

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

AGENDA AMBIENTAL

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

## **MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA  
MEXICANA (NMX-AA-173-SCFI-2015) PARA EL REGISTRO DE  
PROYECTOS FORESTALES DE CARBONO COMO INSTRUMENTO  
DE RESTAURACIÓN FORESTAL A LARGO PLAZO EN LA REGIÓN  
PRIORITARIA PARA LA CONSERVACIÓN XILITLA, SAN LUIS  
POTOSÍ.**

PRESENTA:

**CAROLINA ORTA SALAZAR**

**DIRECTOR DE TESIS:**

DR. HUMBERTO REYES HERNÁNDEZ

**ASESORES:**

DR. CARLOS ALBERTO AGUIRRE SALADO

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

**06 DE NOVIEMBRE DEL 2018**

# **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

## **PROYECTO REALIZADO EN:**

Región Prioritaria para la conservación Xilitla, San Luis Potosí.

## **CON FINANCIAMIENTO DE:**

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas CONANP

## **A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:**

Fortalecimiento de las acciones de restauración del bosque de niebla en la RPC Xilitla (PROCER/CCER/DRNEySMO/XILITLA/12/ 2016).

## **AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA- TESIS**

**Becario No. 774086/609306**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO  
ATRAVÉS DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE  
CALIDAD (PNPC)**

## Agradecimientos

A mis papás, Juan Manuel Orta y María de la Luz Salazar por su invaluable apoyo en mi vida, muy agradecida estoy con Dios por haberme brindado estos dos fuertes ángeles guardianes.

A mi hermano Juan Manuel por ser una fuente de inspiración en mi vida y por su generosidad al compartir los éxitos de su vida con los que le rodeamos.

A Iván, porque con su apoyo incondicional facilitó todo este proceso de vida.

A mis hijas Tamara y Evelyn porque me inspiran a ser y dar lo mejor de mí, agradezco su paciencia y amor, sentirlo es lo más hermoso y gratificante de mis días. Las amo.

A todos mis amigos y excompañeros de la CONAFOR Manuel, Ilich, Flor, Norma, Toño, Benny, Cristi, Chemo, Cesar, Cinthya, Mónica, Joaquin, Jairo, Rodo, Rulas y exjefes de trabajo como el Ing. Castelo, Ing. Leonel, Sofía Cortina, porque cada uno de ellos aportó lo necesario para que en mi se reforzará la pasión y amor que tengo por los bosques y selvas de México.

A mi director y asesores de tesis, que me brindaron su tiempo, consejos, conocimientos. Los felicito por su apasionada vocación y compromiso con la enseñanza.

A mis amigas que contribuyeron con su buena vibra cuando más necesitaba esos momentos de des-estrés.

**A Dios por su infinita generosidad y amor al permitirme ejecutar los planes que se gestan en lo profundo de mi corazón.**

## Contenido

	<b>Página</b>
Índice de Figuras.....	v
Índice de Cuadros.....	vii
Resumen general.....	viii
Abstract.....	ix
<b>Capítulo 1. Introducción general: Los proyectos forestales de captura de carbono y su aporte al mercado de carbono</b>	
Resumen.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Antecedentes.....	4
1.3.1. Los mercados de carbono.....	6
1.3.2. Proyectos forestales de carbono.....	10
1.3.3. Restauración forestal.....	14
1.4. Literatura citada.....	18
<b>Capítulo 2. Estimación de potencial de captura de carbono en áreas no forestales mediante imágenes Landsat</b>	
Resumen.....	22
2.1. Introducción.....	23
2.2. Materiales y métodos.....	26
2.2.1. Área de estudio.....	26
2.2.2. Materiales.....	26

2.2.3.	Metodología.....	26
2.2.3.1.	Determinación de las zonas potenciales para captura de carbono .....	26
2.2.3.2.	Determinación del potencial de captura de carbono.....	33
2.3.	Resultados.....	38
2.3.1.	Áreas potenciales para captura de carbono.....	38
2.3.2.	Potencial de captura de carbono en las áreas de interés.....	40
2.4.	Discusión.....	44
2.5.	Conclusiones.....	49
2.6.	Literatura citada.....	50
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Implementación de la Norma Mexicana del Carbono en la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla</b>	
	Resumen.....	59
3.1.	Introducción.....	60
3.2.	Materiales y métodos.....	62
3.2.1.	Área de estudio.....	62
3.2.1.1.	Selección de sitio.....	64
3.2.2.	Talleres participativos.....	64
3.2.2.1.	Proyección económica del proyecto.....	65
3.2.3.	Encuestas semi-estructuradas.....	66
3.3.	Resultados .....	67
3.3.1.	Taller participativo.....	67
3.3.2.	Obtención del Consentimiento pleno, libre e informado (CPLI) Entrevistas semi-estructuradas.....	70
3.4.	Discusión.....	72
3.5.	Conclusiones.....	75

3.6.	Literatura citada.....	77
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Conclusiones finales.....</b>	<b>80</b>

## Índice de Figuras

<b>Capítulo 1.</b>		<b>Página</b>
Figura 1.1.	Participación de los sectores en las emisiones de GEI en el 2015 (INECC 2018).....	5
Figura 1.2.	Iniciativas emergentes del mercado del carbono (SCE e impuestos) con potencial regional, nacional o subnacional (World Bank y Ecofys, 2016).....	8
Figura 1.3.	Volúmenes históricos de transacción de bonos de carbono en el mercado voluntario (Hamrick K. y Gallant M., 2017).....	9
<b>Capítulo 2.</b>		
Figura 2.1.	Ubicación de la Región prioritaria para la conservación Xilitla RPCX, en el estado de San Luis Potosí, México.....	27
Figura 2.2.	a.c. Escenas descargadas del USGS sin procesamiento. b.d. Imágenes ajustadas al área de estudio, pre-procesadas con correcciones absolutas y comparables en falso color.....	29
Figura 2.3.	a. Selección y definición de campos de entrenamiento. b. Definición y descripción de las firmas espectrales por categoría para cada banda...	30
Figura 2.4.	a. b. Clasificación de imágenes por el algoritmo kNN de acuerdo a las 8 firmas espectrales obtenidas.....	31
Figura 2.5.	a.b. Reclasificación a las dos categorías de interés, áreas en rojo, consideradas como No bosque (firmas espectrales No forestales). c. Producto final, áreas sin cobertura forestal coincidente en los dos años.	32
Figura 2.6.	Muestreo aleatorio de 100 puntos al azar para validación. a.b.c.d. Casos de análisis: valor 1 (resultado de la clasificación kNN) – valor 2 (resultado del análisis visual en Google Earth).....	33
Figura 2.7.	a. Mapa de vegetación y uso de suelo, del IEFyS para San Luis Potosí, 2014, de la RPCX. b. Mapa de densidad de carbono aéreo forestal de Cartus et al. 2014 para la RPCX (Áreas azules > densidad, áreas rojas <densidad).....	34
Figura 2.8.	a. Unión de información de densidad de carbono aéreo forestal por pixel (30x30 m) con el de vegetación y uso de suelo (VyUS), para obtención de valores estadísticos por polígono de cada tipo de VyUS. b. Calculo de centroides para cada polígono forestal.....	34
Figura 2.9.	Calculo de centroides para cada polígono de uso de suelo forestal.....	35

Figura 2.10.	a. Área de influencia (Polígonos de Thiessen) elaborados a partir del centroide de cada polígono con vegetación forestal en el área. b. Áreas potenciales para captura de carbono dentro los polígonos de Thiessen.	36
Figura 2.11.	Valores máximos y promedio por área de influencia (polígonos Thiessen) para cálculo de potencial de captura de carbono para cada área de interés.....	36
Figura 2.12.	Procedimiento metodológico para la definición de áreas elegibles para captura de carbono.....	38
Figura 2.13.	Superficies con áreas no forestales en los últimos 5 años de acuerdo con el tipo de tenencia.....	39
Figura 2.14.	Áreas potenciales dentro del RPCX de acuerdo a la información de tenencia de la tierra (comunidades=azul, rojo= ejidos, morado= propiedad privada) del Registro Agrario Nacional.....	39
Figura 2.15.	Procedimiento metodológico para la definición del potencial teórico de captura de carbono.....	41
Figura 2.16.	Potencial de incremento en la densidad de carbono aéreo (AGDC) por tipo de tenencia.....	42

### **Capítulo 3.**

Figura 3.1.	Ejidos con superficies considerables de áreas elegibles para la implementación de la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015 en la RPCX.....	63
Figura 3.2.	Proceso de implementación de la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015.....	67
Figura 3.3.	Imagen satelital utilizada durante el ejercicio de cartografía participativa	69
Figura 3.4.	Determinación de posibles beneficiarios, identificación individual por parcela y superficie con SIG.....	69
Figura 3.5.	Porcentaje de opinión sobre temas para el mejoramiento del primer taller participativo.....	70
Figura 3.6.	Porcentaje de opinión de los motivos de rechazo al proyecto forestal de carbono .....	71

## Índice de Cuadros

	<b>Capítulo 1</b>	<b>Página</b>
Cuadro 1.1.	Proyectos forestales actuales en México en el mercado de carbono (Forest Trends, Proteak, 2018).....	15
<b>Capítulo 2</b>		
Cuadro 2.1.	Formulas aplicadas para la corrección absoluta de las imágenes Landsat.....	28
Cuadro 2.2.	Asignación de valores categóricos a las firmas espectrales obtenidas...	30
Cuadro 2.3.	Matriz de confusión para la validación de la clasificación realizada.....	33
Cuadro 2.4.	Tipo de tenencia y legalidad de la superficie analizada en condiciones no forestales dentro de la RPCX.....	40
Cuadro 2.5.	Potencial de captura de carbono en la RPCX de este estudio.....	42
Cuadro 2.6.	Potencial de incremento de densidad de carbono aéreo (MgC) de acuerdo con criterios de tenencia y legalidad.....	42
Cuadro 2.7.	Calculo potencial de captura de carbono y CO <sub>2</sub> para los ejidos que cumplen los criterios de elegibilidad y factibilidad.....	43
<b>Capítulo 3</b>		
Cuadro 3.1.	Criterios aplicados para la selección del ejido .....	64
Cuadro 3.2.	Proyección de ingresos económicos del proyecto.....	68

## Resumen

México está interesado en promover la puesta en marcha de proyectos forestales de captura de carbono y la norma NMX-AA-173-SCFI-2015 instrumenta el procedimiento para llevarlos a cabo. Este trabajo presenta un planteamiento metodológico para la implementación de la norma, a través de la determinación de áreas elegibles para la captura de carbono, así como la estimación del potencial teórico de captura considerando la densidad de la vegetación forestal natural circundante. Para ello, se combina información satelital y datos auxiliares mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica para determinar el potencial de captura en los predios elegibles dentro de la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla donde se identificaron 2,136 ha de superficie no forestal en los últimos 5 años. Los resultados obtenidos indican que de los 55 predios incluyendo ejidos, comunidades y pequeños propietarios que se encuentran dentro de la RPCX, solo cinco ejidos resultan viables para la implementación de proyectos de captura de carbono. El ejido Ollita del Pino es uno de ellos, el cual tiene en conjunto una superficie elegible de 83 ha con una estimación de potencial de captura de carbono de 10,061 TCO<sub>2</sub> a largo plazo ( $\geq 20$  años), allí se comenzó el ejercicio de implementación de la Norma mexicana del carbono NMX-AA-173-SCFI-2015, donde se realizó un taller participativo que planteó la finalidad del proyecto forestal de carbono con fines de restauración forestal y con un cálculo de beneficios económicos estimados de \$1,171 ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>. Posterior a este taller se realizaron encuestas para comprobar el consentimiento pleno, libre e informado (CPLI) de los ejidatarios para participar en el proyecto, tal como lo señalan las salvaguardas establecidas por la norma. Sin embargo la propuesta no despertó el interés en los ejidatarios, la causa principal de rechazo fue la incertidumbre de convertir el actual uso de suelo de sus parcelas a áreas nuevamente forestales y sacrificar la actual seguridad alimentaria que gozan. Otros factores fueron la falta de organismos gubernamentales y no gubernamentales que apoyaran la iniciativa, la falta de recursos económicos e inversores que brindaran certeza sobre el capital semilla requerido; así como la escasa información y difusión que aún tienen este tipo de proyectos de captura de carbono y su mercado.

**Palabras clave:** *Landsat; áreas no forestales; Thiessen; densidad forestal; proyecto de carbono.*

## Abstract

Mexico is interested in promoting the implementation of carbon capture forestry projects, and the Mexican Carbon Standard NMX-AA-173-SCFI-2015 provides the principles and criteria for carrying them out. This paper presents a methodological approach to fulfill NMX-AA-173-SCFI-2015 by determining eligible areas for carbon capture, as well as an estimate of the carbon capture potential by considering the carbon density of the surrounding natural forest vegetation. Using Geographic Information Systems (GIS), satellite information and auxiliary data were combined to determine the potential capture in the eligible areas inside the Priority Region for Conservation in Xilitla (RPCX), where have been identified a surface of 2,136 ha with a permanent non forest condition in at least the past five years. The results indicate this area is divided in 55 properties, including ejidos, indigenous communities, and small holders that are within the RPCX, of which only five ejidos are viable for carbon capture projects. The Ollita del Pino ejido is one of them and has a total eligible surface area of 83 ha with an estimated carbon capture potential of 10,061 TCO<sub>2</sub> over the long term ( $\geq 20$  years). The possibility of entering a restoration project under the Mexican Carbon Standard NMX-AA-173.SCFI-2015 was explored there, in which a participatory workshop was held that calculated a carbon forestry restoration project would reap an estimated \$1,171/ha<sup>1</sup>y<sup>-1</sup>. After the workshop, surveys were carried out to verify the full, free and informed consent (CPLI) of the *ejidatarios* to participate in the project, as indicated by the safeguards established by the norm. However, the proposal did not arouse the interest of the *ejidatarios*, the main cause of rejection was the uncertainty of converting their farm land to forest, and if would be worth sacrificing the food security enjoyed. Other obstacles were the lack of support from governmental and non-governmental organizations, the lack of economic resources and investors for the seed capital required, and the poor dissemination of information about such carbon capture projects and their market potential.

