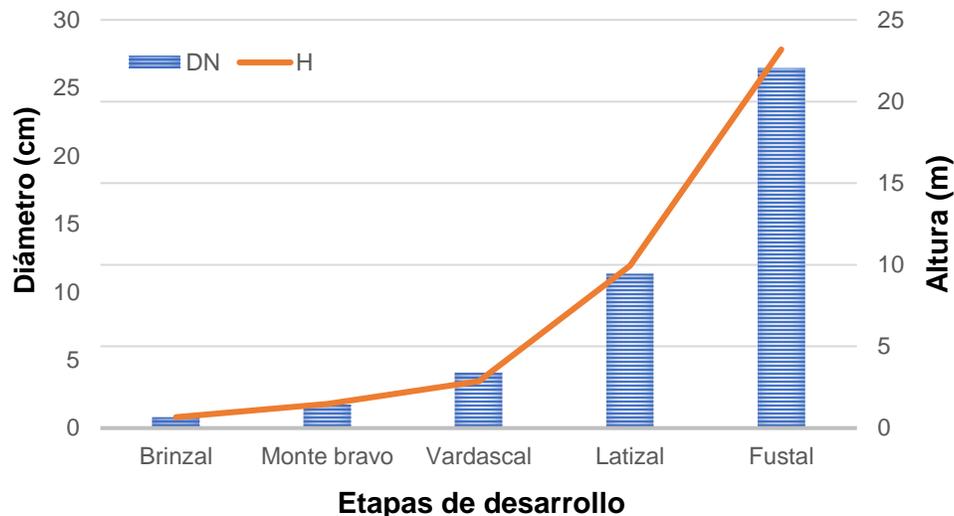


Figura 4. Crecimiento del arbolado en las etapas de desarrollo de *Pinus patula* en ejido Atopixco, Zacualtípán, Hidalgo.

2.3.2 Biomasa aérea y contenido de carbono

El análisis de varianza demostró que las variables biomasa aérea y contenido de carbono difieren significativamente ($P \leq 0.0001$) entre las etapas de desarrollo del bosque. Acorde con el Cuadro 3, la prueba de comparación de Tukey agrupó cada etapa como una categoría. Los árboles en etapa de fustal tuvieron en promedio 294.8 kg de biomasa. En el paso de la etapa de latizal a la de fustal se registró la mayor diferencia de biomasa de hasta 271 kg en un periodo menor de 10 años, lo que refleja la tasa alta de secuestro de carbono por los árboles cultivados. En la variable de contenido de carbono, los valores presentaron las mismas tendencias.

Los resultados reafirman que los bosques manejados fijan cantidades altas de CO₂ en función de la edad del rodal (Avendaño *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2011) y coinciden con Razo-Zárate *et al.* (2013), quienes señalan que la tasa de fijación de carbono por medio de procesos fotosintéticos es mayor en rodales jóvenes en comparación con rodales maduros.

Cuadro 3. Biomasa aérea y contenido de carbono por árbol durante las etapas de desarrollo del bosque cultivado de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Etapa	Biomasa (kg)	Carbono (kg)	Agrupación Tukey
Fustal	294.82±87.44	147.41±43.72	A
Latizal	23.72±2.78	11.86±1.39	B
Vardascal	1.10±0.34	0.55±0.17	C
Monte bravo	0.12±0.05	0.06±0.03	D
Brinzal	0.02±0.02	0.01±0.01	E

Biomasa aérea

La biomasa aérea en bosques cultivados la constituye el arbolado establecido después de que se aplican las cortas de regeneración, donde el número de árboles se modifica gradualmente mediante las actividades de cultivo como las cortas de preaclareo y aclareos comerciales. En las etapas juveniles se presenta la mayor densidad arbórea, destacando el monte bravo con promedios de 3 447 individuos·ha⁻¹. De modo que, con el manejo en las etapas siguientes de desarrollo, la densidad del arbolado disminuye favoreciendo el crecimiento y desarrollo de individuos que llegarán a la cosecha final (fustal maduro); es decir, los que generarán los mejores beneficios materiales, ambientales y financieros.

La Figura 5 representa la densidad de arbolado y biomasa correspondiente por etapa de desarrollo, destacando la etapa fustal con menor densidad ($937 \text{ árboles}\cdot\text{ha}^{-1}$) y mayor biomasa ($162.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Esto refleja el efecto de los aclareos como parte del manejo silvícola, ya que disminuye la competencia entre individuos y favorece el incremento en volumen y biomasa de los árboles residuales (Ramírez-Martínez, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, González-Guillén, & Santiago-García, 2020) que son eficientes para la captura y almacenamiento de carbono. Al respecto, Fragoso-López *et al.* (2017) mencionan que es necesario implementar el manejo forestal sostenible que favorezca la productividad del suelo, para lograr el máximo rendimiento en un bosque; asimismo, Ramírez-Martínez *et al.* (2020) concluyen que el manejo de la densidad del arbolado es fundamental para maximizar el rendimiento maderable y que la redistribución del espaciamiento de los árboles permitirá mejorar la producción total en volumen y aprovechar la productividad potencial de *P. patula*.

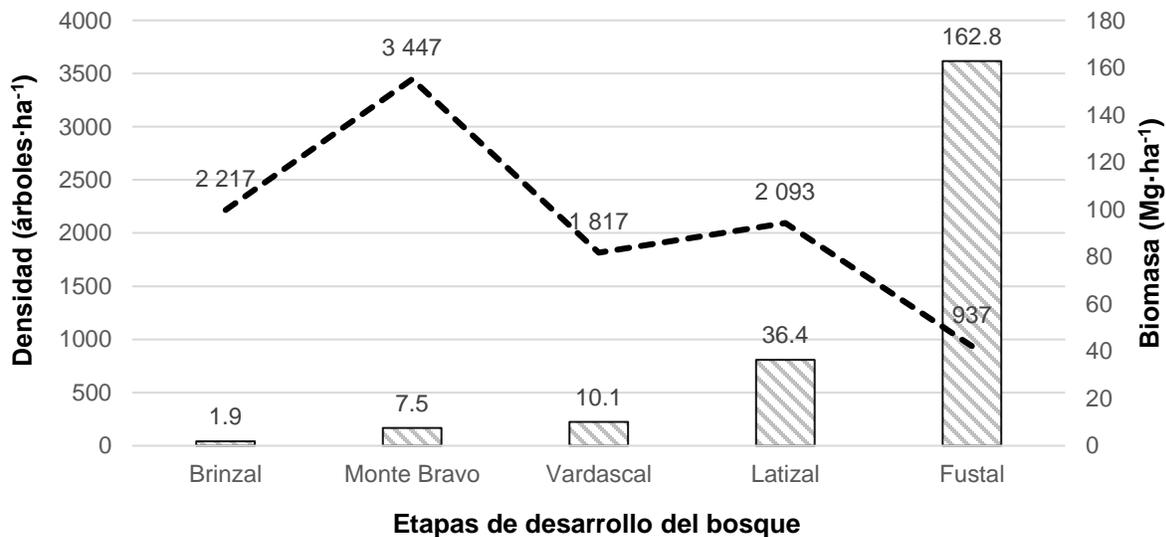


Figura 5. Biomasa aérea y densidad de arbolado promedio por etapa de desarrollo en el bosque cultivado de *Pinus patula* del ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

De acuerdo con lo reportado por Chávez-Aguilar *et al.* (2016), en un bosque de la misma región y especie de aproximadamente 80 años (sin intervención silvícola), la biomasa aérea total fue en promedio 208 Mg·ha⁻¹; valor 21 % superior al estimado en el presente estudio con edad aproximada de 23 años (162.8 Mg·ha⁻¹) para la etapa fustal. Valores similares obtuvieron Monárrez-González *et al.* (2018), quienes reportan que, a nivel de ecosistema, el bosque de coníferas y bosques de hoja ancha almacenan 179 Mg·ha⁻¹ y 153 Mg·ha⁻¹, respectivamente.

En otros estudios realizados por Soriano-Luna *et al.* (2015) y Figueroa-Navarro *et al.* (2010), utilizando métodos destructivos, se reporta un total de 166.6 Mg·ha⁻¹ de biomasa para bosques del área de estudio; es decir, una diferencia de solo 2.3 % comparado con la presente estimación en etapa fustal.

Contenido de carbono

La información del Cuadro 4 revela la relación directa que existe entre la etapa de desarrollo del bosque y la cantidad de carbono almacenado. Durante las etapas juveniles, la competencia por luz, agua y nutrientes promueve el crecimiento rápido en altura; sin embargo, mediante los tratamientos intermedios (aclareos) es posible redistribuir la biomasa y carbono favoreciendo la fijación en los fustes por el incremento dasométrico en los árboles residuales de las áreas intervenidas.

Cuadro 4. Estimación de biomasa y carbono aéreos para cada etapa de desarrollo del bosque cultivado de *Pinus patula* en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Etapa	Densidad (árboles·ha⁻¹)	Biomasa (Mg·ha⁻¹)	Carbono (Mg·ha⁻¹)
Brinzal	2 217	1.9	0.94
Monte bravo	3 447	7.5	3.73
Vardascal	1 817	10.1	5.05
Latizal	2 093	36.4	18.18
Fustal	937	162.8	81.40

El manejo del bosque del ejido Atopixco, con base en el método de desarrollo silvícola, favorece su capacidad productiva, la actividad económica que el aprovechamiento maderable representa y el potencial del manejo forestal sustentable para la mitigación del cambio climático.

El Cuadro 5 compara seis resultados de estudios del contenido de carbono en otros bosques del país, considerando únicamente la etapa adulta (fustal). Con respecto a las estimaciones realizadas en ecosistemas similares, los resultados del presente trabajo se aproximan a los reportados por Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) y Figueroa-Navarro (2010), tomando en cuenta que los modelos de estimación son diferentes; además, confirman la versatilidad de alternativas para la cuantificación de carbono en ecosistemas forestales por métodos no destructivos.

Cuadro 5. Estimaciones de carbono almacenado en bosques templados de México.

Referencia	Método de estimación	Ecosistema	Ubicación geográfica	Carbono estimado* (Mg C·ha⁻¹)
Aguirre <i>et al.</i> (2009)	Percepción remota SPOT 5 HRG (regresión y k-nn)	Pino-encino (manejado)	Hidalgo	63.98

Referencia	Método de estimación	Ecosistema	Ubicación geográfica	Carbono estimado* (Mg C·ha ⁻¹)
Fragoso-López <i>et al.</i> (2017)	Percepción remota RapidEye-4 $B = 0.0713 D^{2.5104}$	Oyamel (sin manejo ANP)	Hidalgo	105.72
Hernández-Moreno <i>et al.</i> (2020)	$B = 0.1549 DN^{2.3572}$ $CC = 0.07744 DN^{2.3572}$	Pino-encino (manejado)	Michoacán	128.44
Álvarez y Rubio (2013)	Modelo CO2FIX v3.2	Pino-encino (manejado)	Oaxaca	118.60
Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> (2008)	$B = a_0 * DN^{a1}$	Pino-encino (sin manejo ANP)	Tamaulipas	82.90
Acosta-Mireles, Carrillo-Anzures, y Díaz-Lavariega (2009)	$B = 0.0948 * DN 2.4079$	Pino-encino (manejado)	Tlaxcala	118.30
Presente estudio (2021)	$B = ER * D$	Pino-encino (manejado)	Hidalgo	81.40

*Para la conversión de biomasa (B) a carbono (C) se utilizó la ecuación $C = B * CC$, donde CC = coeficiente de carbono (0.5). DN: diámetro normal, ER: existencias reales, D: densidad de la madera, ANP: área natural protegida.