**Keywords:** *Landsat; non-forested areas; Thiessen; forest density; carbon project.*

## **Capítulo 1. Los proyectos forestales de captura de carbono y su aporte al mercado de carbono.**

### **Resumen:**

El cambio climático producido principalmente por las emisiones de GEI es una realidad. La mayoría de los gobiernos del mundo han intentado frenarlo a través de acuerdos internacionales vinculantes que fomenten la mitigación de emisiones y el incremento de los acervos de carbono. Sin embargo, estos acuerdos internacionales no han prosperado lo suficiente debido a la falta de sinergias provocada por la diversidad de condiciones socioeconómicas y ambientales de cada país, orillado al surgimiento de nuevos mecanismos regionales o nacionales para hacer frente a este problema. En el último Acuerdo de París, México se comprometió internacionalmente a reducir en un 22 % sus emisiones de GEI y 51 % de carbono negro para 2030. En consecuencia, se han propuesto estrategias como el Sistema de Comercio de Emisiones, enmarcada en la Ley General de Cambio Climático, el cual pretende comercializar bonos de carbono de los diferentes sectores productivos. En este sentido el sector de Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura es uno de los más prometedores para contribuir a lograr este objetivo, ya que actualmente es un sumidero de carbono que estabiliza a los demás sectores emisores. De ahí la importancia de fomentar los proyectos forestales de carbono (PFC) como una actividad que no solo incrementara los reservorios de carbono de manera certera sino además se vincula a cobeneficios sociales, económicos y de biodiversidad. Actualmente en México solo existen 9 proyectos enfocados al incremento de los acervos de carbono, todos bajo estándares internacionales. Las dificultades para la implementación de Proyectos Forestales de Carbono bajo estos estándares teóricamente deberían minimizarse, una vez acotadas a un contexto nacional con marcos jurídicos y estándares propios como la NMX AA-173-SCFI-2015, y apoyados por un sistema de comercio interno e incentivos fiscales. El resultado dependerá de las estrategias y herramientas que el gobierno y los demás actores involucrados estén dispuestos a realizar para facilitar esta implementación y posicionar a los PFC como una actividad rentable.

**Palabras clave:** Mercados voluntarios de carbono, Proyectos forestales de carbono, sistema de comercio de emisiones, Incremento en los acervos de carbono.

## 1.1. Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub> y NF<sub>3</sub>)<sup>1</sup>, han aumentado considerablemente desde la revolución industrial debido a actividades humanas y la quema de combustibles fósiles. Los GEI son gases que absorben y emiten radiación de onda larga que influyen en la temperatura de la Tierra. Actualmente estos siete gases de efecto invernadero se encuentran bajo regulación del Protocolo de Kioto<sup>2</sup> (IPCC, 2007).

La idea de un mercado de carbono tiene sus orígenes en el Protocolo de Kyoto (PK) firmado en 1997 que operó de 2005 a 2012. Actualmente se negocia un segundo periodo de compromiso de 2013 a 2020 a través de un acuerdo vinculante conocido como la Enmienda de Doha, aunque no ha logrado implementarse debido a que no ha alcanzado el mínimo de países dispuestos a ratificar los compromisos de mitigación propuestos (UNFCCC, 2018). No obstante, han surgido otros esquemas de certificación en el mercado de carbono (Balderas *et al.*, 2016). Actualmente existen dos tipos de mercados de carbono, el primero regulado utilizado por empresas y gobiernos que, por ley, tienen que rendir cuentas de sus emisiones de GEI y que opera bajo regímenes obligatorios de reducción de carbono, ya sean nacionales, regionales o internacionales, y el segundo, un mercado voluntario, cuyo comercio de créditos se produce sobre una base facultativa (Seeberg Elverfeldt, 2010).

En los últimos años México ha implementado algunas estrategias de fomento al mercado voluntario de carbono. Entre ellas se encuentra la expedición de la Norma Mexicana NMX-AA-173-SCFI-2015 para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono; vigente desde 2015, establece una serie de principios y criterios necesarios para el desarrollo de proyectos forestales de carbono y la obtención del registro de sus certificados y los créditos que de ellos deriven.

El objetivo de la norma es fomentar el desarrollo de mercados vinculados a las acciones de cambio climático y facilitar el acceso de las comunidades y propietarios de predios a los mercados de carbono. Asimismo, pretende identificar oportunidades para reducir los costos

---

1 Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, Metano CH<sub>4</sub>, Óxido nitroso N<sub>2</sub>O, Hidrofluorocarbonos HFC, Perfluorocarbonos PFC Hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>, Trifluoruro de nitrógeno NF<sub>3</sub>.

2 El Protocolo de Kyoto establece objetivos jurídicamente vinculantes para los países industrializados que estén dispuestos a tomar medidas positivas para reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros GEI de las fuentes situadas en sus territorios (UNFCCC, 2006).

para el desarrollo y verificación de los proyectos, que actualmente es una de las mayores limitantes para la participación en estos mercados (DOF, 2015).

A tres años de su publicación, no se han registrado proyectos avalados bajo esta normativa, una hipótesis podría ser la falta de una metodología de aplicación exclusiva para la norma. De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), dependencia encargada de su implementación, las metodologías para la elaboración de proyectos forestales de carbono son herramientas tecnológicas, que deben ser desarrolladas en el ámbito de las instituciones de investigación.

De acuerdo con la norma, una metodología aprobada es una herramienta para determinación de línea base, adicionalidad, cuantificación, monitoreo del incremento en el acervo de carbono y determinación de riesgo de la no-permanencia, entre otras características, que debería ser aprobada por CONAFOR, con el apoyo del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y del Consejo Técnico Consultivo designado para dicho propósito (DOF, 2015).

Por otro lado, se encuentran los retos sociales y económicos a los que se enfrenta su aplicación, razón por la cual es necesario evaluar la factibilidad social, técnica e institucional para la implementación de esta norma, además de identificar las fortalezas y debilidades que obstaculizan su aplicación en el contexto actual.

Para la estructura de la tesis en este primer capítulo se aborda el problema y los objetivos de investigación, así como una revisión exhaustiva de la literatura encontrada sobre la situación actual de los proyectos forestales de carbono y el surgimiento del mercado voluntario de carbono en el contexto nacional. El segundo capítulo desarrolla la propuesta metodológica para poder realizar la implementación costo eficiente de la norma mexicana a escala local así como los resultados obtenidos para lograr los objetivos específicos de identificación de áreas elegibles y cálculo del potencial de captura de carbono. En el tercer capítulo se describen los métodos utilizados para realizar la implementación de la Norma a escala local a través de estrategias de participación comunitaria y los resultados obtenidos del proceso. Por último, en el cuarto capítulo se encuentran las conclusiones generales del estudio y sus recomendaciones.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar el proceso de implementación de Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015), su factibilidad y alcance en el contexto actual en San Luis Potosí.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar una metodología costo-eficiente que permita Identificar áreas específicas con potencial de captura de carbono para implementar la restauración forestal, que cumpla con los criterios establecidos en la NMX en la Región prioritaria para la conservación Xilitla en San Luis Potosí.
- Definir el potencial teórico de captura de carbono en dichas áreas con posibilidades de emitir créditos de carbono forestal certificados (tCO<sub>2</sub>e/ha) en el largo plazo.
- Analizar el proceso de implementación de la NMX en la RPC Xilitla para generar guías de acción que faciliten el desarrollo del PFC.

## **1.3. Antecedentes**

En la XXI Conferencia Internacional sobre Cambio Climático COP21 celebrada en París en el 2015, 196 países se comprometieron a limitar las emisiones gases invernadero y mantener el aumento de la temperatura media mundial debajo de 2°C, bajo el llamado Acuerdo de París. En este contexto, México asumió compromisos clave en materia del cambio climático comprometiéndose a reducir en un 22% de sus emisiones de GEI (210 MtCO<sub>2</sub>e) y 51% de carbono negro para 2030 (Altamirano *et al.*, 2016). Para lograrlo, el país buscará que la tendencia actual de los incrementos de las emisiones anuales se modifique paulatinamente hasta alcanzar un máximo alrededor del año 2026, cuando las emisiones anuales netas comiencen a reducirse para alcanzar la meta establecida en el año 2030 (INECC y SEMARNAT, 2015).



de carbono, así como la promoción de mejores prácticas para aumentar la captura de carbono, (SEMARNAT, 2013).

Una estrategia de fomento al mercado voluntario de carbono fue la creación de un impuesto a las emisiones de carbono promulgado junto con la Reforma Fiscal del 2014, dicho impuesto cobra una cantidad por la emisión de dióxido de carbono equivalente de diferentes combustibles fósiles, como el petróleo, carbón, gas natural y gas licuado de petróleo. Desde su implementación, el impuesto generó al 2016 casi US \$ 1,000 millones en ingresos. Se espera que el impuesto al carbono en combinación con otras iniciativas climáticas y políticas existentes, permitan el surgimiento de un mercado nacional de carbono para este 2018 (World Bank y Ecofys, 2016).

En principio los contribuyentes podrán comprar certificados de reducción de emisiones para acreditar el pago de dicho impuesto, ya que dicha Reforma incluye una cláusula donde señala que los proyectos de carbono basadas en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), podrán ser utilizados para demostrar el pago del impuesto al carbono (Covaleda *et al.*, 2016). Esta medida busca generar una demanda nacional para el desarrollo de proyectos de mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono.

Otro avance importante fue la creación en el 2014 de la plataforma MEXICO2, una empresa subsidiaria de la Bolsa Mexicana de Valores, que promueve el mercado voluntario de carbono y facilita el intercambio (compraventa) de bonos de carbono de proyectos de mitigación nacionales no solo del sector forestal, sino además de manejo de residuos, energías renovables y eficiencia energética (Balderas *et al.*, 2016; MEXICO2, 2018).

### **1.3.1. Los mercados de carbono.**

México no se encuentra obligado a un mercado regulado de cumplimiento como los países desarrollados, por lo que el mercado voluntario tiene una mayor repercusión en el país, motivado no solo por el potencial de reducción de emisiones de GEI, sino que obedece a otro tipo de beneficios, como acreditar responsabilidad social, ambiental, imagen pública o como preparación a nuevas regulaciones u objetivos internos de mitigación al cambio climático (Balderas *et al.*, 2015; Hamrick y Gallant, 2017).

En el mercado de carbono, el objeto de transacción se denomina de manera genérica Bonos de carbono o técnicamente Certificados de Reducciones de Emisiones CRE<sup>3</sup> (Aquilino, 2011). En el sector forestal los CRE se pueden clasificar de dos tipos de acuerdo con su vigencia, los CRE generados por proyectos y se expiden por un periodo de compromiso (cada cinco años), conocidos como certificados de reducción de emisiones temporales o tCREs. Cuando se acreditan por periodos de 20 años (con oportunidad de renovarse por otros 20 años más) o 30 años (sin oportunidad de renovarse), se denominan certificados de reducción de emisiones de largo plazo o ICREs (Pearson *et al.*, 2006). Ambos certificados son calculados y validados de acuerdo con la información contenida y generada en su proyecto forestal de carbono.

Para que el mercado de carbono sea atractivo, los incentivos para los desarrolladores de proyectos deben al menos igualar los costos de participación e implementación en dichas actividades. Uno de los problemas con los proyectos forestales de carbono elaborados con el mecanismo regulado MDL, cuyo segundo periodo de cumplimiento termina en el 2020, es que la demanda internacional de los créditos generados con este mecanismo está casi agotada. La Unión Europea (UE), la mayor fuente de demanda, ya cumplió con su meta de créditos internacionales. Debido a estas condiciones, la mitad de los proyectos que habían emitido CRE a finales de 2012 cesaron su emisión. Incluso durante la COP 21 se alentó a los países participantes a promover la cancelación voluntaria de sus créditos de carbono sobrantes (World Bank y Ecofys, 2016).

La incertidumbre sobre el destino del MDL en los próximos años hace inviable el esfuerzo de proponer y registrar proyectos para este mercado. Aun así, las metodologías diseñadas para aplicarse en este mercado siguen siendo reconocidas por su solidez y robustez de manera amplia entre los países participantes.

A nivel internacional, a partir del 2016, 190 países ratificaron la Convención Marco de las Naciones Unidas contra el Cambio Climático (CMNUCC), de ellos 162 presentaron sus propuestas de reducción de emisiones, conocidas como Contribución Prevista y Determinada a nivel Nacional (INDC, por sus siglas en ingles). Además 90 países incluyeron propuestas de Sistema de Comercio de Emisiones (SCE), impuestos sobre el carbono y otras iniciativas de fijación de precios de carbono. México ejecuta un impuesto al carbono y está considerando operar un SCE voluntario (Figura 1.2), actualmente lleva a cabo una

---

3 Certificado de Reducción de Emisión CRE = Una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente.

simulación de mercado de carbono y un piloto obligatorio de SCE programado para finales de 2018.

En Colombia, Chile y México bajo el marco de la Alianza del Pacífico y la Cooperación Regional sobre Fijación de Precios al Carbono en las Américas (CPA, por sus siglas en inglés), trabajan para intercambiar conocimientos técnicos y explorar elementos consistentes de diseño de mercado, tales como sistemas de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), considerados fundamentales para cualquier futura vinculación (ICAP, 2018).

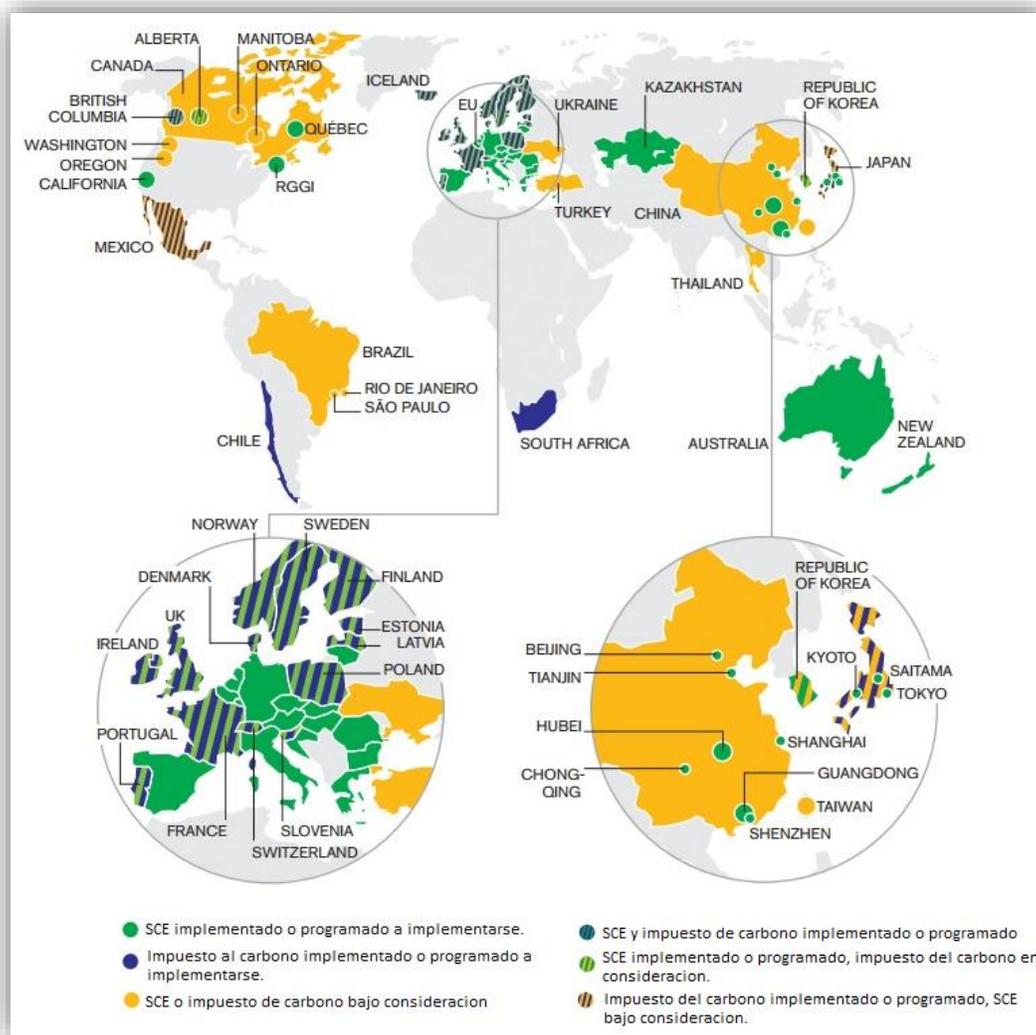


Figura 1.2. Iniciativas emergentes del mercado de carbono (Sistema de Comercio de Emisiones e impuestos) con potencial regional, nacional o subnacional (World Bank y Ecofys, 2016).

Otros países con SCE consolidados son Costa Rica, Japón, Australia, Nueva Zelanda (World Bank y Ecofys, 2016; Allie, 2015). En Costa Rica, el Programa de Carbono, propuso la norma INTE 12-01-06-2011 «Sistema de gestión para demostrar la C-Neutralidad», que establece aspectos para que una organización pueda llegar a considerarse carbono neutral. El Mercado Doméstico Voluntario de Carbono de Costa Rica (MDVCCR) es un mecanismo voluntario que coadyuvará a alcanzar el objetivo de carbono neutral del país para el año 2021, y se comercializan como Unidades de Compensación Costarricense (UCC). El mayor incentivo para los interesados en compensar sus emisiones de GEI es la posibilidad de acceder a un mercado que provea créditos de calidad a precios competitivos, que adicionalmente tienen un impacto positivo real en su sociedad (Salgado *et al.*, 2013).

Desde su inicio, el volumen total de las compensaciones negociadas en los mercados voluntarios de carbono ha variado año con año. De acuerdo a reportes del *Forest Trends Ecosystem Marketplace* se estima que el cambio porcentual anual en promedio del volumen de mercado fue del 50% entre 2005 y 2016 (Hamrick y Gallant, 2017) indicando que en 2005 se comercializaron 12.5 MtCO<sub>2</sub>e y alcanzando su pico en el 2008 con 134.5 MtCO<sub>2</sub>e. Entre 2008 y 2010, el mercado experimentó un incremento en las ventas compensatorias, cuyo volumen se mantuvo por encima de 100 MtCO<sub>2</sub>e por año hasta 2012. A partir 2013 el mercado oscila entre 60 y 85 MtCO<sub>2</sub>e por año (Hamrick y Gallant, 2017).



Figura 1.3. Volúmenes históricos de transacción de bonos de carbono en el mercado voluntario (Hamrick K. y Gallant M., 2017).

El volumen del *Chicago Climate Exchange* (CCX) representa las transacciones de proyectos con sede en los Estados Unidos realizadas por compradores estadounidenses

que se anticiparon a la regulación. Se considera volumen "Preacuerdo" debido a que en ese momento, los compradores actuaban de forma voluntaria anticipándose a la limitación e intercambio en los Estados Unidos (Figura 1.3). Aunque en 2009 en la legislación no fueron aprobadas las toneladas generadas por el CCX, continuaron comercializándose de forma voluntaria "fuera de bolsa" (Hamrick K. y Gallant M., 2017).

En términos económicos, el mercado voluntario también ha decrecido en los últimos años, lo que podría atribuirse al periodo de transición en las negociaciones internacionales y la baja en los precios de la tonelada de CO<sub>2</sub>e en el nivel internacional. El último informe del estado de los mercados voluntarios de carbono 2017, situó el precio promedio de tonelada de CO<sub>2</sub>e en \$3.0 USD. Aunque se reconoce que existe una gran variabilidad en el precio, que va de \$0.5 hasta \$50 USD/tCO<sub>2</sub>e, en dependencia de las características y cobeneficios del estándar bajo el que se emiten los CRE. El sector que presenta un mayor incremento en la comercialización de sus bonos es el Forestal y de Uso de suelo, su valor promedio es de \$5.1 USD/tCO<sub>2</sub>e; en 2016 este tipo de proyectos comercializó el 46 % del valor total de los mercados voluntarios de carbono (Hamrick y Gallant, 2017).

Se considera que los mercados voluntarios de carbono están en momento de aceptación elevado entre una sociedad cada vez más consiente del cambio climático. La mayoría de los habitantes urbanos estarían dispuestos a participar en un mercado voluntario de carbono que reflejara cobeneficios cercanos a su ciudad. Entre más cercano el proyecto de carbono a su residencia, mayor el valor que adquieren los proyectos locales (Balderas *et al.*, 2015).

### **1.3.2. Proyectos forestales de carbono**

Los proyectos forestales de carbono (PFC) se dividen en dos categorías de acuerdo con los objetivos que pretendan alcanzar con respecto a su manera de disminuir los GEI en la atmosfera y son:

- 1) Reducción de emisiones por evitar deforestación y degradación (REDD+) o conservación del sumidero de carbono
- 2) Incremento en la captura de carbono atmosférico o aumento del tamaño de los sumideros de carbono (objetivo de la Norma).

Todo proyecto forestal de carbono tiene el propósito de asegurar que las compensaciones generadas sean reales, adicionales y permanentes. Los requerimientos básicos para su diseño son:

- *Línea Base o escenario de referencia:* Escenario hipotético en el que se describe lo que podría ocurrir con el acervo de carbono en el área del proyecto en un escenario sin el proyecto forestal de carbono (DOF, 2015).
- *Adicionalidad:* Indicador de la remoción neta de GEI que no hubiese ocurrido sin el financiamiento de un proyecto de mitigación (Paz *et al.*, 2012).
- *Permanencia:* Requerimiento de que los GEI absorbidos por las actividades de los PFC deben ser removidos de la atmósfera al menos durante todo el periodo de acreditación para ser registrados como créditos de carbono (DOF, 2015). Es importante considerar que en este tipo de proyectos siempre existe el riesgo de que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) removido de la atmósfera sea nuevamente liberado a causa de incendios, plagas, sobreexplotación de madera, etc. (Paz *et al.*, 2012).
- *Fugas:* Variaciones netas de las emisiones antropogénicas por fuentes de GEI que se producen fuera de los límites del PFC, pero que son atribuibles al proyecto (DOF, 2015), por ejemplo en el caso de una reforestación en áreas que anteriormente eran de uso pecuario, el traslado del ganado a otro sitio se considera una fuga, ya que ese CO<sub>2</sub> que se emitía en ese potrero, dejara de hacerlo en ese sitio pues será destinado a la reforestación y captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, sin embargo el ganado seguirá emitiendo metano y CO<sub>2</sub> en el sitio de destino.
- *Validación:* Proceso que permite evaluar el cumplimiento del PFC con base en las especificaciones de la norma o alguna metodología suficientemente robusta para que el proyecto sea validado y pueda ser incluido en el Registro de proyectos (DOF, 2015).
- *Monitoreo:* Registro periódico de la reducción real de las emisiones alcanzadas con la implementación del proyecto, a través de la estimación directa/indirecta de

cambios en el contenido de carbono de los almacenes seleccionados (Paz *et al.*, 2012).

- *Verificación*: Proceso que permite evaluar el incremento del acervo de carbono, al menos una vez durante el periodo de monitoreo. También evalúa el cumplimiento y conformidad de los demás criterios de operación y monitoreo del proyecto definidos en el diseño inicial del PFC (DOF, 2015).
- *Salvaguardas*: Herramienta que permita evaluar los beneficios para el desarrollo sustentable de las personas/comunidades participantes en el proyecto. En caso de no incluirla, es deseable que propongan su combinación con otros estándares, de manera que se cumplan las salvaguardas sociales y ambientales establecidas por el país anfitrión del proyecto (Paz *et al.*, 2012).

La Norma Mexicana NMX-AA-173-SCFI-2015 está vigente desde 2015, establece 32 criterios necesarios para el desarrollo y obtención del registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en sus acervos de carbono. Es de cumplimiento voluntario y aplicable en el territorio nacional por propietarios forestales con cualquier régimen de propiedad (ejidal, comunal, propiedad privada o federal). Se espera que su aplicación pueda adecuarse a las circunstancias y contexto nacional e incorpore salvaguardas sociales y ambientales (DOF, 2015).

Para la aplicación de la norma, sólo serán elegibles actividades que resulten en un incremento en los almacenes de carbono con respecto a la línea base del proyecto, como pueden ser:

- *Forestación*: Plantación de árboles en los terrenos que no habían contenido bosques o selvas por un periodo mayor a 50 años.
- *Reforestación*: Plantación de árboles en terrenos que habían sido bosque recientemente, por un periodo menor a 50 años.
- *Agroforestería*: Plantación de árboles entre o alrededor de cultivos o sobre pastizales como medio de preservar o mejorar la productividad de la tierra.

- *Restauración forestal*: Combinación de plantación de árboles y regeneración natural inducida por los humanos, en un área forestal degradada, que ha perdido gran parte de su reserva de carbono.
- *Manejo forestal sustentable*: Actividades de manejo forestal que incluyan intervenciones forestales para promover una proporción superior de las especies deseadas, su población de árboles y la estructura de su tamaño, lo que significa promover el volumen máximo de existencias utilizable y, por lo tanto, de carbono que tal vez no se liberará a la atmósfera. También incluyen medidas en el sistema de aprovechamiento de la cubierta forestal, reducción de las pérdidas de materia orgánica muerta o carbono del suelo mediante la reducción de la erosión del suelo, evitando la corta y quema, y otras actividades de alto nivel de emisión. Replantación o regeneración natural después de la recolección o de alteraciones naturales que acelere el crecimiento de los árboles y reduzca las pérdidas de carbono (Robledo y Blaser 2008).

Un objetivo de la norma es fomentar el desarrollo de mercados vinculados a las acciones de cambio climático y facilitar el acceso de las comunidades y propietarios de predios a los mercados voluntarios de carbono. Asimismo, pretende identificar oportunidades para reducir los costos para el desarrollo y verificación de los proyectos, que actualmente es una de las mayores limitantes para la participación en estos mercados (DOF, 2015).

Un proyecto se puede considerar costo-eficiente cuando su relación beneficio/costo es calculada comparando los ingresos totales esperados en relación con los costos totales descontados. Cuando esta relación es mayor a 1,0 indica que los ingresos descontados superan a los costos descontados, lo que hace que el proyecto sea aceptable. Los análisis económicos pueden evaluar los méritos de los nuevos productos y servicios, como el carbono de los bosques. En la mayoría de los proyectos forestales de inversión tanto el análisis económico como el financiero son muy relevantes para la toma de decisiones. La eficiencia en este sentido significa producir la mayor cantidad de bienes o servicios con el menor costo, o a la inversa, que se obtenga un alto nivel de producto con la menor cantidad de insumos (Cubbage *et al.*, 2011).

### **1.3.3. Restauración forestal:**

De acuerdo con el último reporte forestal México posee 14,681,085.00 ha de terrenos forestales con algún grado de degradación y susceptible a su recuperación (CONAFOR, 2015). En conjunto con la situación que viven los mercados emergentes de carbono, así como las nuevas disposiciones legales y compromisos adquiridos, esta situación es favorable para impulsar los PFC y lograr restauraciones forestales a largo plazo.

Skutsch (2017), menciona que el incremento de carbono en bosques es un tema al que no se le está dando la relevancia que tiene para alcanzar los compromisos de reducción de emisiones que actualmente tiene el país. Las áreas forestales modificadas naturalmente o degradadas, en su proceso de regeneración absorben tres veces más CO<sub>2</sub> que los bosques intactos. Incluso las tasas de captación de carbono en los bosques secundarios tropicales, es decir, en diferentes fases de restauración, pueden ser hasta 11 veces más altas que en bosques intactos o bosques maduros o primarios (Poorter *et al.*, 2016).