A pesar de considerar una variación promedio de 22 % en cuanto a la estimación del contenido de carbono por unidad de superficie, las técnicas de percepción remota son herramientas que permiten realizar estimaciones rápidas y resultan ser más eficientes en cuanto a recursos humanos, materiales y financieros en comparación con las mediciones directas.

2.4 Conclusiones

El uso de variables dasométricas y densidad de la madera como insumos de cálculo para estimaciones rápidas de biomasa y contenido de carbono aéreo son de gran utilidad para la cuantificación de los servicios ecosistémicos que el bosque provee. En este caso,

el almacenamiento de carbono en el bosque de Atopixco representa 81.40 Mg C·ha⁻¹. La clasificación por etapas de desarrollo representa una herramienta importante en las estrategias de comercialización de servicios ambientales por concepto de captura de carbono, el cual tiene potencial inminente de mercado para la mitigación de impactos emanados del cambio climático. El uso de métodos no destructivos garantiza la utilidad práctica para generar estimaciones cuantitativas del carbono aéreo en los bosques y entre sus ventajas destacan el bajo costo y su relativa rapidez; sin embargo, no considera depósitos importantes en cuanto al contenido de carbono del bosque, como lo es el suelo.

2.5 Referencias

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz-Lavariéga, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105–114. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n2/v27n2a3.pdf>
- Aguilar-Luna, J. M. E. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 230–252. doi: 10.29298/rmcf.v9i47.154
- Aguirre, Z., Díaz, E., Muñoz J., & Muñoz, L. (2019). Sucesión natural bajo plantaciones de *Pinus radiata* D. Don (Pinaceae) y *Eucalyptus globulus* Labill. (Myrtaceae), en el sur del Ecuador. *Arnaldoa*, 26(3), 943–964 doi: 10.22497/arnaldoa.263.26306
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., De los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209–220. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000200011
- Álvarez, S., & Rubio, A. (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.
doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005

Avendaño Hernández, D. M., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., & Etchevers Barra, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233–238. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v32n3/v32n3a11.pdf>

Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: Primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–22. doi: 10.21829/myb.2018.2401894

Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. A., García-Moya, E., & Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 23–36. doi: 10.21829/myb.2016.2231454

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2016). SiBiFor: Biblioteca digital del sistema para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México. Retrieved from <http://fcfposgrado.ujed.mx/sibifor/inicio/documentos.php>

Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & De los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v1n1/v1n1a12.pdf>

Fonseca, W., Benayas, J. M. R., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(2011), 1400–1408. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.036

Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., González-Ramírez, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Cortés-Blobaum, H. J., & Razo-Zárate, R. (2017).

-
- Carbon sequestration in protected areas: A case study of an *Abies religiosa* (H. B. K.) Schlecht. et Cham Forest. *Forests*, 8(11), 429. doi: 10.3390/f8110429
- García, E. (1981). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México: Offset Larios S. A.
- Hernández-Moreno, J. A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Gómez-Guerrero, A., Hernández, V. J. R., & Vera-Castillo, J. A. G. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 26(1), 17. doi: 10.21829/myb.2020.2611802
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. Aguascalientes, México: Author.
- Minitab Inc. (2010). Minitab version 18.1 statistical software. State College, PA, USA: Author.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421569. doi: 10.21829/myb.2018.2421569
- Pacheco-Aquino, G., Durán Medina, E., & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2015). Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 126–145. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000300009&lng=es&tlng=es
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609

-
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., ...Mäkipää, R. (2012). Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass—A comparative study. *Forest Ecology and Management*, 270(2012), 78–84. doi: 10.1016/j.foreco.2012.01.004
- Ramírez-Martínez, A., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., González-Guillén, M. J., & Santiago-García, W. (2020). Densidad inicial en el rendimiento maderable y biomasa de *Pinus patula* con especies latifoliadas. *Agrociencia*, 54(4), 555–573. Retrieved from <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/459/627>
- Razo-Zárata, R., Gordillo-Martínez, R., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego, en el Parque nacional El Chico. *Madera y Bosques*, 19(2), 73–86. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/617/61728317006.pdf>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Razo-Zárata, R. (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. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/461/46111817006.pdf>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Meza-Rangel, J., Aguirre-Calderón, O., & Razo-Zárata, R. (2008). Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 215–222. Retrieved from https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Joel_Meza/9.pdf
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez Maldonado, H. (2010). Dendrometría. Retrieved from <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2013). Sistema compatible de crecimiento y
-

rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia mexicana*, 36(2), 163–172. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000200009

Soriano-Luna, M. A., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006

Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., García Gallegos, E., & Ramírez-Flores, J. A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques*, 21(1), 129–138. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100010

CAPITULO 3

3. Concentración de carbono para diferentes estructuras de 30 especies forestales de Hidalgo, México

Resumen

Los bosques constituyen un elemento trascendental con relación al combate del cambio climático, para la mitigación del calentamiento global, no solo por su rol en la captura y secuestro de carbono, sino también porque el efecto de sustitución mediante la utilización de sus productos (madera) implica el empleo de menores cantidades de energías fósiles. El presente trabajo pretende generar coeficientes de concentración de carbono en las secciones estructurales de 30 especies forestales, para evaluar su capacidad de captura de este elemento en la parte aérea de los bosques templados. Se tomaron muestras de secciones estructurales de 30 especies forestales en sus partes aéreas, mismas que se secaron y pulverizaron para analizarlas con el equipo *Toc Solids Analyzer* para determinar el contenido de carbono orgánico. Se realizaron tres repeticiones para cada componente estructural. Agrupando los tres componentes estructurales, la especie que presentó mayor concentración fue *Pinus pseudostrobus* (50.28 %), seguido por *P. greggii*, *P. teocote* y *P. patula*; y la de menor concentración promedio fue *Quercus deserticola* (43.44 %). Los máximos valores son ocupados por el grupo de coníferas existentes en el bosque del ejido Atopixco. En las muestras analizadas de las especies encontradas en campo, 50 % corresponden al género *Quercus*, del cual, la especie con mayor concentración promedio es *Quercus magnolifolia* (48.98 %). Las variaciones de resultados obtenidos con respecto a otros estudios, son de aproximadamente 5%. Las conclusiones preliminares indican que las coníferas favorecen la producción maderable y, su eficiencia como sumideros de carbono en los bosques cultivados motiva su incorporación a esquemas diseñados para mitigar el calentamiento global. El presente estudio refleja uno de los principales beneficios del

manejo forestal como estrategia de mitigación del cambio climático. Los coeficientes de carbono, pueden ser utilizados como factor de conversión para minimizar incertidumbres asociadas a la estimación de carbono almacenado en biomasa aérea de bosques.

Abstract

Forests constitute a transcendental element against climate change, for the mitigation of global warming, not only because of their role in capturing and sequestering carbon, but also because of the substitution effect through the use of their products (timber). It implies the use of smaller amounts of fossil fuels. The present research pretends to generate the carbon concentration coefficients in the structural sections of 30 forest species, to evaluate their capacity to capture this element in the aerial part of temperate forests. Samples of structural sections by 30 forest species were taken in their aerial parts, which were dried and pulverized to analyze them with the TOC Solids Analyzer equipment to determine the organic carbon content. Three replicates were performed for each structural component. Joining the three structural components, the species that presented the highest concentration was *Pinus pseudostrobus* (50.28 %), followed by *P. greggii*, *P. teocote* and *P. patula*; and the one with the lowest average concentration was *Quercus deserticola* (43.44 %). The maximum values are occupied by the group of conifers in the forest of ejido Atopixco. From the analyzed samples of the species found in the forest, 50 % correspond to the genus *Quercus*, of which the species with highest average concentration is *Quercus magnolifolia* (48.98 %). The variations of results obtained in reference to other studies are approximately 5%. Preliminary conclusions indicate that conifers contribute for timber production and their efficiency as carbon sinks in cultivated forests motivates their incorporation into schemes designed to mitigate global warming. This study reflects one of the main benefits of sustainable forest management as a climate change mitigation strategy. The carbon coefficients can be used as a conversion factor to minimize uncertainties associated with the estimation of carbon stored in aerial biomass of forests.

3.1 Introducción

El cambio climático es uno de los mayores retos que la humanidad enfrenta actualmente, la actividad antropogénica ha promovido el incremento de los gases de efecto de invernadero (GEI), principalmente el bióxido de carbono (CO₂), cuyo aumento y posibles efectos nocivos en la agricultura y la productividad de los bosques se percibe como uno de los más grandes desafíos ambientales a nivel mundial, en consecuencia se identifica la necesidad de reducir los GEI que se emiten a la atmósfera principalmente por la actividad industrial y las prácticas de manejo de la tierra (Jiménez *et al.*, 2013).

Diversos autores en todo el mundo reconocen que los ecosistemas forestales funcionan como el principal depurador biológico de los GEI, particularmente que los bosques son capaces de secuestrar grandes cantidades de dióxido de carbono atmosférico (Pompa-García & Sigala-Rodríguez, 2017), motivo por el que resulta importante evaluar el contenido de carbono en especies forestales, pues representa una fuente de información esencial en programas diseñados para mitigar el calentamiento global.

Los bosques mexicanos han sido documentados como diversos en cuanto a especies (Sarukhán *et al.*, 2009) y poseen un gran potencial como sumideros de carbono, por lo que representan una oportunidad para contribuir a mitigar el cambio climático, para lo que se considera viable cualquier acción que tenga como resultado una reducción en las emisiones de los GEI o la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles (Yerena *et al.*, 2012). Por otra parte, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2010) reconoce dos procesos básicos para reducir la cantidad de GEI: a) mediante la reducción de emisiones antropogénicas de CO₂; y b) creación y/o mejoramiento de los sumideros de carbono en la biósfera, motivo por el que Razo (2013) propone la

conservación de bosques por medio de prácticas silvícolas como una forma de compensar o mitigar impactos por emisiones de CO₂, el fomento de aplicar prácticas manejo forestal sustentable a los bosques naturales, impacta directamente en la producción, aprovechamiento, conservación, protección y restauración de ecosistemas forestales; sin embargo, adicional a la generación de productos maderables útiles para la humanidad, es posible mejorar la fijación de carbono y mantener estables sus depósitos.

Si bien hay mucho por hacer con respecto al cambio climático, los bosques constituyen un elemento trascendental en la solución del problema, no solo por su rol en la captura y secuestro de carbono, sino también porque su efecto de sustitución mediante la utilización de sus productos (madera) implica el empleo de menores cantidades de energías fósiles. Considerando lo anterior, se planteó el objetivo de generar coeficientes de concentración de carbono en las secciones estructurales de las especies forestales presentes en la Sierra Alta Hidalguense, para evaluar su capacidad de captura de este elemento en la parte aérea de los bosques templados.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Zacualtipán, Hidalgo, entre las coordenadas 20° 37' 26" - 20° 35' 20" LN y 98° 35' 23" - 98° 37' 48" LO, en terrenos de uso común del ejido Atopixco, que tiene una superficie total de 1 118.904 ha. La precipitación media anual es de 1 780 mm, con altitud media de 2 062 msnm y presenta un clima templado húmedo, con temperatura promedio de 13.5 °C), con suelos tipo Feozem haplico (Hh), ricos en materia orgánica, y Regosol calcarico (Rc) en las zonas con mayor pendiente, La vegetación corresponde a bosque templado de pino-encino; predominando *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. sobre otras especies nativas, como efecto directo de las actividades de manejo forestal en donde destaca como la especie de principal interés económico (Ronquillo, *et al.*, 2022).

3.2.2 Selección de sitios de muestreo

Se colectaron muestras botánicas de los ejemplares leñosos en el bosque bajo manejo silvícola con regeneración ya establecida y tallas variables para obtener segmentos estructurales de las especies presentes en el área. Se colectaron al azar tres muestras de cada parte estructural (hoja, rama y tallo) de las 30 especies leñosas existentes en un trayecto de 7 km dentro de la superficie con bosque bajo manejo forestal del ejido Atopixco (658.7 ha), para lo que se utilizaron materiales como: equipo de orientación y navegación terrestre (GPS Garmin 60Cx), brújula (Suunto Mc-2 Compass); Software para el manejo de Sistemas de Información Geográfica (QGIS), cintas métricas y prensa botánica.