Se estima que la recuperación de áreas forestales (crecimiento secundario) en América Latina y el Caribe, poseen un potencial para los próximos 40 años para absorber el equivalente a la energía emitida por todos los combustibles fósiles y fuentes industriales en los últimos 20 años en la zona (Chazdon *et al.*, 2016).

De acuerdo con la última Evaluación de Recursos Forestales México reportó 350,000 ha reforestadas anualmente entre 2000 y 2013 (CONAFOR, 2015). Si bien los programas dirigidos al sector forestal Programa Nacional Forestal (PRONAFOR), Conservación para el desarrollo sostenible (PROCOCODES) y Conservación y Uso Sustentable del Agua (COUSA), generan un impacto positivo en el corto plazo, pero requieren de seguimiento y de financiamiento para ser exitosos a largo plazo. Sin recursos destinados al mantenimiento de las áreas reforestadas, las posibilidades de fracaso son muy altas.

Esta situación podría cambiar con la implementación de la Norma, la cual tiene los siguientes criterios de elegibilidad: i) las áreas del proyecto no debieron ser afectadas de manera negativa en los cinco años previos a la realización del proyecto, ya sea por cambios en el uso del suelo, incendios, plagas, deforestación o degradación. Puede ser aplicable a proyectos de cualquier escala, por ejemplo, son considerados como proyectos de pequeña escala aquellos que remuevan menos de 5,000 tCO<sub>2</sub>e por año (DOF, 2015), lo que facilitaría la incorporación de áreas preferentemente forestales que se encuentren distribuidos en

patrones fragmentados; ii) los predios deben acreditar el derecho a la propiedad de la tierra y cumplir con la legislación y normatividad vigentes.

Aunque actualmente no se ha publicado metodologías exclusivas para la aplicación de esta Norma, esto no limita completamente su implementación, ya que se permite elaborarlos con metodologías de estándares reconocidos, entre ellos el MDL y el protocolo forestal del Climate Action Reserve CAR o cualquier otro que cumpla con los criterios señalados en la legislación.

En México la mayoría de los proyectos forestales de carbono que comercializan sus créditos, son elaborados con estándares de carbono internacionales (Hendrickson y Corbera, 2015) (Cuadro 1.1). Cada estándar establece sus propios lineamientos y metodologías para contabilizar las reducciones de emisiones según la categoría y tipo de proyecto propuesto asegurando el incremento en el acervo de carbono de manera diferente. A su vez procuran ser conservadores en sus metodologías de cálculo para garantizar certidumbre y buscando ser lo más reales, medibles, adicionales, verificables y permanentes posible.

**Cuadro 1.1.** Proyectos forestales actuales en México en el mercado de carbono (Forest Trends, Proteak, 2018).

Proyecto	Estándar de carbono utilizado	Asociación encargada u ONG.	Fecha de inicio	Características relevantes
1. Scolel Te, Chiapas México.	Sistema Plan Vivo.	ONG AMBIO A.C.	1994, (Balderas 2010, Hendrickson y Corbera 2015).	Solido enfoque a la generación de cobeneficios socio económicos y de empoderamiento social.

2. Proyecto CARBOIN, 12 comunidades, Oaxaca.	Protocolo del Climate Action Reserve Normas mexicanas NMX-SSA-14064-1-IMNC-2007 <i>Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación e informe de las emisiones y remociones de GEI</i> y la NMX-SSA-14064-3-IMNC-2007 <i>Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre GEI.</i>	Integradora de Comunidades Indígenas y campesinas de Oaxaca A.C. (ICICO A.C.) y ONG PRONATURA.	2001.	Proyecto impulsado por el extinto programa PSA-CABSA de la CONAFOR.
3. Secuestro de carbono en comunidades de extrema pobreza. Planeta Carbono Neutral, en la Sierra Gorda de Querétaro.	Carbono Voluntario de la Alianza para el Clima, Comunidad y Biodiversidad (CCB) y Verified Carbon Standard (VCS).	Grupo Ecológico Sierra Gorda IAP y ONG Rainforest Alliance. (Forest Trends, 2016).	2011.	Oferta créditos de carbono para venta internacional <i>Carbono Premium</i> y un producto nacional denominado <i>Carbono Biodiverso</i> , avalado por un estándar interno. Reforestan desde 0.5 ha
4. Much Kanan K'aax, en Quintana Roo.	Sistema Plan Vivo.	ONG U'yo'olche AC'. (Forest Trends, 2016).	2009.	Proyecto REDD de 1230 ha., con un importante componente de reforestación y forestación. En su componente agroforestal propone la siembra de árboles frutales en parcelas agrícolas.
5. San Juan Lachao, Oaxaca	Protocolo del Climate Action Reserve	ICICO A.C	2014	Con enfoque al mejoramiento del manejo forestal.
6. Amigos de Calakmul, Yucatán.	Verified Carbon Standard VCS	Terra Global Capital LLC	2008	Con enfoque al mejoramiento del manejo forestal.
7. PROCARBONO de Estado de México.	Interno	PROBOSQUE	2016	Apoyo anual de \$1,500.00/ha a poseedores de áreas reforestadas o plantaciones comerciales de hasta 4 años.
8. Fresh Breeze Afforestation Project, Tabasco, Chiapas	Verified Carbon Standard VCS	Proteak UNO S.A. de C.V.	2016	Proyecto de forestación con plantación forestal comercial de Teca.

9.Ejido San Nicolás Totolapan	Climate Action Reserve	Gobierno de la Ciudad de México.	2018	Proyecto de conservación y restauración
-------------------------------	------------------------	----------------------------------	------	---

Una de las razones para explicar la escasez de proyectos de restauración forestal, se debe a que esta clase de iniciativas, cuyo objetivo es la restauración con especies nativas de lento crecimiento y en bajas densidades, son típicamente menos productivas (en términos de carbono), que aquellos con orientación comercial. Estos proyectos tienen que plantar grandes superficies para obtener retornos significativos en términos de créditos de carbono, que resulta en altos costos de implementación y de monitoreo. Un proyecto MDL por ejemplo, toma hasta tres años para su registro y hasta año para su validación, con un costo promedio de \$300,000 USD (BioCF World Bank Group, 2017).

En conclusión, el mercado de carbono en México cuenta con un marco legal robusto que permitiría el desarrollo de un sistema de comercio de emisiones a corto plazo. Sin embargo enfrenta varios retos como la elevada carga técnica para el diseño y ejecución de los proyectos. La falta de metodologías adecuadas al contexto nacional para la contabilización de emisiones. Son proyectos complejos que dependen del consenso y negociación entre todos los actores involucrados. La escasez de auditores acreditados y falta de oferta de cursos especializados para el desarrollo de capacidades sobre el mercado de carbono. De ahí la importancia de comenzar con estos ejercicios de implementación local que aporten conocimiento y experiencia en este tipo de proyectos.

#### 1.4. Literatura citada:

- Allie, G. (2015). *Converging at the crossroads. State of Forest Carbon Finance 2015*. Washington, DC: Ecosystem Marketplace.
- Altamirano, J. C., Ortiz, E., Rissman, J., Ross, K., Fransen, T., Brown, C., & Martinez, J. (2016). *Ocho puntos de acción para alcanzar las metas climáticas de México*. Washington: World Resources Institute.
- Aquilino, V. G. (2011). El mercado de los bonos de carbono. *Derecho Ambiental y Ecología*, 51.
- Balderas, A., C. MacMillan, D., Skutsch, M., & C. Lovett, J. (2015). Yes, in my backyard: Spatial differences in the valuation of forest services and local co-benefits for carbon markets in Mexico. *Ecological Economics*, 130-141.
- Balderas, A., Morilla, A., Garmendia, S., & Marin, A. B. (2016). Identificación de áreas elegibles para actividades de captura de carbono por reforestación/forestación en el estado de Jalisco. *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Síntesis Nacional 2016 Programa mexicano del carbono*, 175-187.
- BioCF World Bank Group. (27 de Abril de 2017). *El Fondo de BioCarbono Lecciones sobre proyectos MDL forestales*. Obtenido de Worldbank.org: [http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/BioCF\\_Panama\\_ESPHigh\\_for\\_web.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/BioCF_Panama_ESPHigh_for_web.pdf)
- Chazdon R.L., E. N. Broadbent, D. M. A. Rozendaal, F. Bongers, A. M. A. Zambrano, T. M. Aide, P. Balvanera, J. M. Becknell, V. Boukili, P. H. S. Brancalion, D. Craven, J. S. Almeida-Cortez, G. A. L. Cabral, B. de Jong, J. S. Denslow, D. H. Dent, S. J. DeWalt, J. M. Dupuy, S. M. Durán, M. M. Espírito-Santo, M. C. Fandino, R. G. César, J. S. Hall, J. L. Hernández-Stefanoni, C. C. Jakovac, A. B. Junqueira, D. Kennard, S. G. Letcher, M. Lohbeck, M. Martínez-Ramos, P. Massoca, J. A. Meave, R. Mesquita, F. Mora, R. Muñoz, R. Muscarella, Y. R. F. Nunes, S. Ochoa-Gaona, E. Orihuela-Belmonte, M. Peña-Claros, E. A. Pérez-García, D. Piotto, J. S. Powers, J. Rodríguez-Velazquez, I. Eunice Romero-Pérez, J. Ruíz, J. G. Saldarriaga, A. Sanchez-Azofeifa, N. B. Schwartz, M. K. Steininger, N. G. Swenson, M. Uriarte, M. van Breugel, H. van der Wal, M. D. M. Veloso, H. Vester, I. C. G. Vieira, T. V. Bentos, G. B. Williamson, L. Poorter, (2016).

Carbon sequestration potential of second- growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 1-10. doi: 10.1126/sciadv.1501639

- CONAFOR. (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Informe nacional*. Roma: FAO.
- Covaleda, S., Bejarano, M., & Balderas, A. (2016). Estimación de la captura de carbono ex-ante en plantaciones de manglar establecidas en la costa de Chiapas y sur de Oaxaca. *Síntesis Anual 2016: Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Síntesis Nacional 2016 Programa mexicano del carbono*, 505-511.
- Cubbage, F., Davis, R., & Frey, G. (2011). *Guía para la evaluación económica y financiera de proyectos forestales comunitarios en México*. Washington DC: Banco Mundial. Región de Latinoamérica y el caribe.
- DOF. (15 de junio de 2015). *Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-173-scfi-2015.pdf>
- Forest Trends. (28 de Mayo de 2018). *Forest Carbon Portal. Tracking terrestrial carbon*. Obtenido de Forest Project Inventory. Mexico : <http://www.forestcarbonportal.com/project/index.php?KEYWORD=Mexico>
- Hamrick K. y Gallant M. (2017). Unlocking potential. *State of the voluntary carbon markets 2017*. Washington, DC: Ecosystem Marketplace.
- Hendrickson, C. Y., & Corbera, E. (2015). Participation dynamics and institutional change in the Scolel Té carbon forestry project, Chiapas, Mexico. *Geoforum*, 63-72.
- ICAP. (2018). *Estado del Comercio de Emisiones en el Mundo: Status Report 2018*. Berlín: ICAP.
- INECC (29 de marzo del 2018). Presentación de los resultados del Inventario nacional de Emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/presentacion-de-los-resultados-del-inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-152782>

- INECC y SEMARNAT. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report, Technical Summary. Changes in Human and natural drivers of Climate*. Génova, Suiza: IPCC Secretariat.
- MEXICO2. (24 de abril de 2018). *MEXICO2 Plataforma mexicana de carbono*. Obtenido de Mercado de Carbono voluntario: <http://www.mexico2.com.mx/medio-ambiente.php?id=14>
- Paz, F., de Jong, B., Etchevers, J., Covalada, S., Ranero, A., Esquivel, E., . . . Cuevas, R. (2012). *Estudio de factibilidad para el mecanismo REDD+ en Chiapas. Informe de la Fase A. Situación actual e información disponible*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México: Programa Mexicano del Carbono.
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2006). *Guidebook for the formulation of Afforestation and Reforestation under the Clean Development Mechanism*. International Tropical Timber Organization.
- Poorter L. Bongers, F. A. (2016). Biomass resilience of neotropical secondary forests. *Nature* 530 (7589), 211-214.
- Proteak (28 de mayo de 2018). Sustainability, Carbon Capture : <http://www.proteak.com/index.php/en/sustainability/carbon-capture>
- Redacción Teorema ambiental. (27 de julio de 2011). Obtenido de Teorema ambiental Revista técnico Ambiental: <http://www.teorema.com.mx/biodiversidad/forestal/sierra-gorda-obtiene-certificacion-internacional-por-captura-de-carbono/>
- Robledo C., y Blaser J. (2008). *Los temas clave en el tema de uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) con énfasis en las perspectivas de los países en desarrollo*. Berna, Suiza: PNUD Programa de las naciones unidas para el Desarrollo.
- Salgado, L., Dumas, M., Feoli, M., & Cedeño, M. (2013). *Mercado Doméstico Voluntario de Carbono de Costa Rica. Un instrumento hacia la C-Neutralidad*. San Jose, CR.: Programa de las Naciones unidas para el desarrollo, Costa Rica.
- Seeberg Elverfeldt, C. (2010). *Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor*. Roma: FAO Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.

- SEMARNAT. (03 de junio de 2013). *Acuerdo por el que se expide la Estrategia nacional de cambio climático*. Obtenido de DOF. Diario Oficial de la Federación.: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013)
- Skutsch, M., Paneque, J. G., Ghilardi, A., Balderas, A., Morfin, J., Michel, J. M., Ross, D. (2017). Adapting REDD+ policy to sink conditions. *Forest Policy and Economics*, 160-166.
- UNFCCC. (2006). Manual de la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. En N. O. Meyer, & D. Blobel. Bonn: UNFCCC.
- UNFCCC, (23 de abril del 2018). The Doha Amendment. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/the-doha-amendment>
- World Bank y Ecofys. (2016). *Carbon Pricing Watch 2016 (Mayo)*. Washington DC. Doi: 978-1-4648-0930-9-1 License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO, World Bank Group.

## **Capítulo 2: Estimación de potencial de captura de carbono en áreas no forestales mediante imágenes Landsat.**

### **Resumen**

En el 2015, se publicó en México la Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015). Sin embargo, las metodologías sugeridas para la determinación de los sitios viables son poco atractivas por lo costoso de su aplicación. En este sentido, se desarrolló una propuesta metodológica costo-eficiente para la selección de sitios viables para la implementación de esta Norma, así como el identificar el potencial de captura de carbono en base a las actuales condiciones locales de estas áreas elegibles. El estudio se realizó en la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla (RPCX), en donde se analizó el cambio de uso de suelo de las imágenes satelitales en época seca anual del 2011 y 2017, se identificaron 2,136 ha de superficie no forestal que había permanecido así por los últimos cinco años, a las cuales se les calculó un potencial de captura de carbono teórico equivalente al 75% de la densidad de carbono de las áreas forestales más inmediatas a cada área elegible, estimando para toda la RPCX 68,807 MgC o 251,835 tCO<sub>2</sub> de potencial a largo plazo ( $\geq 20$  años). De las hectáreas identificadas, 504 cumplieron con el requisito de no tener problemas legales, lo que representa un potencial de captura de 16,627 MgC o 60,857 tCO<sub>2</sub>. Las estimaciones se realizaron con el supuesto de que la restauración forestal se hará acorde con la afinidad vegetal más cercana a las áreas elegibles, que en esta área corresponden en su mayoría a bosques húmedos tropicales.

### **Palabras clave:**

Captura de carbono, imágenes Landsat 8 OLI, restauración forestal, proyectos forestales de carbono, polígonos Thiessen.

## 2.1. Introducción

La captura de carbono es una estrategia reconocida por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) para mitigar el calentamiento global reduciendo la acumulación de GEI en la atmósfera producidos por actividades antropogénicas (Watson *et al.*, 2000, Rizvi *et al.* 2016). En México de acuerdo con el último informe oficial del Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, durante el periodo de 1990 a 2012 la captura de carbono por recuperación de tierras forestales fue de 12 Mt de CO<sub>2</sub> (INECC y SEMARNAT, 2015).

Un aspecto fundamental que permite reconocer el servicio ambiental de captura de carbono que proveen los bosques es el monitoreo de las dinámicas de cambio de uso de suelo que ocurren en ellos y sus efectos. México tiene una amplia experiencia en proyectos que utilizan la tecnología satelital enfocada a la detección de cambios de cobertura arbórea (Valdez Lazalde *et al.*, 2006; Aguirre-Salado *et al.*, 2012; Torres-Rojas *et al.*, 2016), de suelo (de Jong *et al.*, 2010; Cartus *et al.*, 2014; Gebhardt *et al.*, 2014; Camacho-Sanabria *et al.*, 2015) y al monitoreo forestal considerando variables como la biomasa área, entre otras (Hughes *et al.*, 1999; Figueroa-Navarro *et al.*, 2005; Aguirre-Salado *et al.*, 2012).

En México la Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015) se enfoca en implementar proyectos que involucren actividades de incremento en la captura de carbono con respecto a la línea base de un proyecto. Entre los criterios que se deben cumplir para aplicar la norma se encuentran que las áreas tengan baja densidad de biomasa forestal, i.e. terrenos no forestales o en algún estadio sucesional de vegetación secundaria y que, además, esta situación se haya mantenido en los últimos cinco años a la fecha de inicio de la realización del proyecto forestal de carbono (DOF, 2015).

Las estimaciones de biomasa son un factor determinante para definir la viabilidad de este tipo de proyectos pues permiten inferir la capacidad de un ecosistema para almacenar carbono en cada uno de sus estratos de acuerdo con su composición vegetal (Ruiz *et al.*, 2014). Los principales depósitos de carbono en los ecosistemas de bosques tropicales son

biomasa de árboles, sotobosque, material muerto, hojarasca, restos de madera y materia orgánica del suelo. El carbono almacenado en la biomasa viva de los árboles es típicamente el grupo más grande y, por tanto, estimar la biomasa de carbono del bosque sobre el suelo es el paso más crítico en la cuantificación reservas y flujos de carbono (Gibbs *et al.*, 2007).

En un contexto de acciones para mitigar el cambio climático, esta estimación representa la cantidad potencial de carbono que podría ser liberado a la atmósfera, o ya conservado o fijado cuando las áreas forestales son manejadas para alcanzar dichos compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero (Ruiz *et al.*, 2014).

Las estimaciones de biomasa pueden realizarse con dos enfoques metodológicos: la medición directa la cual es precisa para localidades en particular, pero son costosas, destructivas e imprácticas a niveles regionales (Gibbs *et al.*, 2007) y la medición indirecta o con sensores remotos (Pechanec *et al.*, 2017).

El uso de imágenes satelitales para el monitoreo de recursos forestales es una tendencia en aumento, las imágenes más utilizadas han sido las de la serie Landsat y las imágenes MODIS (Lui y Coomes, 2015). La tecnología que permite el análisis de imágenes satelitales o percepción remota es una herramienta de gran relevancia que puede utilizarse con cuatro objetivos dentro del sector forestal, según Torres-Rojas *et al.* (2016): clasificación de cobertura forestal, estimación de atributos forestales, detección de cambios de uso del suelo del bosque y modelado espacial (Franklin, 2001). La estimación de atributos forestales como la biomasa aérea mediante sensores remotos es considerada información consistente, coherente y transparente (Herold y Johns, 2007; Torres Rojas *et al.* 2016).

Las imágenes Landsat utilizadas para el cálculo de estimaciones de biomasa aérea, se hacen a través del desarrollo de relaciones empíricas entre la biomasa aérea y otras características del bosque e índices espectrales, como el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) derivado de los datos satelitales (Aguirre, 2007; Aguirre, 2013; Kelsey y Neff, 2014; Zhu y Liu, 2015; Gizachew *et al.*, 2016). Como el mapa detallado de carbono forestal sobre el suelo de México (Cartus *et al.*, 2014).

Diversos autores, sugieren que las imágenes deben ser sometidas a procesos de corrección que permitan hacer comparables los datos obtenidos por diferentes satélites y diferentes fechas (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015; Chicas *et al.*, 2016; Young *et al.*, 2017; Shimizu *et al.*, 2018).

Son necesarias algunas consideraciones al momento de realizar análisis con imágenes Landsat (Lu, 2005; Powell *et al.*, 2010; Steininger, 2000). Las imágenes Landsat son afectadas por efectos solares, atmosféricos, topográficos y del tipo de sensor utilizado al momento de la toma de la imagen. El pre procesamiento de imágenes intenta minimizar estos efectos a través de una corrección absoluta. El término absoluto se usa para describir el proceso de obtención de valores "verdaderos" y comparables, aunque los valores corregidos son todavía aproximaciones. Los valores obtenidos de la corrección absoluta se pueden comparar (a través del tiempo, el espacio, o sensor) con imágenes que han pasado por el mismo nivel de corrección (Young *et al.*, 2017).

Estudios recientes validan el potencial que tiene el sensor *Operational Land Imager* (OLI) del Landsat 8 para mejorar la cartografía de la superficie terrestre e incrementar la comprensión de las dinámicas forestales en el ciclo del carbono (Gizachew *et al.*, 2016), al incluir bandas de onda infrarrojo cercano más estrechas, mayor relación señal-ruido y mayor sensibilidad radiométrica (Irons *et al.*, 2012).

El objetivo de este estudio es proponer una guía metodológica costo eficiente para identificar áreas específicas con potencial de captura de carbono que cumplan con los criterios establecidos en la Norma, mediante el análisis de imágenes de Landsat satelitales y definir su potencial teórico de captura de carbono.

Aunque la Norma sugiere seis actividades elegibles: reforestación, forestación, regeneración forestal, manejo forestal sustentable, conservación forestal y agroforestal; la propuesta solo aplica para las tres primeras relacionadas con la restauración forestal.

## **2.2 Materiales y métodos**

### **2.2.1. Área de estudio**

La "Región Prioritaria para la Conservación Xilitla" (RPCX), en San Luis Potosí, México, es un área protegida decretada desde 1923 con el nombre de "Reserva Forestal Nacional Porción Boscosa de Xilitla" y se encuentran al sureste del estado de San Luis Potosí en la región de la Huasteca, abarca en su mayoría al municipio de Xilitla, y partes de Aquismón. (Figura 2.1.). Se caracteriza por poseer bosques templados (pino, encino y oyamel) y mesófilo de montaña o de niebla (Reyes *et al.*, 2016), considerados como los ecosistemas forestales, con mayor contenido de biomasa (De Jong *et al.* 2010).

Trabajos previos identificaron diferentes sitios que requieren acciones inmediatas de restauración estableciendo 626 ha de prioridad alta correspondientes a áreas dedicadas actualmente a actividades agropecuarias y 415 ha de prioridad media que son terrenos cubiertos por vegetación secundaria leñosa, en descanso o reforestados (Reyes *et al.*, 2016).

### **2.2.2. Materiales:**

Para el análisis espaciotemporal se utilizaron imágenes satelitales Landsat descargadas del portal del Servicio Geológico Estadounidense USGS GloVis (<https://glovis.usgs.gov/>) Nivel- 1, correspondientes a la época seca (mes de abril) de la región. La primera imagen corresponde a Landsat 5 TM (13 abril del 2011) y la segunda a Landsat 8 OLI (29 de abril del 2017). El área de estudio se cubrió con la escena *path 26-row 45* en ambos casos.

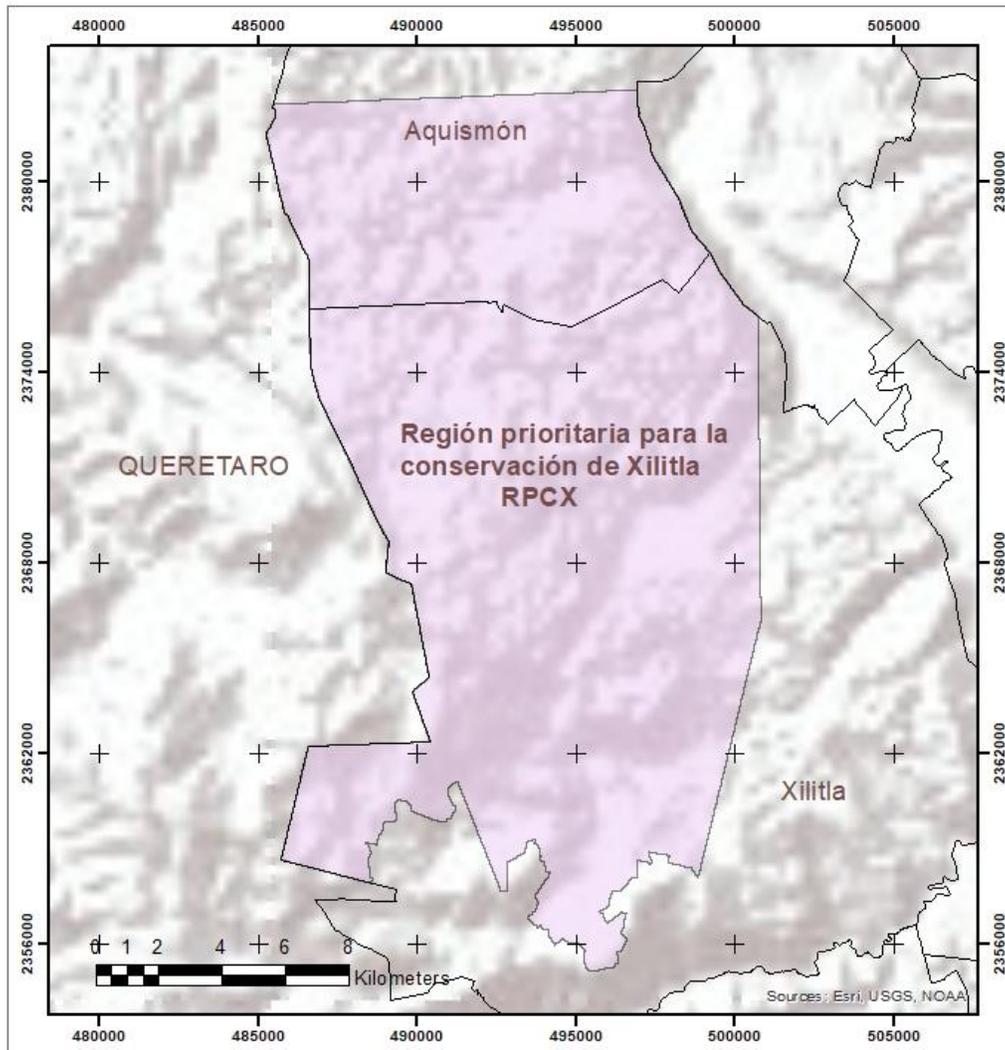
### **2.2.3. Metodología:**

#### **2.2.3.1. Determinación de las zonas potenciales para captura de carbono:**

##### **1. Pre-procesamiento de imágenes:**

La corrección geométrica o georeferenciación se realizó mediante un análisis de regresión lineal múltiple donde se calcularon los parámetros de ajuste, mismos que sirvieron para proyectar todos y cada uno de los píxeles al sistema de referencia espacial (Toutin, 2004). Asimismo, ambas imágenes se pre-procesaron mediante una metodología de corrección absoluta (Young *et al.*, 2017).

# Región Prioritaria para la Conservación Xilitla, SLP, México



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 14N  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: WGS 1984  
false easting: 500,000.0000  
false northing: 0.0000  
central meridian: -99.0000  
scale factor: 0.9996  
latitude of origin: 0.0000  
Units: Meter  
Escala: 1:176,024

### Simbología

- Municipios SLP
- LIMITE\_RPCX

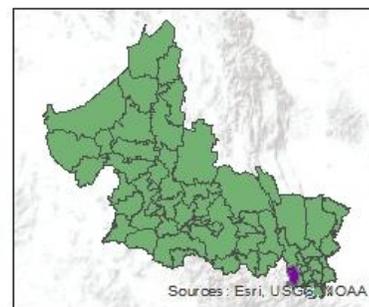


Figura 2.1. Ubicación de la Región prioritaria para la conservación Xilitla RPCX, en el estado de San Luis Potosí, México.