3.2.3 Preparación de la muestra

Se depositó cada componente estructural en bolsas de papel previamente etiquetadas para evitar pérdidas y se llevaron al laboratorio de semillas y germoplasma del Instituto de Ciencias Agropecuarias-UAEH para ser identificadas y colocadas en la estufa de secado marca GRIEVE® modelo LW-201C a temperatura de 80 °C hasta alcanzar peso constante (Figura 6). Las muestras, previamente identificadas y secadas hasta obtener peso constante, fueron procesadas según los procedimientos recomendados por Pompa García & Yerena Yamaliel (2014).



Figura 6. Colecta y preparación de muestras, donde: a). muestra botánica de especies, b). Identificación y c). Secado y seccionado de muestras.

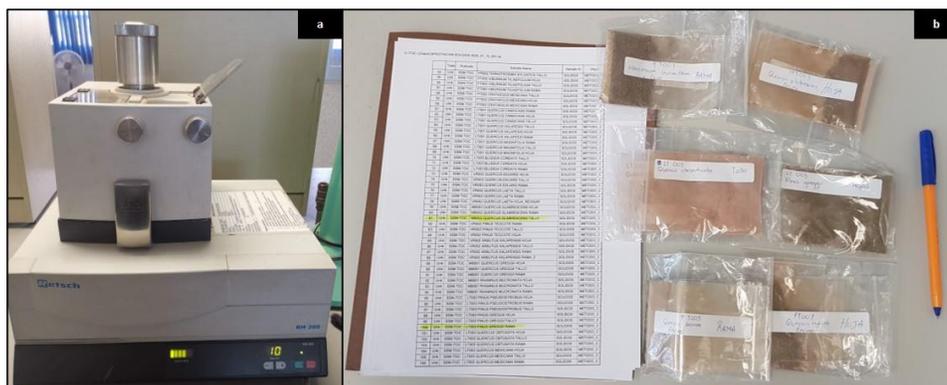


Figura 7. Triturado y homogeneización de muestras, donde: a). mortero triturador y b). muestras trituradas de las partes estructurales (hoja, rama, tallo).

Las ramas y tallo fueron seccionados con tijeras de jardinería en partes pequeñas para ser introducidos en un triturador tipo Mortero Marca RENOC Modelo RNG00, hasta que las partículas quedaran de una textura similar a la arcilla (aproximadamente de 0.002 mm) (Figura 7). Posteriormente en el Área Académica de Química del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería-UAEH, con una balanza analítica AND GR-120 se pesaron 10 mg en Boats previamente esterilizados, estos fueron introducidos con ácido nítrico al 5 % y secados en el equipo Mufla Lindberg/Blue Modelo Box Furnace BF51848A-1 durante una hora, para evitar contaminación de las muestras o que se humedecieran, mientras se utilizaban se colocaban en cajas Petri y estas a su vez en un desecador (Figura 8). Finalmente se determinó el contenido de carbono orgánico utilizando el equipo TOC-L modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®, en el módulo de muestras sólidas, que analiza las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa a 900 °C (Figura 9). Se realizaron tres repeticiones para cada componente estructural de las 30 especies muestreadas.



Figura 8. Preparación de muestras individuales, donde a). esterilización de boats con ácido nítrico, b). desecador de cristal con vacío, c), secado en Mufla y d). peso de muestra en balanza analítica.

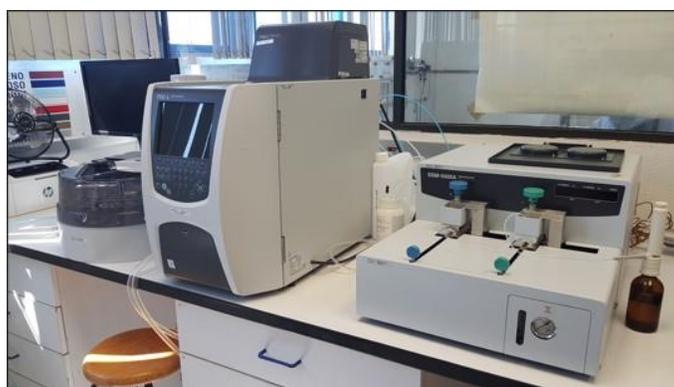


Figura 9. Equipo TOC Analyzer, modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®.

3.2.4 Análisis estadístico

Con los datos obtenidos de las muestras, y al tratarse de una distribución uniforme discreta, se obtuvieron valores de concentración de carbono sometidos a un análisis de varianza ($P \leq 0.05$) y pruebas de comparación múltiples de medias Tukey, para identificar las diferencias entre los contenidos medios de carbono de las secciones estructurales de las 30 especies. Los datos se transformaron con logaritmo natural (ln) y se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. El análisis estadístico se hizo con el programa Minitab® versión 18.1 (Minitab, 2017).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Especies leñosas identificadas en el área de estudio

Las especies leñosas identificadas en el bosque del ejido corresponden al estrato arbóreo y arbustivo, cuyo grado de desarrollo depende de las condiciones microambientales del sitio y de la presencia de algunos fenómenos naturales como incendios forestales, plagas, enfermedades y eventos meteorológicos, cuando ocurren fuera de su régimen histórico natural (Razo *et al.*, 2013) y también a las condiciones promovidas por el manejo forestal que se realiza en dicho bosque. En los recorridos de campo se identificaron 30 especies: *Ageratina ligustrina* R.M.King & H.Rob., *Arbutus xalapensis* Carl Sigismund Kunth, *Buddleja cordata* Carl Sigismund Kunth, *Clethra mexicana* DC., *Cornus excelsa* H.B.K., Nov. Gen. & Sp (Kunth), *Crataegus mexicana* DC., *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, *Pinus pseudostrobus* John Lindley, *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham, *Prunus serotina* Jakob Friedrich Ehrhart, *Quercus affinis* Scheidw., *Quercus canby* William Trelease, *Quercus candicans* Diederich von Schlechtendal y Adelbert von Chamisso, *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl., *Quercus deserticola* William Trelease, *Quercus eduardi* William Trelease, *Quercus glabrescens* George bentham, *Quercus greggii* Alphonse Louis Pyramus de Candolle, *Quercus laeta* Frederik Michael Liebmann, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl., *Quercus magnolifolia* Luis Née, *Quercus mexicana* Frederick Michael Liebmann, *Quercus obtusata* Aimé Jacques Alexandre Goujoud Bonpland, *Quercus rugosa* Luis Née, *Quercus xalapensis* Aimé Bonpland, *Rhamnus mucronate* Diederich

Franz Leonhard von Schlechtendal, *Ternstroenia sylvatica* Jacques Denys Denis Choisy, *Vaccinium leucanthum* Schltdl. y *Viburnum tiliaefolium* Henri-Louis Duhamel du Monceau.

3.3.2 Características por componente estructural

En el área incorporada al manejo silvícola del ejido Atopixco se justifica la diversidad de especies debido a la apertura del dosel que promueven las intervenciones consideradas como cortas de regeneración o cortas totales con regeneración inmediata. En el Cuadro 6 presentan los resultados obtenidos para la concentración de carbono de las especies presentes en el área de estudio.

3.3.3 Coeficientes de carbono para especies forestales

Cuadro 6. Concentración de carbono para 30 especies forestales de Hidalgo, México.

Especie	Nombre común	Concentración de carbono (%)			
		Hoja	Rama	Tallo	Promedio
<i>Ageratina ligustrina</i>	Barretillo	44.64	44.85	47.88	45.79
<i>Arbutus xalapensis</i>	Madroño	49.75	45.81	49.45	48.34
<i>Buddleja cordata</i>	Tepozán	48.18	47.36	48.95	48.16
<i>Clethra mexicana</i>	Pahuilla	44.64	46.95	47.75	46.45
<i>Cornus excelsa</i>	Clamahuacal	46.05	46.30	46.85	46.40
<i>Crataegus mexicana</i>	Tejocote	47.22	46.67	45.16	46.35
<i>Pinus greggii</i>	Pino	51.45	49.34	48.73	49.84
<i>Pinus patula</i>	Ocote	51.39	48.04	49.37	49.60
<i>Pinus pseudostrabus</i>	Pino blanco	50.87	50.70	49.25	50.28
<i>Pinus teocote</i>	Pino	51.58	48.33	49.26	49.72
<i>Prunus serotina</i>	Capulín	47.91	48.19	46.29	47.46
<i>Quercus affinis</i>	Encino laurelillo	49.08	45.48	45.61	46.72
<i>Quercus canby</i>	Encino	48.58	48.88	45.67	47.71
<i>Quercus candicans</i>	Encino hojancha	48.67	44.98	46.46	46.70
<i>Quercus crassifolia</i>	Encino	51.41	47.02	47.22	48.55
<i>Quercus deserticola</i>	Encino	47.55	38.02	44.74	43.44
<i>Quercus eduardi</i>	Encino	47.41	46.31	48.44	47.39
<i>Quercus glabrescens</i>	Encino	49.80	46.56	46.26	47.54
<i>Quercus greggii</i>	Encino	47.13	47.09	44.21	46.15
<i>Quercus laeta</i>	Encino	45.20	45.87	46.62	45.90
<i>Quercus laurina</i>	Encino	45.80	47.34	46.40	46.51
<i>Quercus magnolifolia</i>	Encino hojancha	48.49	51.51	46.93	48.98
<i>Quercus mexicana</i>	Encino	46.94	45.68	44.36	45.66
<i>Quercus obtusata</i>	Encino tepozán	47.42	46.45	44.86	46.24

Especie	Nombre común	Concentración de carbono (%)			
		Hoja	Rama	Tallo	Promedio
<i>Quercus rugosa</i>	Encino	49.65	46.05	45.89	47.20
<i>Quercus xalapensis</i>	Encino	51.81	47.94	44.20	47.98
<i>Rhamnus mucronata</i>	ND	49.78	43.92	47.89	47.20
<i>Ternstroenia sylvatica</i>	Trompillo	49.11	48.60	46.93	48.21
<i>Vaccinium leucanthum</i>	Cocol	41.95	45.94	45.52	44.47
<i>Viburnum tiliaefolium</i>	Peludilla	47.03	44.19	46.55	45.92

Considerando los resultados por componente estructural en las 30 especies, las hojas representan 1.54 % mayor concentración que las ramas y 1.43 % mayor que el tallo. Siendo *Quercus xalapensis* la especie con mayor concentración en hoja (51.81 %), *Quercus magnolifolia* reflejó la mayor concentración en rama (51.51 %) y *Arbutus xalapensis* con 49.45 % representa la mayor concentración en tallo para el mencionado grupo de especies (Cuadro 7).

La suma promedio de los valores obtenidos por especie, agrupando los tres componentes estructurales, la especie que presentó mayor concentración fue *Pinus pseudostrobus* (50.28 %), seguido por *P. greggii*, *P. teocote* y *P. patula*; y la de menor concentración promedio fue *Quercus deserticola* (43.44 %). En la Figura 10 se aprecia gráficamente que los máximos valores son ocupados por el grupo de coníferas existentes en el bosque del ejido Atopixco.

Cabe destacar que 50 % de las especies encontradas corresponden al género *Quercus*, del cual, la especie con mayor concentración promedio es *Quercus magnolifolia* (48.98 %) y en *Quercus deserticola* se obtuvo el menor valor, incluso de todas las muestras analizadas.