Para minimizar los efectos de las condiciones ambientales, las imágenes se pre-procesaron para convertir los niveles digitales (ND) (0 a 255) a valores adimensionales (reflectancia) y pudieran ser comparables (Aguirre-Salado, 2013; Schaepman-Strub *et al.*, 2006; Young *et al.*, 2017).

Para llevar cabo el procesamiento de imágenes se utilizó el software IDRISI 17.0 versión Selva y la función de *Image calculator*. El proceso de corrección absoluta en la imagen Landsat 5 TM se aplicó en cada una de las bandas 1-5 y 7, exceptuando la banda térmica 6 y para la imagen Landsat 8, se aplicó a las bandas de 1-7, por ser las de interés utilizando el procedimiento que se describe en el Cuadro 2.1:

Cuadro 2.1. Formulas aplicadas para la corrección absoluta de las imágenes Landsat.

Etapa del proceso	Imagen Landsat 5 TM	Imagen Landsat 8 OLI
1. Calculo de radianza.	$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{DN_{max} - DN_{min}} \right) * (DN - DN_{min}) + L_{min\lambda}$	n/a
2. Calculo de reflectancia (TOA)	$\rho_{\lambda} = (L_{\lambda}) * \left( \frac{\pi \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \right)$	$\rho_{\lambda} = \frac{(Mp * Qcal + Ap)}{\sin \theta_s}$
3. Parámetro de Iluminación	$IL = (\cos \theta_p \cdot \cos \theta_z) + (\sin \theta_p \cdot \sin \theta_s \cdot \cos (\phi_o - \phi_o))$	
4. Parámetro C.	$C_{\lambda} = \frac{b_{\lambda}}{m_{\lambda}}$	
5. Corrección topográfica	$\rho_{\lambda_h} = \rho_{\lambda} \left( \frac{\cos \theta_p + C_{\lambda}}{IL + C_{\lambda}} \right)$	

$L_{\lambda}$ =Radianza espectral del sensor ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $L_{max_{\lambda}}$ =Radianza máxima del sensor en cada banda ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $L_{min_{\lambda}}$ =Radianza mínima del sensor en cada banda ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $DN_{max}$ = Máximo de números digitales capturados por la banda (v.g. 255).  $DN_{min}$ =Mínimo de números digitales capturados por la banda (v.g. 1).  $DN$ =Raster del valor de números digitales capturados por cada banda. (v.g. [I5\_b1], [I5\_b2],...);  $\rho_{\lambda}$  = Raster de reflectancia adimensional exoatmosférica por banda espectral;  $d$ = Distancia del sol de la Tierra, acorde al día juliano (unidades astronómicas);  $ESUN_{\lambda}$  = Irradiancias solares exoatmosféricas medias ( $W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$ );  $\theta_s$ = Ángulo cenital solar *SUN ELEVATION* (radianes);  $Mp$ = Factor de re escalamiento multiplicativo específico de banda de los metadatos, *REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x*;  $Qcal$ = Valores de píxel del producto estándar cuantificados y calibrados (DN).  $Ap$ =Factor de reajuste aditivo específico de banda de los metadatos, *REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x*;  $IL$  = Raster de Parámetro de Iluminación. (v.g.[z\_il]);  $\theta_p$ = Raster de ángulo de la pendiente del terreno (radianes) (v.g. [mde\_sloperad]);  $\phi_o$ = Azimut solar *SUN AZIMUTH* (radianes);  $\phi_o$ = Raster del aspecto del terreno (radianes) (v.g.[mde\_aspectrad]);  $C_{\lambda}$  = Parámetro C para cada banda espectral  $\lambda$ ;  $b_{\lambda}$  = Valor de intersección del análisis de regresión lineal entre  $\rho_{\lambda}$  (variable dependiente) y  $IL$  (variable independiente);  $m_{\lambda}$ = Valor de pendiente del análisis de regresión lineal entre  $\rho_{\lambda}$  (variable dependiente) y  $IL$  (variable independiente);  $\rho_{\lambda_h}$  = Reflectancia adimensional exoatmosférica de un terreno topográficamente corregido (v.g. [aoil5\_b1\_rflh], [aoil5\_b2\_rflh],...)

(valores encontrados en los metadatos de la imagen, archivo .mtl)  
(Teferi *et al.*, 2010, Aguirre-Salado *et al.*, 2012, Aguirre-Salado *et al.*, 2017)

Para dar mayor énfasis a la visibilidad de las bandas de onda infrarroja, que son las más sensibles a la densidad de cobertura vegetal, se realizó una composición en falso color, 345 para la imagen de Landsat 5 y 456 para la imagen de Landsat 8 (Figura 2.2.b.d.). Para identificar visualmente la variabilidad espectral y espacial de las diferentes coberturas y facilitar la selección de los píxeles de las clases puras de interés para la siguiente etapa de clasificación.

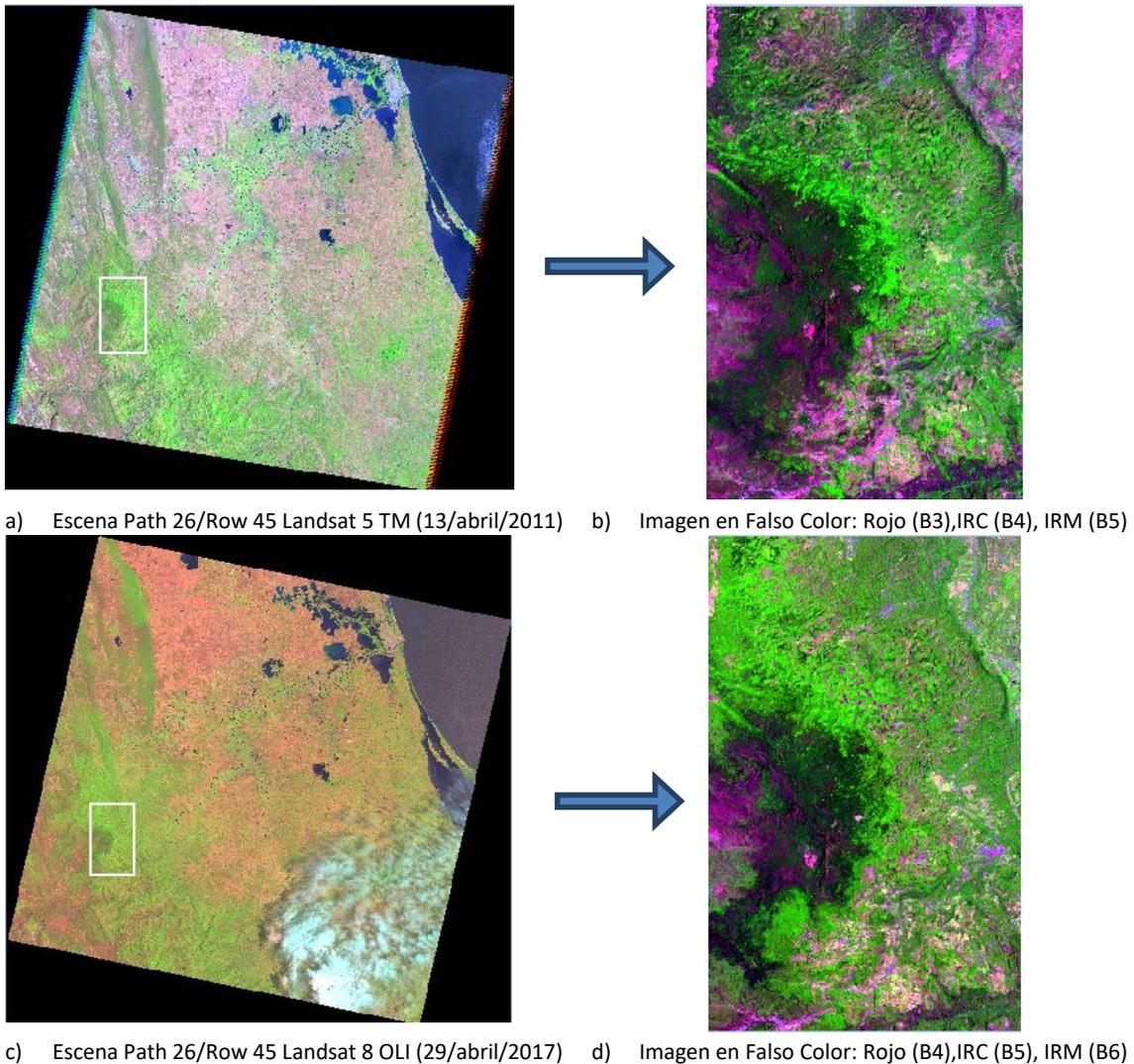


Figura 2.2. a.c. Escenas descargadas del USGS sin procesamiento. b.d. Imágenes ajustadas al área de estudio, pre-procesadas con correcciones absolutas y comparables en falso color.

## 2. Clasificación de imágenes:

Uno de los criterios para selección de las áreas elegibles para aplicación de la Norma es que el sitio haya permanecido sin cobertura forestal por lo menos cinco años anteriores a la propuesta, para identificar esta característica se seleccionó el parámetro de porcentaje

de cobertura vegetal para clasificar las imágenes, considerándose con presencia forestal  $\geq 25\%$  de cobertura o ausencia o áreas no forestales  $\leq 25\%$  de cobertura vegetal.

Para ello, se seleccionaron 15 campos de entrenamiento o subclases (Figura 2.3.a) y se clasificaron en dos categorías, Forestal y No forestal. Para cada una de las categorías se determinaron 4 diferentes firmas espectrales (Figura 2.3.b).

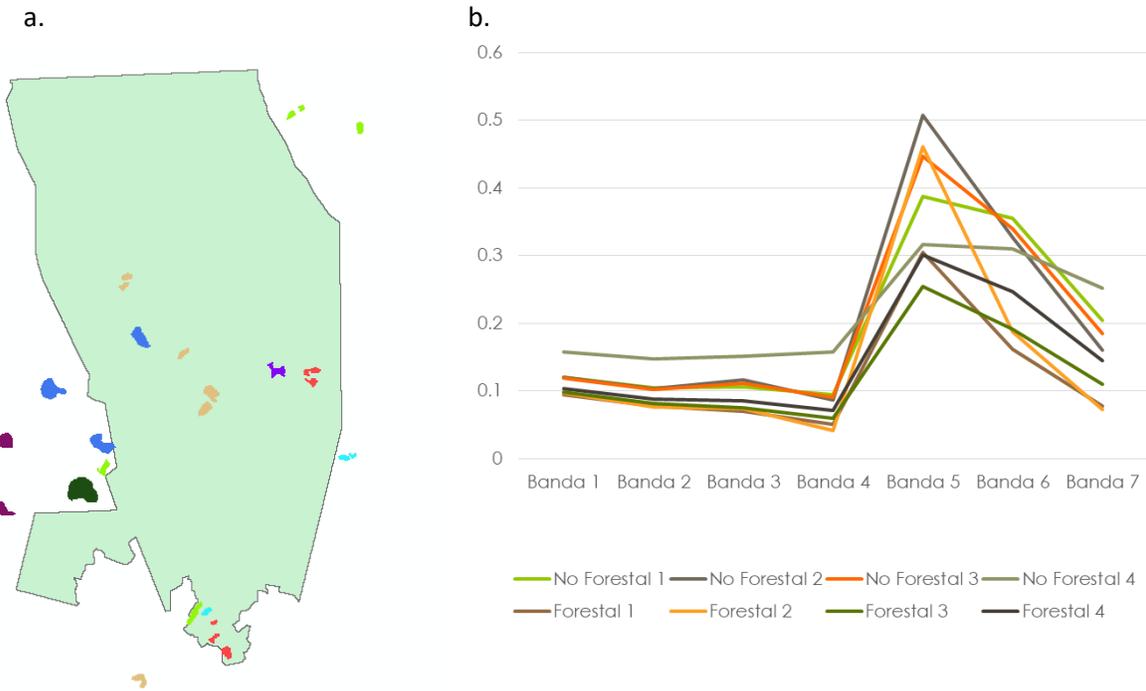


Figura 2.3. a. Selección y definición de campos de entrenamiento. b. Definición y descripción de las firmas espectrales por categoría para cada banda.

A las firmas espectrales consideradas no forestales se asignó un valor de 1 por ser las de interés y 0 a las forestales (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Asignación de valores categóricos a las firmas espectrales obtenidas.

Subclase	Firma espectral	Valor categórico	Subclase	Firma espectral	Valor categórico
1	No forestal 1	1	5	Forestal 1	0
2	No forestal 2	1	6	Forestal 2	0
3	No forestal 3	1	7	Forestal 3	0
4	No forestal 4	1	8	Forestal 4	0

El algoritmo utilizado en la clasificación fue el k-vecino más cercano (kNN, por sus siglas en inglés), por ser uno de los más utilizados para estudios forestales y recomendado para datos no normales (McRoberts, 2008), el algoritmo se aplicó a los datos espectrales que

fueron estandarizados previamente a través de la corrección absoluta y de esta manera se aumentó la certidumbre de la clasificación realizada (Figura 2.4 a.b.).

Cuando la variable de interés es categórica, el algoritmo funciona como clasificador, escogiendo el valor más cercano o una moda entre los más cercanos (Aguirre-Salado, 2013). Se empleó un  $k = 7$  para estimar la proporción de clases y los resultados fueron comparados visualmente y de manera aleatoria con el mapa de densidad de carbono arriba del suelo forestal elaborado por Cartus *et al.* (2014), para evaluar la coherencia en los valores.