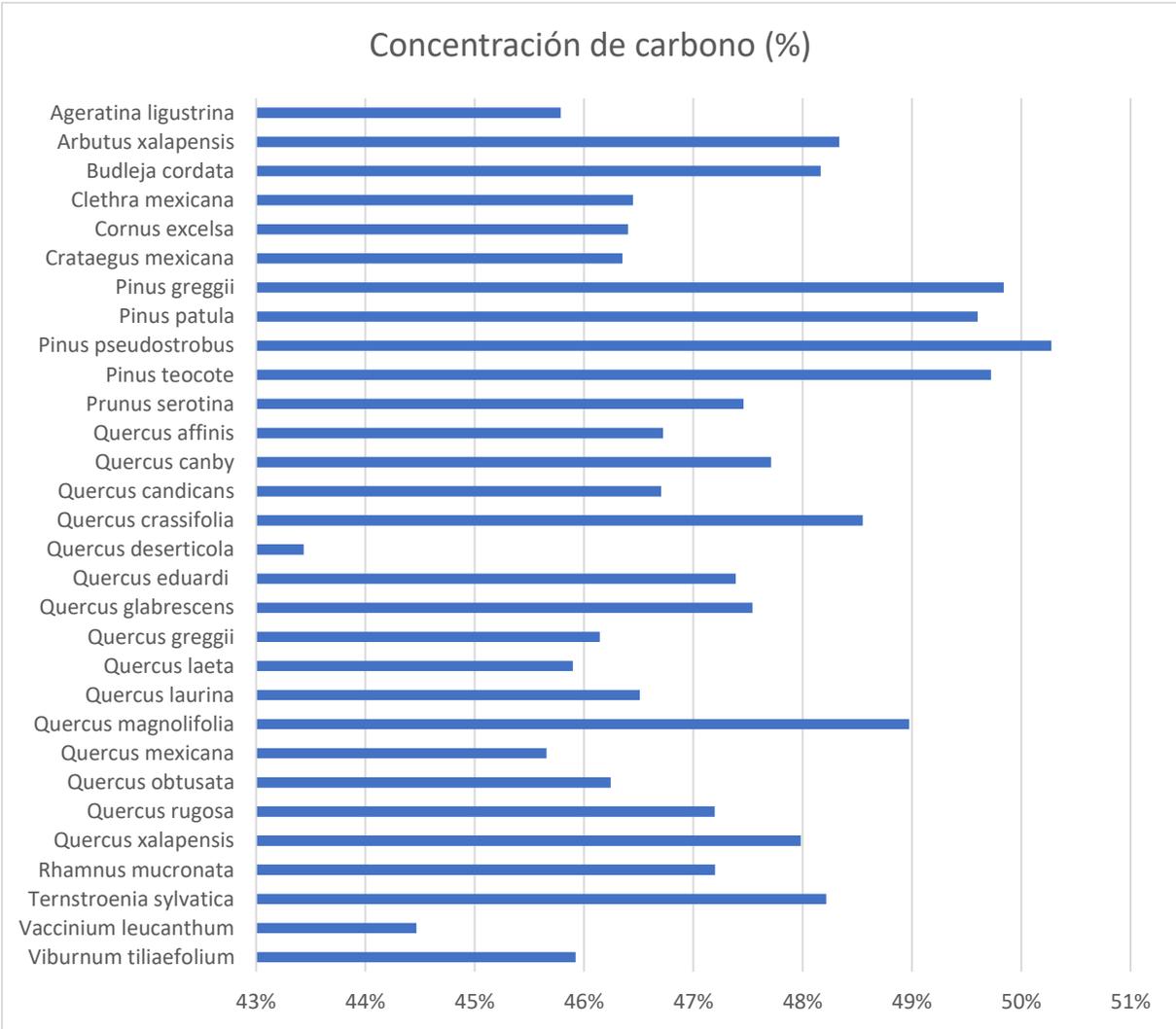


Figura 10. Concentración promedio de carbono por especie (Fuente: ejido Atopixco 2021).

Cuadro 7. Concentración de carbono por componente estructural.

Componente estructural	Concentración de carbono (%)		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Hoja	41.95	48.22 ± 0.05	51.81
Rama	38.02	46.68 ± 0.05	51.51
Tallo	44.20	46.79 ± 0.03	49.45

± varianza de la población

Como se trata de un bosque manejado con fines maderables, cuya especie de mayor interés comercial es *Pinus patula*, en la Figura 11 se muestran las concentraciones promedio de carbono que presentó durante sus cinco etapas de desarrollo, en donde destaca la etapa de latizal cuya concentración de carbono es de 51.15 %, con una diferencia de 2.55 % con respecto de la etapa monte bravo que fue en la que se obtuvo el valor mínimo para dicha especie.

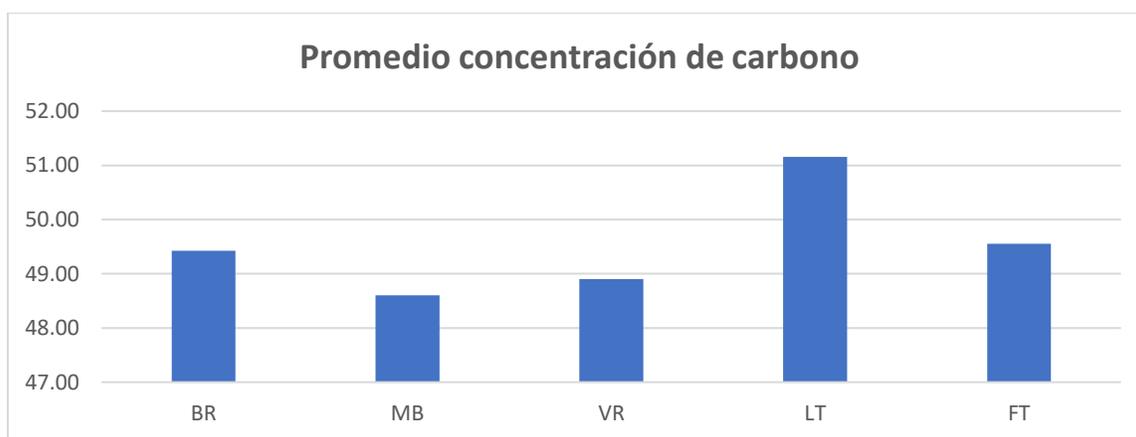


Figura 11. Concentración de carbono para la especie *Pinus patula* en sus diferentes etapas de desarrollo: brinzal (BR), monte bravo (MB), vardascal (VR), latizal (LT) y fustal (FT), (Fuente: ejido Atopixco 2021).

La evaluación del contenido de carbono se considera esencial para las actuales estrategias de mitigación del calentamiento global (Pompa-García & Sigala-Rodríguez, 2017). Se han asumido valores genéricos, como el 50 % propuesto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Sin embargo, investigaciones recientes indican que existen variaciones substanciales en concentraciones de carbono incluso entre árboles y tejidos (Hernández-Vera, 2017). El presente estudio reporta variaciones a las estimaciones con metodologías similares, entre ellas, las reportadas por Jiménez *et al.* (2013) en el estado de Nuevo León, quienes registraron para *Arbutus xalapensis*, *Pinus pseudostrobus* y *Quercus canby*, variaciones de 4.12, 0.07 y 1.77 % respectivamente, todas ellas por encima de los resultados estimados en el presente estudio. Sin embargo, Yerena *et al.* (2012), en su estudio realizado en Coahuila y Nuevo León, estimó para *P. pseudostrobus* un contenido de carbono de 50.35 %, reportando de

igual manera, valores para *P. greggii* y *P. teocote* con 47.13 y 47.48 %; lo que significó variaciones menores al 2 % en las tres especies que incluye el presente trabajo. De igual manera, para especies leñosas de menor talla, se puede considerar la diferencia reportada por Razo *et al.* (2015) en donde los hallazgos difieren cerca del 5 % para *Buddleja cordata*, *Prunus serótina* y *Quercus eduardi*, lo cual podría deberse a que al tratarse de individuos de menor talla, las muestras pudieron diferir en su etapa de desarrollo y estado de lignificación de los individuos sometidos al proceso metodológico.

3.4 Conclusiones

La concentración de carbono atmosférico en los componentes estructurales del arbolado, reflejan claramente las bondades de grupos de especies en donde destacan las coníferas, mismas que favorecen la producción maderable y por consecuencia la obtención de productos forestales de mediana y larga duración que son útiles a la humanidad, mientras que su eficiencia como sumideros de carbono en los bosques cultivados, permite su incorporación a esquemas diseñados para mitigar el calentamiento global.

Considerando los hallazgos de concentraciones de carbono que los árboles cultivados fijan en su estructura, el presente estudio refleja uno de los principales beneficios del manejo forestal como estrategia de mitigación del cambio climático. Los valores encontrados como coeficientes de carbono para cada especie, pueden ser utilizados como factor de conversión de biomasa a carbono para minimizar incertidumbres asociadas al empleo común de valores por defecto en la estimación de carbono almacenado en biomasa aérea de bosques.

3.5 Referencias

Hernández-Vera, D., Pompa-García, M., Yerena-Yamallel, J. I., & Alanís-Rodríguez, E. (2017). Variación de la concentración de carbono en tres especies mexicanas de pino. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 381-386. doi: 10.4067/S0717-92002017000200015

-
- Jiménez Pérez, Javier, Treviño Garza, Eduardo Javier, & Yerena Yamallel, José Israel. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(17), 50-61. Recuperado en 28 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000300006&lng=es&tlng=es
- Pompa-García, Marín, & Sigala-Rodríguez, José Ángel. (2017). Variation of carbon uptake from forest species in Mexico: a review. *Madera y bosques*, 23(2), 225-235. doi: 10.21829/myb.2017.2321512
- Pompa-García, M., & Yerena-Yamalliel, J. I. (2014). Concentración de carbono en *Pinus cembroides* Zucc: fuente potencial de mitigación del calentamiento global. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(3), 169-175. doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.04.014
- Razo Zárate, R., Gordillo Martínez, A. J., Rodríguez Laguna, R., Maycotte Morales, C. C., & Acevedo Sandoval, O. A. (2015). Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 58-67. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000500005
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, R., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego, en el Parque nacional El Chico. *Madera y bosques*, 19(2), 73-86. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/617/61728317006.pdf>
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J., & Manzur-Chávez, N. (2022). Carbon storage during the development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 28(3). doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009
- Sarukhán, J., Halffter, G., Koleff, P., González, R., Carabias, J., Marsh, I., ... & De La Maza, J. (2009). Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual,
-

evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 100 p.

Yerena Yamallel, J. I., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Alanís Rodríguez, E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(13), 49-56. Recuperado en 28 de enero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000500005&lng=es&tlng=es.

CAPITULO 4

4. Secuestro de carbono atmosférico por bosques cultivados y su potencial en el mercado voluntario de carbono

Resumen

El Mercado Voluntario de Carbono (MVC) ha cobrado gran fuerza a nivel internacional, al consolidarse como un instrumento económico atractivo y socialmente responsable para empresas, industrias, organizaciones e individuos que buscan rentabilidad y compensar las emisiones de GEI, adicionales a la mejora tecnológica de procesos, mediante las reducciones de estos gases en busca de sostenibilidad y responsabilidad social corporativa. Desde la década de 1990, el incremento a la conciencia social sobre el cambio climático, permitió el surgimiento de diversas iniciativas voluntarias de compensación de carbono, para compensar emisiones de carbono en lugares distintos a la fuente. Posteriormente se establecieron algunos de los estándares que sentaron las bases para el MVC y proporcionaron marcos de referencia para la medición, verificación y certificación de las reducciones de emisiones de carbono. Los árboles absorben CO₂ de la atmósfera de manera natural y lo almacenan en su biomasa, es así que los bosques funcionan como reservorios de CO₂. Considerando el continuo incremento en la demanda global voluntaria de créditos de carbono; el presente capítulo propone un esquema de compensación financiera para los bosques de la Sierra Alta Hidalguense, mediante su incorporación a un estándar internacional de certificación del MVC que permita validar y apreciar la contribución del manejo forestal sustentable en términos de acción climática. El MVC representa una importante oportunidad de diversificación productiva e incremento a la rentabilidad silvícola en terrenos forestales que ya generan beneficios económicos para sus poseedores por el aprovechamiento de productos forestales maderables.

Abstract

The Voluntary Carbon Market (VCM) has taken great strength internationally, consolidating itself as an attractive and socially responsible economic instrument for companies, industries, organizations and individuals seeking profitability and offsetting GHG emissions, in addition to the technological improvement of processes, by reducing these gases looking for sustainability and corporate social responsibility. Since the 1990s, the increase in social awareness of climate change has allowed the emergence of many voluntary carbon offset initiatives to offset carbon emissions in other places than source. Subsequently, some of the standards that laid the foundations for the VCM were established and provided reference frameworks for the measurement, verification and certification of carbon emission reductions. Trees naturally absorb CO₂ from the atmosphere and store it in their biomass, so forests function as CO₂ reservoirs. Considering the continued increase in the voluntary global demand for carbon credits; This chapter proposes a financial compensation scheme for the forests of Sierra Alta Hidalguense, through its incorporation into an international VCM certification standard that allows validating and appreciating the contribution of sustainable forest management in terms of climate action. The VCM represents an important opportunity for productive diversification and increased forestry profitability in forest lands that currently generate economic benefits for their owners through the timber forest products.

4.1 Introducción

El marco internacional del mercado de carbono ha evolucionado a lo largo de los años, y sus antecedentes se remontan a iniciativas y desarrollos importantes en el campo de la mitigación del cambio climático como el Protocolo de Kyoto, originado en la Convención Marco de las Naciones Unidas (CMNUCC), misma que tuvo lugar en Kyoto, Japón el 11 de diciembre de 1997, entró en vigor en 2005, siendo ratificada su vigencia hasta 2020. Originalmente para los países en desarrollo y las economías en transición se tenía un calendario cuyo objetivo fue la reducción de emisiones de gases de efecto

invernadero, así como promover el desarrollo sustentable de los países en desarrollo (Estrada-Chavira, 2022). En dicho Protocolo se propusieron instrumentos comerciales como los bonos de carbono para reducir los Gases de Efecto Invernadero (GEI), responsables del calentamiento global.

El Acuerdo de París en 2015 concluyó con la meta de limitar el calentamiento global a 2 °C para el fin del siglo, además de mantener los esfuerzos para disminuirlo a 1.5 °C. Lo que significa un nuevo paradigma en la consecución del objetivo en el tema de cambio climático, ya que a diferencia de lo establecido en el Protocolo de Kyoto, el objetivo no se mide más en volúmenes de CO₂ emitido; razón por la cual cada país es libre de decidir sobre su contribución en la disminución de emisión de GEI y sobre los mecanismos adecuados para lograrlo. En este marco, México tiene por objetivo reducir sus emisiones en un 25% para 2030 y mantener su participación en el Acuerdo de París (Rontard, Hernández & Robledo, 2020).

Después del Protocolo de Kyoto, se llevaron a cabo negociaciones internacionales adicionales para abordar el cambio climático, como la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Estos procesos de negociación influyeron en la creación de marcos y estándares en el mercado voluntario, al tiempo que fomentaron la cooperación internacional en la mitigación del cambio climático.

Considerando los mecanismos de financiamiento empleados para la mitigación de emisiones en el sector forestal a escala internacional y las experiencias desarrolladas en México para cumplir con los objetivos nacionales, los proyectos forestales de carbono han participado en mercados voluntarios y de cumplimiento, aunque los proyectos de países en vías de desarrollo han tenido un papel limitado en el marco del Protocolo de Kyoto (Ranero & Covaleta, 2018)

En los últimos años la figura del Mercado Voluntario de Carbono (MVC), comprendiéndose como esferas financieras en donde es posible negociar la compra-venta de bonos de carbono, ha cobrado gran fuerza a nivel internacional, representando un instrumento económico atractivo y socialmente responsable para empresas, industrias, organizaciones entre otras, que buscan rentabilidad y compensar las emisiones de GEI, mediante las reducciones de estos gases que se han logrado a partir del desarrollo e implementación de mecanismos de reducción de emisiones o de secuestro de los mismos (González & Achinelli, 2017). Cuando se hace referencia al Mercado de Carbono es muy importante aclarar que este se divide en dos tipos: el Mercado Regulado de Carbono y el MVC.

A medida que creció la conciencia sobre el cambio climático, surgieron diversas iniciativas voluntarias de compensación de carbono a partir de la década de 1990. Estas iniciativas permitían a las compañías y a los individuos compensar sus emisiones de carbono a través de la financiación de proyectos de reducción de emisiones o captura de carbono en otros lugares. A finales de la década de 2000, se establecieron algunos de los estándares y organizaciones que sentaron las bases para el mercado voluntario de carbono y proporcionaron marcos de referencia para la medición, verificación y certificación de las reducciones de emisiones de carbono.

Estos antecedentes han contribuido al desarrollo y la evolución del marco internacional del mercado voluntario de carbono, estableciendo estándares, metodologías y mejores prácticas para la medición y certificación de las reducciones de emisiones de carbono en proyectos voluntarios. A medida que avanza la conciencia sobre el cambio climático y la importancia de la acción climática, diversos autores reconocen la alta probabilidad de que el marco continúe adaptándose a los desafíos y oportunidades futuras.

Dependiendo de sus características, manejo y circunstancias, los bosques son capaces tanto de emitir como de secuestrar bióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, considerado como uno de los principales GEI que contribuyen al cambio climático. Es así como a través del proceso de fotosíntesis, los árboles absorben CO₂ de la atmósfera de una manera natural y lo almacenan como carbono en su biomasa, misma que podría interpretarse como el fuste, ramas, hojas y raíces, de igual manera el carbono se almacena en el suelo del bosque, las plantas del sotobosque y en la hojarasca. Destacando además que los productos maderables que se aprovechan de los bosques bajo manejo forestal, también pueden brindar un almacenamiento de carbono a largo plazo. Es así como los bosques funcionan como reservorios al almacenar CO₂ y, dependiendo de las actividades silvícolas o de impactos por eventos naturales, estos pueden tener un efecto negativo o positivo en el cambio climático (CAR. 2022).

El mercado voluntario de carbono no está regulado por bases legales específicas a nivel internacional. A diferencia del mercado regulado de carbono, como el establecido por el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París, el mercado voluntario opera principalmente a través de acuerdos y compromisos voluntarios entre partes interesadas. Sin embargo, existen bases legales y políticas generales que respaldan y proporcionan un marco para el mercado voluntario de carbono. Estas bases legales pueden variar según el país o región, dado que algunos países y regiones tienen leyes y regulaciones relacionadas con el cambio climático que promueven la reducción de emisiones y la adopción de enfoques basados en el mercado. Estas leyes pueden incluir disposiciones que fomenten la participación en el mercado voluntario de carbono o proporcionen incentivos para la compensación voluntaria de emisiones.

Algunos gobiernos implementan programas y políticas que respaldan la participación en el mercado voluntario de carbono. Estos pueden incluir incentivos financieros, exenciones fiscales o reconocimiento oficial de las compensaciones voluntarias de carbono. Aunque no son bases legales en sí mismas, los estándares y

normas de certificación en el mercado voluntario de carbono pueden proporcionar un marco de referencia y requisitos técnicos que respaldan la integridad y la transparencia de los proyectos y las compensaciones de carbono, lo que representa los principales desafíos que actualmente son liderados en el mundo del mercado voluntario de carbono por estándares como Verified Carbon Standard, Gold Standard, American Carbon Registry, Climate Action Reserve y Plan Vivo (Pan *et al.* 2022)

De acuerdo con Pan *et al.* (2022), el mercado voluntario seguirá desempeñando un papel esencial en el futuro, ya que se estima que la demanda global voluntaria de créditos de carbono aumentará 15 veces para 2030 y 100 veces para 2050.

Considerando lo anterior, para el presente trabajo se planteó el objetivo de proponer un esquema de compensación financiera que incentive a los dueños de bosques en la Sierra Alta Hidalguense, evaluando su incorporación a algún estándar internacional de certificación del mercado voluntario de carbono que permita validar y apreciar la contribución del manejo forestal sustentable en términos de acción climática.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Área de estudio

El área de estudio está ubicada en el municipio de Zacualtipán, Hidalgo, entre las coordenadas 20° 37' 26" - 20° 35' 20" LN y 98° 35' 23" - 98° 37' 48" LO, en terrenos de uso común del ejido Atopixco, que tiene una superficie total de 1 118.904 ha. La precipitación media anual es de 1 780 mm, con altitud media de 2 062 msnm y presenta un clima templado húmedo, con temperatura promedio de 13.5 °C), con suelos tipo Feozem haplico (Hh), ricos en materia orgánica, y Regosol calcarico (Rc) en las zonas con mayor pendiente, La vegetación corresponde a bosque templado de pino-encino; predominando *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. sobre otras especies nativas,

como efecto directo de las actividades de manejo forestal en donde destaca como la especie de principal interés económico (Ronquillo, *et al.*, 2022).

4.2.2 Estándares del mercado voluntario de carbono para bosques mexicanos.

En el mercado voluntario de carbono, existen varios estándares reconocidos que se utilizan para la certificación de proyectos forestales en México. Estos estándares establecen criterios y requisitos para la medición, verificación y certificación de las reducciones de emisiones y del aumento en los sumideros de carbono en los bosques mexicanos.

4.2.2.1 Atributos de acción climática

Los estándares de carbono utilizados en el mercado voluntario de carbono comparten características comunes que se centran en la medición, verificación y certificación de las reducciones de emisiones de carbono.

Rigor y credibilidad

Están diseñados para ser rigurosos y creíbles. Esto implica el uso de metodologías científicas y técnicas sólidas para cuantificar y verificar las reducciones de emisiones de carbono. Los estándares deben ser transparentes en cuanto a sus requisitos y procesos de certificación, lo que garantiza la integridad de los bonos de carbono generados.

Adicionalidad

La adicionalidad es un principio clave en la certificación de bonos de carbono. Significa que las reducciones de emisiones certificadas son adicionales a lo que habría ocurrido en ausencia del proyecto de mitigación en ausencia de un mercado de compensación. Los estándares establecen criterios específicos para demostrar que las

reducciones de emisiones son adicionales y no se deben simplemente a las obligaciones legales o regulaciones existentes. Estos criterios se dividen en dos categorías: una prueba de requisitos legales y una prueba estándar de desempeño.

Las pruebas estandarizadas podrían involucrar determinaciones de que un proyecto:

- No es obligatorio por ley
- Supera la práctica común
- Involucra un tipo particular de tecnología de alto rendimiento.
- Tiene una tasa de emisión más baja que la mayoría de los demás en su clase (por ejemplo, en relación con un estándar de desempeño)

Metodologías de cálculo

Los estándares de carbono pueden utilizar diversas metodologías para calcular las emisiones de GEI y las reducciones de emisiones. Estas metodologías pueden variar según el sector de actividad, como energía renovable, eficiencia energética, agricultura, silvicultura, entre otros. Las metodologías deben ser consistentes, precisas y transparentes.

Verificación independiente

Los estándares de carbono requieren que las reducciones de emisiones sean verificadas por terceros independientes, debidamente acreditados para cada estándar en específico. Estos verificadores evalúan el proyecto, los datos y las metodologías utilizadas para calcular las reducciones de emisiones. La verificación independiente brinda mayor confianza en la calidad y la precisión de los bonos de carbono emitidos.