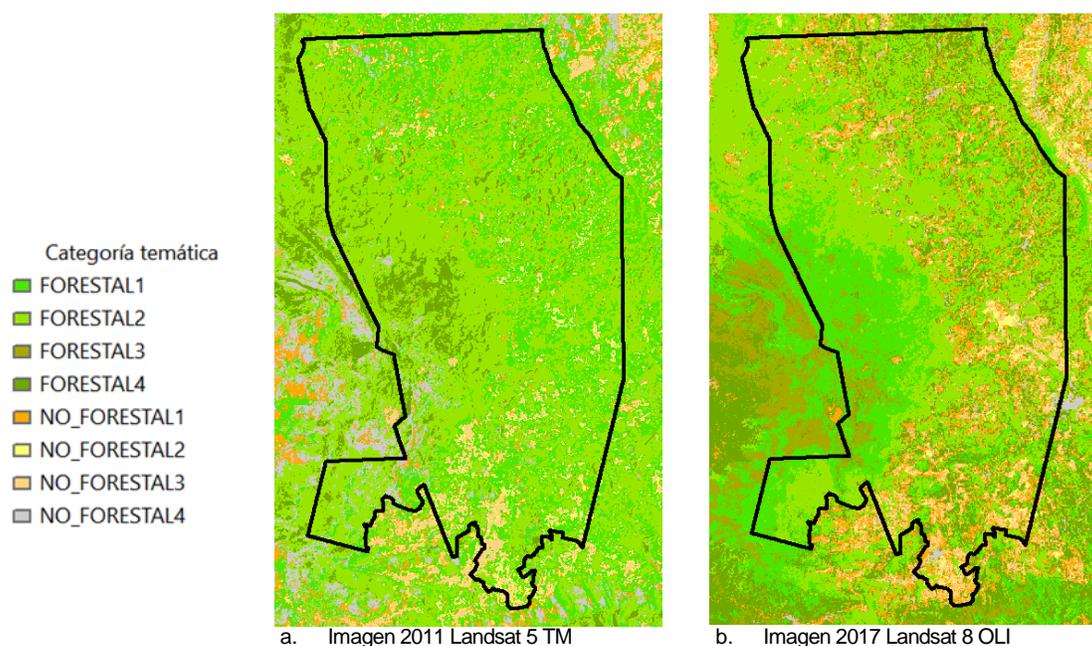


Figura 2.4. a. b. Clasificación de imágenes por el algoritmo kNN de acuerdo con las 8 firmas espectrales obtenidas.

Posteriormente las áreas se reclasifican en ambos mapas agrupando las firmas espectrales No forestales en una categoría y las firmas espectrales Forestales en otra, ambos mapas (Figura 2.5.a.b.) se intersectan para identificar los sitios que han permanecido sin cobertura forestal en ambos periodos y así obtener las áreas sin cobertura arbórea en los últimos cinco años (Figura 2.5. c.). Para la vectorización de las áreas raster obtenidas se realizaron ambos procedimientos, el simplificado y el no simplificado, a través de una prueba de t de medias para muestras emparejadas y z, y no se obtuvieron diferencias significativas entre ambos métodos. Por lo que se utilizó el simplificado.

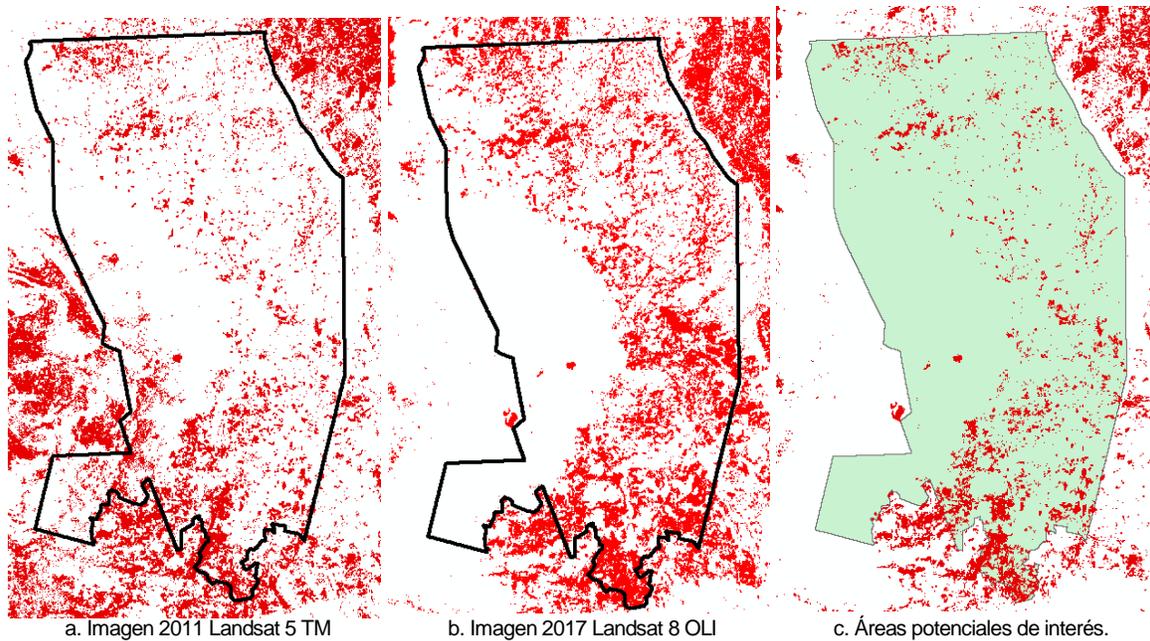


Figura 2.5.a.b. Reclasificación a las dos categorías de interés, áreas en rojo, consideradas como No bosque (firmas espectrales No forestales). c. Producto final, áreas sin cobertura forestal coincidente en los dos años.

### 3. Validación del mapa de cobertura forestal.

Para conocer la fiabilidad de la clasificación supervisada se realizó una validación visual a través de la plataforma de Google Earth Pro, utilizando 100 puntos aleatorios, mediante la función SAMPLE de IDRISI (Figura 2.6). En cada sitio se determinó que la clasificación fuera correcta de acuerdo con los casos de análisis (Figura 2.6. a,b,c,d).

Con esos resultados se desarrolló una matriz de confusión a partir de las cuales se obtuvieron las medidas estadísticas de precisión del mapa como el Índice Kappa, y los otros índices de confiabilidad de clases como exactitud general, exactitud del usuario y exactitud del productor (Chicas *et al.*, 2016, François Mas *et al.*, 2003; Lui y Coomes, 2015) (Cuadro 2.3).

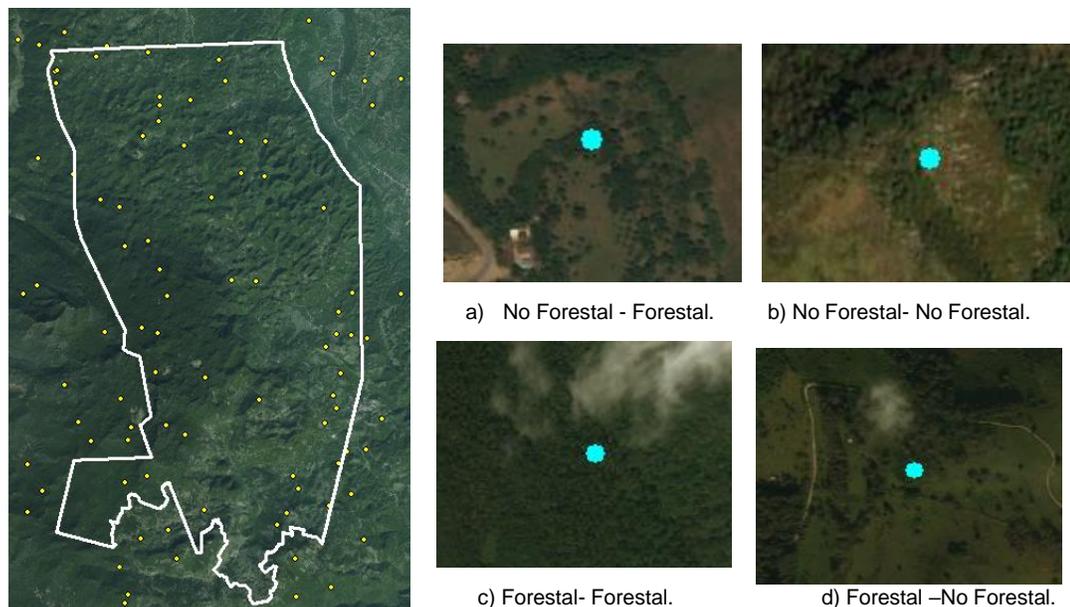


Figura 2.6. Muestreo aleatorio de 100 puntos al azar para validación. a.b.c.d.

Casos de análisis: valor 1 (resultado de la clasificación kNN) – valor 2 (resultado del análisis visual en Google Earth).

Los resultados fueron aceptables, se describirán en la sección de resultados y permitieron continuar con la siguiente etapa del proceso.

Cuadro 2.3. Matriz de confusión para la validación de la clasificación realizada.

Clase	Forestal	No forestal	Total	Exactitud del usuario	Exactitud del productor
Forestal	87	4	91	0.96	0.99
No Forestal	1	8	9	0.89	0.67
Total	88	12	100		
<b>Exactitud general</b>	0.95			<b>I.C. 95%</b>	(0.508,0.961)
<b>Índice Kappa</b>	0.735			<b>Concordancia</b>	Buena
<b>Error estándar</b>	0.116				

### 2.2.3.2. Determinación del potencial de captura de carbono:

Para estimar el potencial de captura de carbono de las áreas no forestales se utilizó el mapa de vegetación y uso de suelo del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de San Luis Potosí (CONAFOR, 2015), que contiene información cartográfica de recursos forestales escala 1: 50,000 y 4 ha como unidad mínima cartografiable (Figura 2.7.a).

Además, el mapa nacional de densidad de carbono aéreo forestal (Cartus *et al.*, 2014), que permitió establecer un estimado de la densidad de carbono aéreo o arriba del suelo (AGCD *aboveground carbon density*, en inglés) con una resolución de pixel de 30 x 30 m<sup>2</sup> y expresando densidades de carbono en MgC ha<sup>-1</sup> (Figura 2.8.b).

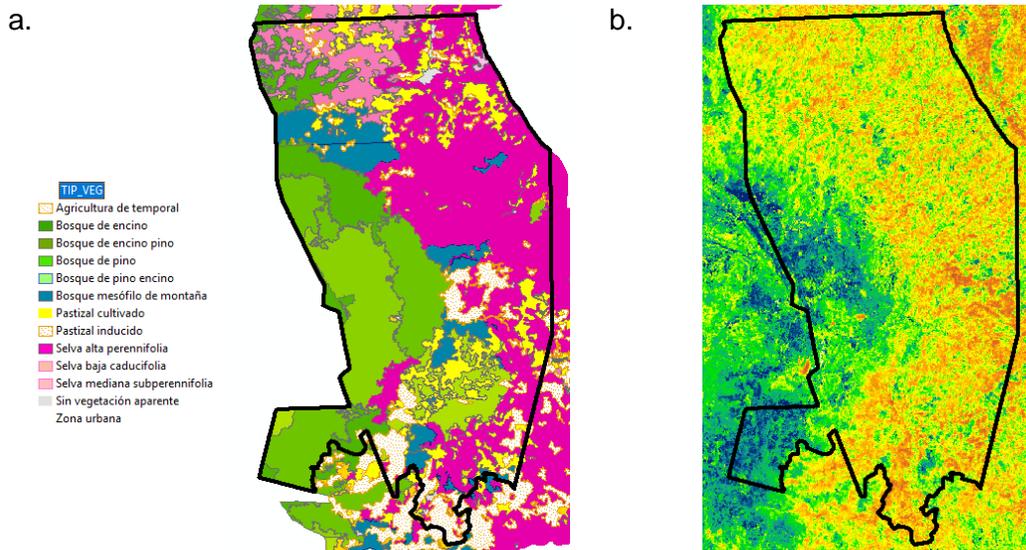


Figura 2.7.a. Mapa de vegetación y uso de suelo de la RPCX, con base en el IEFyS para San Luis Potosí, 2014. b. Mapa de densidad de carbono aéreo forestal de Cartus *et al.* 2014 para la RPCX (Áreas azules > densidad, áreas rojas < densidad).

El propósito de unir el mapa de vegetación y uso de suelo con el de densidad de carbono aéreo forestal fue obtener los valores estadísticos de la densidad de carbono aéreo AGCD (MgC/ha) en áreas forestales (Figura 2.8) de manera que se obtuvieran los valores máximos, mínimos y promedio por polígono con vegetación forestal.



Figura 2.8. Unión de información de densidad de carbono aéreo forestal AGCD por pixel (30x30 m) con la clasificación de vegetación y uso de suelo (VyUS) del IEFyS, para obtención de valores estadísticos por polígono de cada tipo de VyUS.



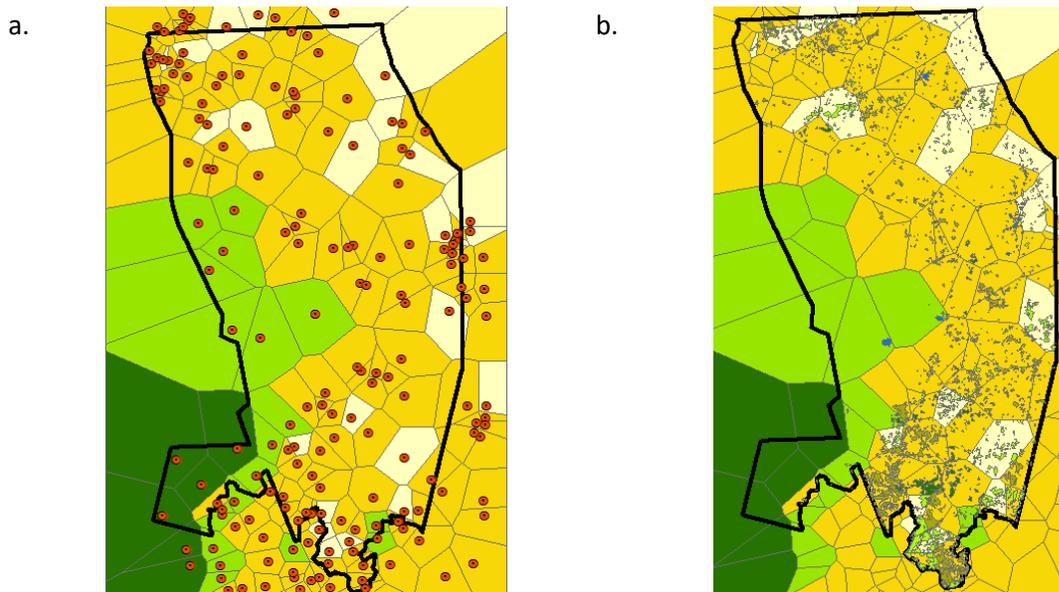


Figura 2.10. a. Área de influencia (Polígonos de Thiessen) elaborados a partir del centroide de cada polígono con vegetación forestal en el área. b. Áreas potenciales para captura de carbono dentro los polígonos de Thiessen.