Reporte y seguimiento

Los estándares de carbono establecen requisitos para el reporte y el seguimiento de las emisiones y las reducciones de carbono a través del tiempo. Los proyectos certificados deben proporcionar informes periódicos y transparentes que demuestren su correcto desempeño y cumplimiento con los criterios del estándar, dicho seguimiento es también sujeto de verificación independiente.

Permanencia

Los estándares de carbono también pueden incluir requisitos de permanencia para garantizar que las reducciones de emisiones sean duraderas y no se reviertan en el corto plazo. Esto se logra a través de mecanismos como el monitoreo continuo y la adopción de salvaguardias para evitar la pérdida de reducciones de emisiones certificadas.

4.2.2.2 Alternativas viables para bosques mexicanos

En el mercado voluntario de carbono, existen varios estándares utilizados para la medición, verificación y certificación de las reducciones de emisiones de carbono. Algunos de los estándares más reconocidos y utilizados, que son aplicables a los ecosistemas forestales mexicanos por las particularidades de megadiversidad, tipos de propiedad, esquemas de gobernanza y manejo forestal, se describen a continuación.

Verified Carbon Standard (VCS-VERRA)

El estándar VCS es uno de los más utilizados a nivel mundial en el mercado voluntario de carbono. Fue desarrollado por la organización VERRA, y se centra en la verificación de proyectos de reducción de emisiones de GEI en diversos sectores, como energía renovable, eficiencia energética y manejo forestal, este último denominado VCS Forest Carbon Offset Program enfocado en la conservación y gestión sostenible de los bosques, así como en la reforestación y forestación. Proporciona un marco para la certificación de reducciones de emisiones y proyectos de secuestro de carbono, incluidos

los proyectos forestales. El VCS considera metodologías específicas para la medición y verificación de las emisiones de carbono y la reducción de deforestación en los bosques mexicanos.

Gold Standard (GS)

Es otro estándar reconocido en el mercado voluntario de carbono, fue creado en 2003 por Gold Standard Foundation y se centra en proyectos de energía renovable, eficiencia energética, manejo forestal y desarrollo sostenible, así como su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas y la participación de las comunidades locales. Además de las reducciones de emisiones de carbono, también se enfoca en el logro de beneficios sociales y ambientales adicionales. En el caso de proyectos forestales en México, el Gold Standard ha desarrollado una metodología específica llamada "AFOLU - Agriculture, Forestry, and Other Land Use" (Uso de la Tierra, Agricultura y Silvicultura). Esta metodología establece los lineamientos para la certificación de proyectos forestales que generen créditos de carbono en el mercado voluntario.

Climate Action Reserve (CAR)

Es un programa de certificación de carbono con sede en los Estados Unidos. Si bien no es exclusivamente para proyectos forestales, incluye criterios para proyectos de mitigación forestal y puede aplicarse a proyectos forestales en México. El CAR tiene sus propias metodologías y procesos de certificación para verificar y cuantificar las reducciones de emisiones y el almacenamiento de carbono en los bosques. Incorpora salvaguardas sociales y ambientales enfocadas a las particularidades de tenencia de la tierra de los bosques mexicanos, considera también un Protocolo Forestal para México (en octubre de 2022 publicó su versión 3.0), mismo que incluye una categoría para Manejo Forestal Mejorado, en la cual tienen congruencia los bosques bajo manejo forestal.

Establece los requisitos y procedimientos para medir, verificar y reportar las reducciones de emisiones de carbono generadas por los proyectos forestales en México. Está alineado con las políticas y regulaciones mexicanas relacionadas con la mitigación del cambio climático y se basa en estándares internacionales reconocidos.

Plan Vivo

Es un estándar de certificación y un enfoque de desarrollo sostenible que se centra en la implementación de proyectos forestales de carbono comunitarios y de pequeña escala. Fue desarrollado en 1996 y se ha utilizado en varios países para promover la conservación de los bosques, la mitigación del cambio climático y el desarrollo socioeconómico de las comunidades locales. Se basa en la idea de que los bosques y las comunidades locales están interconectados y que la conservación y restauración forestal pueden proporcionar beneficios tanto ambientales como sociales. El objetivo principal es ayudar a las comunidades rurales y a los propietarios de tierras a generar ingresos sostenibles a través de la gestión forestal y la captura de carbono.

En el contexto de proyectos forestales de carbono en México, Plan Vivo proporciona un marco para la implementación de proyectos que se centran en la mitigación del cambio climático y la promoción del desarrollo sostenible en las comunidades locales. Estos proyectos pueden involucrar la reforestación, la conservación de bosques existentes o la restauración de ecosistemas degradados. Para aplicar el enfoque de Plan Vivo en México, los proyectos deben cumplir con ciertos criterios, como la participación activa de las comunidades locales, la adhesión a principios de gobernanza y derechos de tenencia de la tierra, la medición y verificación de las reducciones de emisiones de carbono, y la generación de beneficios sociales y ambientales adicionales, como la protección de la biodiversidad, el fortalecimiento de la seguridad alimentaria y la mejora de los medios de vida locales.

American Carbon Registry (ACR)

Es un registro y una organización sin fines de lucro que se dedica a establecer estándares y certificar proyectos de reducción de emisiones de GEI. Tiene como objetivo impulsar la acción climática y promover la mitigación del cambio climático a través de la contabilización precisa y verificada de las reducciones de emisiones.

ACR cuenta con un conjunto de protocolos, incluido el protocolo de proyectos forestales, que establecen los requisitos y procedimientos para medir, verificar y reportar las reducciones de emisiones generadas por proyectos forestales de carbono. Estos protocolos están diseñados para garantizar la integridad y precisión en la contabilidad de carbono, así como el cumplimiento de los estándares internacionales reconocidos. En el contexto de proyectos forestales en México, ACR ofrece un marco para la implementación y certificación de proyectos que buscan conservar y aumentar los sumideros de carbono forestal. Los proyectos deben cumplir con aspectos relacionados con la medición del carbono almacenado en los bosques, la documentación y el monitoreo adecuados, así como la demostración de adicionalidad y permanencia de las reducciones de emisiones.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Análisis de estándares del mercado voluntario de carbono

Como resultado del análisis de aplicación de las alternativas disponibles para la certificación de bonos de carbono en bosques mexicanos bajo manejo forestal, se consideró el resumen de los cuadros 8, 9 y 10.

Cuadro 8. Enfoques y soluciones a los desafíos metodológicos de los estándares principales del mercado voluntario de carbono.

Estándar	Adicionalidad	Permanencia	Fugas	Co-Beneficios
Verified Carbon Standard	Identificación de escenarios alternativos, prueba de inversión, prueba de barrera y prueba de práctica común	Análisis de Riesgo de No Permanencia y Determinación de Amortiguación	Factor de fuga por cambio de actividad y efecto de mercado	No debe tener un impacto negativo en el entorno y la comunidad que lo rodea
Gold Standard	Prueba de escenarios alternativos, prueba de inversión, prueba de barreras y riesgos	Establece un horizonte de evaluación específico, implementación de salvaguardas y mecanismos de aseguramiento	Define el alcance del proyecto, evalúa riesgos de posibles fuentes y causas de fugas. Implementa medidas de mitigación	Identifica co-beneficios potenciales y establece métricas para evaluarlos
Climate Action Reserve	Prueba de requisitos legales y prueba de desempeño	Cuenta de reserva y calificación de riesgo de reversión	Factor de fuga, como efecto secundario, en el cálculo de créditos de carbono	Estrategia de aprovechamiento sostenible y manejo de bosques naturales
Plan Vivo	Evaluación de excedentes regulatorios y análisis de barreras	Evaluación de riesgos y un colchón de riesgos de al menos el 10% (20% regularmente)	Identificación de todas las posibles fuentes de fugas	Línea de base socioeconómica para demostrar un impacto positivo en los medios de vida locales y la comunidad
American Carbon Registry	Evaluación de excedentes regulatorios, prueba de barrera y prueba de práctica común	Herramienta ACR para análisis de riesgos y determinación de reservas	Supervisar las fugas debidas al cambio de actividad y estimar las debidas al efecto del mercado	Evaluación de impacto ambiental y comunitario

Cuadro 9. Resumen de los enfoques y soluciones a los desafíos críticos de implementación para estándares principales

Estándar	Monitoreo	Reporte	Verificación
Verified Carbon Standard	Plan de seguimiento e informe de seguimiento	Período de informe contiguo	Procesos rigurosos con organismos de verificación

Estándar	Monitoreo	Reporte	Verificación
Gold Standard	Informe de seguimiento anual que puede involucrar inventario forestal o herramientas tecnológicas de teledetección	Período de informe contiguo	Procesos rigurosos con organismos de verificación certificados al final de cada período de reporte
Climate Action Reserve	Informe de seguimiento anual durante los 100 años posteriores a la emisión	Período de informe contiguo	Procesos estrictos con organismos de verificación al final de cada período de informe
Plan Vivo	Plan de seguimiento, incluido el indicador de rendimiento, la duración y la frecuencia del seguimiento	Reporte anual	Primera verificación dentro de los primeros cinco años y al menos cada cinco años después por parte de un tercero
American Carbon Registry	Plan de seguimiento, incluidas las reservas de carbono y las fuentes de emisión	Período de informe contiguo	Primera verificación dentro de los primeros cinco años y al menos cada cinco años después por organismos de verificación

Cuadro 10. Valoración de aplicabilidad de estándares del mercado voluntario de carbono para los bosques del ejido Atopixco.

Estándar	Ventajas	Limitaciones
Verified Carbon Standard (VCS-VERRA)	Rigor y credibilidad Variedad de sectores y proyectos Metodologías robustas Flexibilidad en diseño del proyecto Reconocimiento internacional	Costos y complejidad Competencia en el mercado Requisitos técnicos y de informes rigurosos
Gold Standard (GS)	Reconocimiento internacional Rigor y credibilidad Enfoque integral de sostenibilidad Orientación hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible	Costos y complejidad Competencia en el mercado Enfoque adicional en beneficios sociales Reconocimiento y mercado limitados
Climate Action Reserve (CAR)	Enfoque regional Adaptabilidad a propiedad social Participación en programas regulatorios Reconocimiento y reputación Vinculación a programas regulatorios Experiencia en proyectos forestales Cuenta con un protocolo específico para los bosques mexicanos	Reconocimiento internacional limitado Competencia en el mercado Requisitos técnicos y de informes rigurosos
Plan Vivo	Enfoque comunitario Integración de múltiples beneficios	Alcance limitado Reconocimiento internacional limitado
American Carbon Registry (ACR)	Reconocimiento regional Vinculación a programas regulatorios	Alcance regional limitado Reconocimiento internacional limitado

Como resultado del análisis, se diseñó un diagrama de flujo referente al proceso de implementación para la certificación de bonos de carbono en bosques bajo manejo

forestal del área de estudio (Figura 12). La descripción de cada parte del proceso se resume a continuación:



Figura 12. Proceso de certificación de bonos de carbono en bosques bajo manejo forestal del ejido Atopixco.

4.3.2 Selección de estándar

Considerando los escenarios esperados con la implementación de estándares aplicables a los bosques mexicanos, el estándar que se adecúa de mejor manera para las condiciones ambientales, sociales y financieras del predio ejidal es el que propone la Reserva de Acción Climática, debido a su reconocimiento internacional, principalmente en el continente americano y simultáneamente se alinea con la regulación mexicana. Actualmente, solo en México cuenta con más de 200 proyectos registrados, cuenta con suficiente credibilidad en el mercado voluntario debido al rigor metodológico que establece el Protocolo Forestal para México (PFM) en su versión 3.0, mismo que aborda

de manera sólida los criterios suficientes para garantizar un enfoque integral de sostenibilidad y cumplimiento a los ODS.

En el contexto del PFM, un proyecto forestal es un conjunto de actividades definidas y diseñadas para aumentar las remociones de CO₂ de la atmósfera a través del aumento de los acervos de carbono forestal en los terrenos forestales (CAR, 2022).

4.3.3 Selección del área

La superficie considerada como área de actividad a considerar en el presente estudio cuenta con 658.7 ha, se encuentran bajo manejo forestal mejorado, aprobado por la SEMARNAT a través del oficio de autorización número: 133.02.03.0178.2014., con modificación al programa de manejo forestal autorizado con oficio No.133.02.03.1001.2017. Vigencia de autorización al 31 de diciembre de 2023. En el ejido se ha realizado el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales maderables desde el año de 1982 a la fecha. Durante este periodo se ha puesto en práctica el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) que incluye los tratamientos silvícolas de corta de regeneración con árboles padre, corta de liberación y corta de aclareo, durante la última década se han aplicado también cortas totales con regeneración inmediata (PMF, ejido Atopixco, 2017).

4.3.4 Evaluación de factibilidad

El Ejido Atopixco fue creado por Resolución Presidencial el 11 de marzo de 1926, por concepto de Dotación de Tierras, decreto que fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 01 de julio de 1926. En seguimiento y actualización de documentación legal, el 09 de diciembre de 1997 se gestionó la Certificación del PROCEDE, obteniendo Carpeta Agraria de Documentos Inscritos. De esta certificación, sustentada en medición realizada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se obtuvo una superficie ejidal total de 1,191.8 hectáreas.

El ejido Atopixco cuenta con la documentación necesaria para demostrar la propiedad del área de proyecto con la documentación legal aplicable para el tipo de propiedad ejidal, así como para demostrar las atribuciones de sus representantes. De igual manera, se cuenta con los documentos probatorios para demostrar que no existen conflictos dentro de la superficie propuesta para el proyecto y actual cumplimiento regulatorio respecto a la normatividad forestal mexicana.

La fecha de inicio del proyecto se determina considerando la fecha en la que el proyecto comenzó las actividades y que puedan ser demostradas mediante evidencias documentales, como puede ser el acta de asamblea que incluya el acuerdo de aprobación del proyecto para identificar la fecha de inicio del mismo. En dicha asamblea se toman diversos acuerdos y se proponen fechas tentativas para el inicio de las capacitaciones presenciales y actividades subsecuentes (Figura 13). Las convocatorias para llevar a cabo las asambleas generales de ejidatarios se emiten en términos de La Ley Agraria vigente y el Reglamento Interno del ejido.

La evidencia documental puede ser justificada mediante:

- Convocatoria de asamblea
- Acta de asamblea
- Lista de asistencia de asamblea
- Material audiovisual utilizado y evidencia fotográfica de asamblea.



Figura 13. Asamblea general de ejidatarios para tratar asuntos relacionados con el proyecto de carbono forestal en ejido Atopixco.

Se deberá documentar también que en asamblea se realizó el análisis de actividades comprometidas, costos y beneficios anticipados por su participación en el proyecto, mencionando los beneficios locales ambientales, beneficios económicos y los mecanismos de mercado, así como de la posible dinámica de distribución o uso de los recursos generados para los miembros de la comunidad. El ejido tiene la capacidad de elegir tanto el origen de los fondos de inversión para la implementación del proyecto, como el destino de los beneficios económicos derivados de su participación, por lo que se debe esclarecer que los miembros de la asamblea ejidal son los únicos responsables de decidir sobre su uso.

Se debe elegir a una persona que fungirá como coordinador del proyecto, considerando que los proyectos forestales de carbono requieren una estructura organizacional que perdure por largos períodos y que estará desempeñando las siguientes funciones:

-
- Garantizar que toda la documentación relacionada con el proyecto esté disponible en tiempo y forma,
 - Garantizar su participación en las reuniones concernientes al desarrollo, verificación y monitoreo del proyecto,
 - Participar activamente en la organización y logística con los verificadores y personal de la Reserva.

Dentro de los criterios de elegibilidad, los Proyectos Forestales deben cumplir con dos pruebas para ser considerados adicionales:

1. Prueba de Requisitos Legales

En donde se compruebe que las actividades del proyecto no deberán ser un requisito de ley. El proyecto a la fecha no tiene ningún tipo de limitaciones legales para su desarrollo, por lo que se puede garantizar que generará remociones de GEI por encima de las que se logran con el solo cumplimiento de las leyes mexicanas. Así mismo, en México no existe alguna ley que obligue a los dueños forestales a realizar o implementar un proyecto de captura de carbono, por lo que cumple con los requisitos legales que requiere el PFM. El proyecto también se encuentra en cumplimiento de las leyes que regulan el manejo sustentable de los bosques:

- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS), publicada el 25 de febrero de 2003, y su última reforma el 26 de abril de 2021.

- Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, publicado el 21 de febrero de 2005 y su última reforma el 09 de diciembre de 2020.

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) Publicada el 28 de enero de 1988 y su última reforma el 18 de enero de 2021.

- Ley General de Vida Silvestre (LGVS), Publicada el 3 de julio de 2000 y su última reforma el 20 de mayo de 2021.

- Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre (LGVS) Publicada el 30 de noviembre de 2006 y su última reforma el 9 de mayo de 2014.

- Ley General de Cambio Climático, publicada el 6 de junio de 2012 y su última reforma el 06 de noviembre de 2020.

Así como en cumplimiento de las siguientes Normas Mexicanas:

- NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental, Especies nativas de México de flora y fauna silvestres, Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio, Lista de especies en riesgo. Publicada el 30 de diciembre de 2010 y su última Reforma el 14 de noviembre de 2019.

- NOM-060-SEMARNAT-1994. Establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal.

- NOM-061-SEMARNAT-1994. Establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en la flora y fauna silvestres por el aprovechamiento forestal.

- NOM-152-SEMARNAT-2006. Establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas.

2. Prueba de Estándar de Desempeño

Consiste en un análisis estandarizado según el tipo de actividad que determina si el riesgo de pérdida de la cubierta forestal en un Área de Actividad específica es suficiente para garantizar el reconocimiento de que las mejoras de carbono forestal, protegidas durante un período prolongado (permanencia de 100 años). Ambas pruebas son comprobables mediante el oficio de autorización al Programa de Manejo Forestal,

cuyo elemento de verificación serán las actividades que se realizan en la categoría de Manejo Forestal Mejorado, dado que la autorización emitida por SEMARNAT garantiza que las remociones producto del aprovechamiento forestal serán menores al crecimiento del bosque.

4.3.5 Registro de proyecto

Un Proyecto Forestal se considera “enlistado” cuando el Dueño Forestal ha abierto una cuenta con la Reserva, enviado el formato de Registro de Proyecto, la documentación que justifique la tenencia de la tierra y la aprobación del proyecto mediante asamblea general de ejidatarios y pagando la cuota de registro. Sirve para determinar si el proyecto cumple con los criterios de elegibilidad del PFM y para establecer la relación entre el Dueño Forestal y la Reserva de Acción Climática (CAR). El proyecto se considera “enlistado” y está disponible al público una vez que se acepta el Formato de Presentación del Proyecto, que es una plantilla en donde se proporciona una descripción general de las condiciones sociales, ambientales y de tenencia de la tierra del proyecto.

4.3.6 Línea base y salvaguardas

Línea base

El Protocolo Forestal para México (PFM) provee de herramientas tecnológicas para facilitar la cuantificación de GEI, esta se denomina CALCBOSK®, es una herramienta de manejo de datos para los usuarios del PFM. Está diseñada para complementar los requisitos de la metodología de cuantificación del protocolo y su uso es obligatorio. La información del inventario del proyecto se ingresa en los formularios de CALCBOSK® y se pueden generar reportes automáticamente para calcular los metros cúbicos del volumen y biomasa sobre el nivel del suelo. Calcula el volumen y/o biomasa (gramos) directamente de las variables ingresadas del inventario forestal (diámetro normal y altura) y convierte la biomasa sobre el nivel del suelo a toneladas de CO_{2e}. Los estimados de biomasa sobre el nivel del suelo se convierten a toneladas de CO_{2e} al dividir la biomasa (en gramos) entre 1000 y multiplicando el resultado por 0.5 (para convertir el

valor a carbono) y posteriormente multiplicando por 3.67 (para convertir el valor a CO_{2e}). El resultado se obtiene en toneladas de CO_{2e}, unidad de medida que agrupa al conjunto principal de GEI (CO₂, CH₄, N₂O, etc.). Las ecuaciones usadas por CALCBOSK® utiliza las ecuaciones alométricas diseñadas para cada especie presente en el área de actividad y en su defecto, en orden jerárquico las existentes para la misma especie, género o familia, en caso de no existir ninguna de las anteriores, utiliza la ecuación general proporcionada por el IPCC (CAR,2022).

Para todas las Áreas de Actividad que cumplen con los requisitos de adicionalidad, se estima la línea base y esta se define como la suma de carbono en los sumideros definidos a la fecha de inicio del proyecto. Para el caso particular del área de actividad en el ejido Atopixco, se estimó un total de 140,010.53 tCO_{2e}.

La línea de base del este Proyecto Forestal puede ser válida por 30 o 100 años como lo estipula el PFM, a esta característica se le identifica como “Periodo de Acreditación del Proyecto” y considera un tiempo mínimo de 100 años de compromiso para mantener el carbono secuestrado en el sumidero de carbono que representan los terrenos forestales del ejido.

Salvaguardas

Son las medidas que se llevan a cabo para minimizar o mitigar algunos impactos sociales o ambientales adversos que pudieran surgir con el proyecto y maximizar los impactos positivos. Las salvaguardas han sido mencionadas a partir de las discusiones de REDD+, donde existe la preocupación que los proyectos pudieran tener impactos como la apropiación de tierras, violaciones de los derechos humanos y la pérdida de biodiversidad. Se concentran en las siguientes categorías:

Salvaguardas ambientales

- Mantenimiento de los acervos de carbono

-
- Uso de especies nativas y composición del estrato arbóreo por especies nativas
 - Mantenimiento de la cobertura forestal en el área del proyecto
 - Prácticas de aprovechamiento sustentables
 - Mantenimiento de la cobertura de suelo natural
 - Minimizar disturbios al suelo durante la preparación del sitio para plantar árboles

Salvaguardas sociales

- Consentimiento previo, libre e informado, en donde se compruebe el análisis en asamblea sobre conceptos de un Proyecto Forestal de Carbono, costos anticipados, beneficios anticipados, venta de créditos y uso de los fondos, aprobación del proyecto, aprobación de agregado (en caso de incorporar más de un predio forestal al mismo proyecto) y aprobación del desarrollador de proyecto que llevará la responsiva técnica del mismo.
- Notificación, participación y documentación. Verificable mediante la notificación adecuada y participación de los integrantes de la comunidad y documentación de las reuniones.
- Gobernanza del proyecto, soportada mediante la identificación y designación de un coordinador de proyecto forestal, formalizando la duración del cargo y condiciones de consenso para su reemplazo.

El conjunto de salvaguardas mencionadas, garantizan la adicionalidad del proyecto en términos de incremento a la biomasa en el bosque cultivado (Figura 14), basándose en el entendido de que los bonos de carbono (CRT) que pudieran figurar en el mercado voluntario de carbono, serán únicamente aquellos que se contabilicen a partir de la estimación de la línea base.

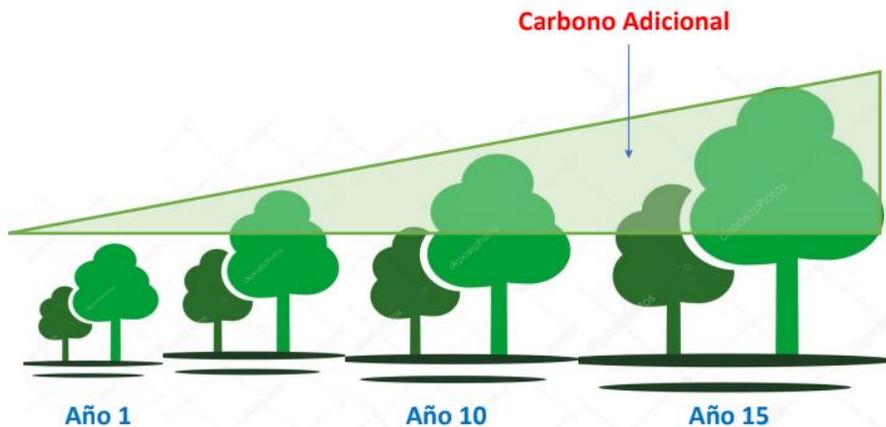


Figura 14. Esquema ilustrativo de adicionalidad de carbono en el bosque.

4.3.7 Verificación inicial

Se debe realizar por un tercero acreditado, los organismos verificadores aprobados por la Reserva, para verificar las remociones de GEI asociadas con las actividades para incrementar los acervos de carbono en proyectos forestales consideran requisitos generales de un enfoque estandarizado para lograr una verificación independiente y robusta de remociones de GEI. Deberán estar adheridos a la Organización Internacional para la Estandarización (*International Organization for Standardization-ISO*) y ajustarse a los instrumentos establecidos por la Reserva de Acción Climática (CAR):

1. Protocolo Forestal para México
2. Manual del Programa de Créditos de Compensación de la Reserva
3. Manual del Programa de Verificación de la Reserva
4. Software de la Reserva
5. ISO 14064-3:2006 Principios y Requisitos para la Verificación de Inventarios y Proyectos GEI

Únicamente aquellos organismos verificadores que son aprobados CAR son elegibles para verificar reportes de Proyectos Forestales en México. Deberán acreditarse bajo la ISO 14065 y acreditarse bajo la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) o el *American National Standards Institute (ANSI)*.

Los proyectos de carbono forestal deben de ser verificados por un tercero, existen diferentes tipos de verificación con diferentes requisitos de tiempo. Dependiendo de la actividad, se pueden o no realizar visitas en sitio. En las visitas en sitio, el verificador realiza un monitoreo detallado de las mediciones a través del muestreo secuencial indicado en el PFM. El verificador debe de entregar el reporte de verificación, la lista de hallazgos y la declaración de verificación

La verificación comprende:

- Reporte de Verificación. Entregado al dueño forestal (documento público).
- Lista de hallazgos - que contiene las cuestiones que encontró el verificador que deberán de revisarse
- Declaración de verificación. Detalla la fecha de emisión de los créditos y el número de remociones de GEI verificadas
- Llevar a cabo una reunión final con el dueño forestal para discutir el reporte de verificación, la lista de hallazgos y la declaración de verificación y determinar si hubiera inconsistencias encontradas que se pueden corregir.
- Si se logra obtener un nivel razonable de certeza, las copias electrónicas del reporte de verificación, lista de hallazgos, declaración de verificación y el registro de actividades se publican en la plataforma electrónica de CAR.

Para el caso particular del ejido Atopixco, se podrían someter a verificación para el periodo de reporte de un año 3,469 CRT (CALCBOSK®), mismas que podrían representar la misma cantidad de bonos de carbono con potencial de comercialización en el mercado voluntario de carbono.

4.3.8 Emisión de bonos

Previo a la emisión de los bonos de carbono (CRT) que podrán ser comercializados, se debe contar con la firma de un Acuerdo de Implementación de Proyecto (AIP), acuerdo contractual entre el dueño forestal y CAR, que establece las obligaciones del dueño

forestal para cumplir con los requisitos del protocolo, el dueño forestal puede definir el periodo de compromiso, los contratos en propiedad social están limitados por ley a un periodo de 30 años, no obstante, el acuerdo puede renovarse anualmente. Según el periodo de compromiso, se estipula el número de créditos que, para el caso del predio de propiedad ejidal, se limita al 30%, sin embargo, las actualizaciones al PFM en su versión 3.0 consideran un incremento significativo al contar con un contrato por 30 años, con un periodo de duración del proyecto por 100 años, lo que significa que mientras se mantenga el cabal cumplimiento a las salvaguardas comprometidas y su respectiva verificación, el incremento pudiera rebasar el 60% del total de CRT calculadas para el bosque ejidal.

Una vez cubierta la formalización del AIP, los CRT son depositados en la cuenta electrónica del dueño forestal y son liberados para su posible comercialización, traspaso o retiro del mercado. Cabe señalar que, durante el año 2022, el precio de mercado de los bonos carbono provenientes de proyectos en bosques mexicanos se mantuvo de manera general por encima de los \$10.00 USD. Y las principales organizaciones que adquirieron dichos bonos de carbono son de origen estadounidense.

A diferencia de los bonos de carbono generados en el marco de los mecanismos regulados, como el Protocolo de Kyoto o los sistemas de comercio de emisiones, el mercado voluntario no está sujeto a una regulación gubernamental específica que requiera la generación de informes estandarizados, por lo que no existe un reporte formal centralizado específico para los bonos de carbono del mercado voluntario provenientes de proyectos forestales comercializados en México. No obstante, las tendencias pueden consultarse contactando con bolsas de carbono como *CBL Markets* e *Intercontinental Exchange*, aunque dichas consultas pueden generar costos por el servicio.

En el mercado voluntario, la comercialización de bonos de carbono se basa en acuerdos y transacciones directas entre los titulares de proyectos y los compradores

interesados en compensar sus emisiones o por intermediarios comerciales que participan en dichas transacciones.

4.3.9 Monitoreo, Reporte y Verificación

Consiste en recopilar evidencias del cumplimiento de las salvaguardas sociales y ambientales del proyecto. Visitas de campo a cada uno de los proyectos. Seguimiento de la ejecución del Programa de Manejo Forestal, integrar y presentar informes anuales de dichas actividades. También abarca la atención de verificaciones de escritorio y verificaciones de campo por parte de la Reserva u organismos terceros de verificación para acreditar la certificación de los CRT y emisión continua de bonos de carbono. Visitas de seguimiento en el proyecto para supervisar el correcto cumplimiento de salvaguardas comprometidas.

El monitoreo, reporte y verificación (MRV) es un componente fundamental de cualquier protocolo forestal, y su objetivo es garantizar la precisión y la integridad de las mediciones de carbono y los informes generados por los proyectos forestales. A continuación, se detalla una descripción general de cada componente:

Monitoreo

Implica la recopilación sistemática de datos sobre las actividades del proyecto y la medición de variables clave relacionadas con la captura y el almacenamiento de carbono. Esto puede incluir la medición de la biomasa, la densidad forestal, las tasas de crecimiento de los árboles, entre otros parámetros relevantes. El monitoreo puede llevarse a cabo mediante técnicas de muestreo, mediciones *in situ* o mediante el uso de tecnologías como teledetección y sistemas de información geográfica. De acuerdo con el PFM de CAR, se debe actualizar el inventario cada 12 años y se debe verificar en sitio cada 6 años (CAR, 2022).

Reporte

El reporte involucra la compilación y presentación de información detallada sobre los datos recopilados durante el monitoreo y seguimiento. Los informes deben seguir las pautas y los formatos establecidos por el PFM. Los informes pueden incluir datos sobre las actividades del proyecto, los resultados del monitoreo, las emisiones evitadas, los bonos de carbono generados y otra información relevante.

Verificación

Es un proceso independiente llevado a cabo por terceros expertos para evaluar la precisión y la confiabilidad de los informes presentados por los proyectos forestales. Los verificadores revisan la documentación y los datos proporcionados por el proyecto, realizan visitas *in situ* y realizan análisis adicionales para verificar que el proyecto cumpla con los requisitos del protocolo forestal y que los resultados sean precisos y verídicos. Se requiere un proceso de verificación previo a la emisión de bonos de carbono para cada periodo de reporte, misma que con excepción de la verificación inicial y la verificación periódica de cada 6 años, puede realizarse de manera documental y mediante técnicas de teledetección (CAR, 2022).

4.4 Conclusiones

El mercado voluntario de carbono representa una importante oportunidad de incremento a la rentabilidad silvícola de las comunidades forestales, para el caso del ejido Atopixco, la oportunidad de diversificación productiva en terrenos forestales que ya generan beneficios económicos para sus poseedores por el aprovechamiento de productos forestales maderables, no obstante, el mercado de servicios ambientales, incluyendo la captura de carbono atmosférico, garantiza la permanencia de recursos forestales cuyo cultivo incrementa los acervos de carbono.

El Protocolo Forestal para México contiene argumentos sólidos que permiten a los dueños forestales mexicanos considerar unidades de negocio adicionales a la producción maderable, a través de la certificación de actividades de acción climática que figuran en el mercado voluntario de carbono y que permiten demostrar mediante procesos como el monitoreo, reporte y verificación la adicionalidad que representa el

manejo forestal sustentable, así como la comercialización de bonos de carbono ante organismos que deseen demostrar su compromiso de responsabilidad ambiental en materia de sostenibilidad y responsabilidad social corporativa, fortaleciendo su liderazgo al compensar parte de su impacto climático. Sin embargo, la compensación que representa el cultivo de bosques no es una solución sustituta para la reducción de emisiones y debe ser considerada como una medida complementaria a la reducción de emisiones y a la adopción de prácticas sostenibles en todos los ámbitos de la sociedad.

Si bien algunos son más sólidos que otros, todos los estándares analizados han adoptado soluciones similares a los desafíos asociados con la metodología, la implementación de proyectos de carbono forestal, así como la parte correspondiente al costo social de los desafíos socioeconómicos. Esta sigue siendo un área en la que se requiere mayor investigación, centrada principalmente en la inclusión de estándares voluntarios de compensación de carbono que aborden la rentabilidad de los proyectos forestales de carbono y su compatibilidad con las regulaciones locales, así como el desarrollo de protocolos que permitan certificar los sumideros de carbono en el suelo forestal, cuyas cantidades pueden ser significativamente mayores al carbono secuestrado en la biomasa aérea. En términos generales es crucial avanzar hacia proyectos y estándares de carbono que resulten en sumideros de carbono efectivos y de largo plazo, priorizando la justicia social, la equidad y la preservación de la biodiversidad.

4.5 Referencias

Climate Action Reserve. 2022. Protocolo Forestal para México Versión 3.0. Recuperado en: https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2022/10/Protocolo-Forestal-para-Mexico-V3.0_ESP-1.pdf

Estrada-Chavira, M. E. (2022). Evolución y controversias de los bonos de carbono en México. *Semestre Económico*, 11(1), 127-133. Recuperado en: <http://semestreeconomico.unap.edu.pe/index.php/revista/article/view/60/237>

-
- González, Pedro, & Achinelli, Marcela. (2017). Mercado Voluntario de Carbono y su impacto socioeconómico en la Colonia La Amistad, Departamento de Itapúa, Paraguay. Periodo: 2010 - 2015. *Población y Desarrollo*. 23(44), 45-51. doi: 10.18004/pdfce/2076-054x/2017.023(44)045-051
- Pan, C., Shrestha, A., Innes, J. L., Zhou, G., Li, N., Li, J., & Wang, G. (2022). Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects. *Journal of Forestry Research*. 33(4), 1109-1122. doi: 10.1007/s11676-022-01488-z
- Ranero, Alejandro, & Covalada, Sara. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401913. doi: 10.21829/myb.2018.2401913
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J., & Manzur-Chávez, N. (2022). Carbon storage during the development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3). doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009
- Rontard, B., Hernández, H. R., & Robledo, M. A. (2020). Pagos por captura de carbono en el mercado voluntario en México: diversidad y complejidad de su aplicación en Chiapas y Oaxaca. *Sociedad y Ambiente*, (22), 212-236.