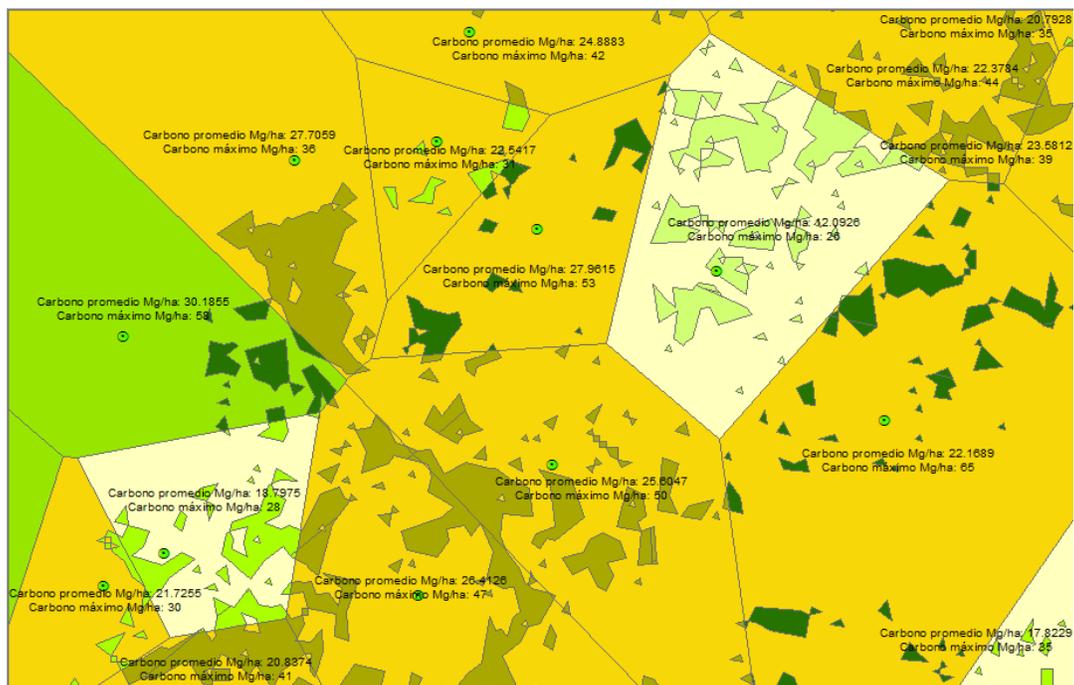


Figura 2.11. Valores máximos y promedio por área de influencia (polígonos Thiessen) para cálculo de potencial de captura de carbono para cada área de interés.

La densidad de carbono aéreo forestal extrapolado a la hectárea es asumida para cada una de las áreas elegibles. Posteriormente en Excel, se multiplicaron los valores obtenidos de

AGDC (MgC ha<sup>-1</sup>) para cada polígono de Thiessen por el total de cada área elegible y de esta forma se obtuvo la estimación del potencial incremento en carbono aéreo que podría llegar a alcanzar dicha área considerando una restauración afín a la vegetación forestal circundante y asumiendo que las actividades de restauración estabilizarán las tasas de incremento de carbono aéreo (Hughes *et al.*, 1999; Chazdon *et al.*, 2016) permitiendo alcanzar el objetivo del 75% de incremento de la densidad máxima reportada a largo plazo. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\Delta AGDC = \left[ \frac{\rho_{m\acute{a}x} + \rho_{\bar{x}}}{2} \right] \times a$$

Donde  $\Delta AGDC$  es el incremento potencial de densidad de carbono aéreo (MgC),  $\rho_{m\acute{a}x}$  es la densidad máxima reportada en el área de influencia (MgC ha<sup>-1</sup>),  $\rho_{\bar{x}}$  es la densidad promedio reportada en el área de influencia (MgC ha<sup>-1</sup>), y  $a$  es el área de cada polígono elegible (ha).

Por último, para calcular el potencial de captura de carbono en términos de CO<sub>2</sub> se multiplicó el carbono por el factor 3.66. Este factor se calculó considerando el peso molecular del CO<sub>2</sub>, que es 44 gramos (12 g del carbono (C) y 32 g de los dos átomos de oxígeno (O)) 44/12=3.66, aplicándose la siguiente fórmula:

$$\Delta CO_2 = \Delta AGDC \times 3.66$$

Donde  $\Delta CO_2$  es el incremento potencial de captura de carbono en términos de dióxido de carbono (Ton CO<sub>2</sub>).

Un criterio de la NMX es acreditar la legar posesión de la tierra para lo cual se revisó una base de datos disponible del 2009 del Registro Agrario Nacional (RAN), con información de tenencia y problemas de litigio. Se diferenció el análisis con base en el tipo de tenencia de la tierra: ejidal, comunal, y propiedad privada. Finalmente, la estimación del potencial de captura de carbono por ejido fue producto de la sumatoria de las áreas elegibles por ejido y del cálculo individual del potencial de incremento de densidad de carbono aéreo (AGDC) para cada una de ellas.

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Áreas potenciales para captura de carbono:

El procedimiento metodológico propuesto la identificación a nivel local de las áreas elegibles para implementar la Norma con el uso con imágenes Landsat es el siguiente Figura 2.12.

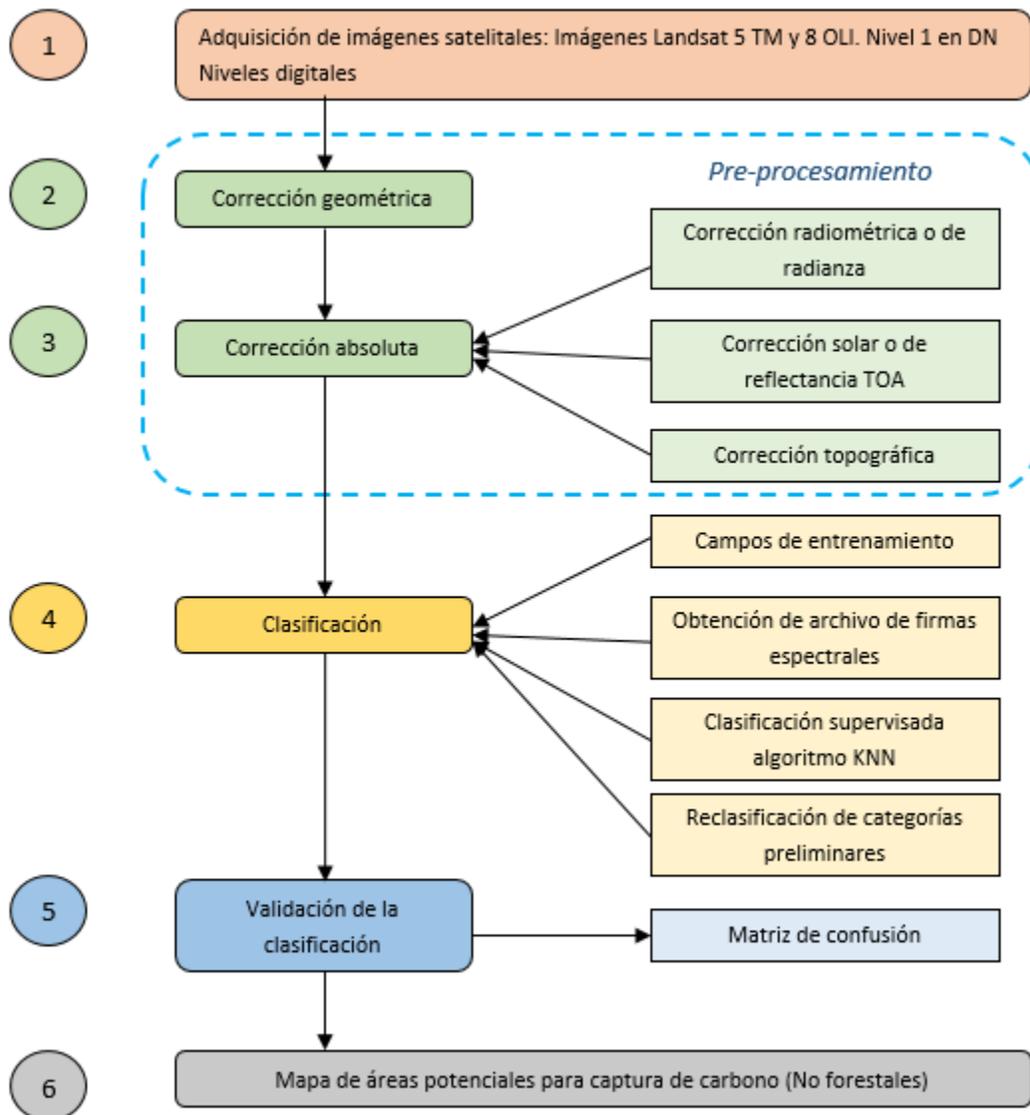


Figura 2.12. Procedimiento metodológico para la definición de áreas elegibles para captura de carbono

La Región Prioritaria para la Conservación Xilitla RPCX, registró una superficie de 2,136.1 ha de áreas no forestales que se mantienen en condiciones de densidades de cobertura forestal menor al 25% en el periodo de abril del 2011 a abril del 2017 (Cuadro 2.4). El mapa

obtenido tuvo una precisión del 95% con un índice de kappa del 0.735 ambos umbrales se consideran aceptables para la confiabilidad de un mapa (Chicas *et al.*, 2016).

Al mapa de ubicación de áreas no forestales se le añadió la información disponible referente a la tenencia (Figura 2.13); así, la mayor cantidad de superficie es ejidal y de propiedad privada.

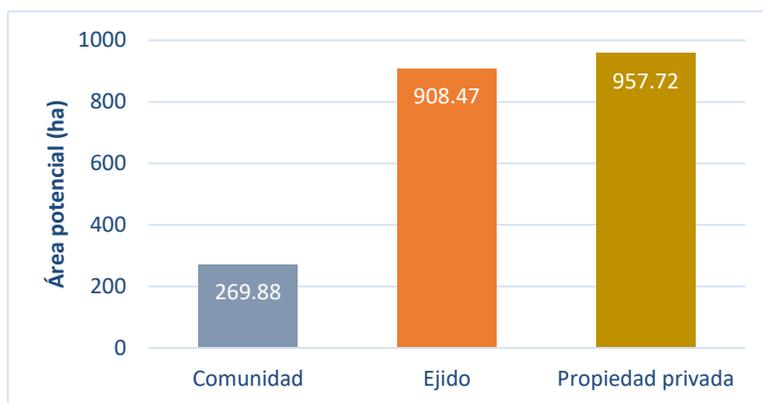


Figura 2.13. Superficies con áreas no forestales en los últimos cinco años de acuerdo con el tipo de tenencia de la tierra.

La superficie elegible se distribuye en: tres comunidades, 22 ejidos y 30 propiedades privadas (Figura 2.14).

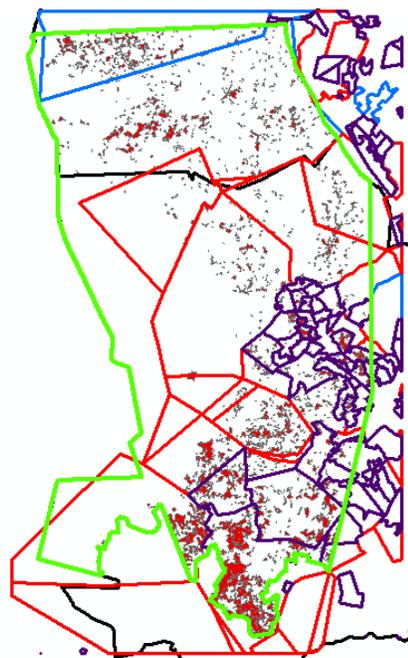


Figura 2.14. Áreas potenciales dentro del RPCX de acuerdo a la información de tenencia de la tierra del Registro Agrario Nacional (comunidades=azul, rojo= ejidos, morado=propiedad privada).

Una vez obtenida la información por tipo de tenencia se analizó la base de datos donde se seleccionaron los ejidos sin conflictos agrarios. Debido a que los datos del RAN no cuentan con información sobre los aspectos legales en la propiedad privada estos predios fueron excluidos del análisis, resultando solo 504.53 ha que cumplen con ambos criterios (áreas no forestales en los últimos 5 años y libres de litigio) para la elaboración de un PFC (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Tipo de tenencia y legalidad de la superficie analizada en condiciones no forestales dentro de la RPCX.

<b>Legalidad de la propiedad</b>	<b>Comunidad</b>	<b>Ejido</b>	<b>Pequeña propiedad</b>	<b>Total</b>
Tenencia regularizada	3.10	501.43	0.00	<b>504.53</b>
Con litigio conocido	266.77	407.03	0.00	<b>673.80</b>
Información no disponible	0.00	0.00	957.72	<b>957.72</b>
Total	<b>269.87</b>	<b>908.46</b>	<b>957.72</b>	<b>2,136.05</b>
Porcentaje %	12.63	42.53	44.84	100

Los cinco ejidos que agrupaban la mayor superficie con condiciones de elegibilidad fueron: Soledad de Zaragoza (162 ha), Miramar (124 ha) Ollita del Pino (83 ha), Coronel Castillo (66 ha) y Apetzco (24 ha).

### **2.3.2. Potencial de captura de carbono en las áreas de interés:**

El proceso metodológico para estimar el potencial de captura de carbono en las áreas elegibles se describe en la siguiente figura 2.15:

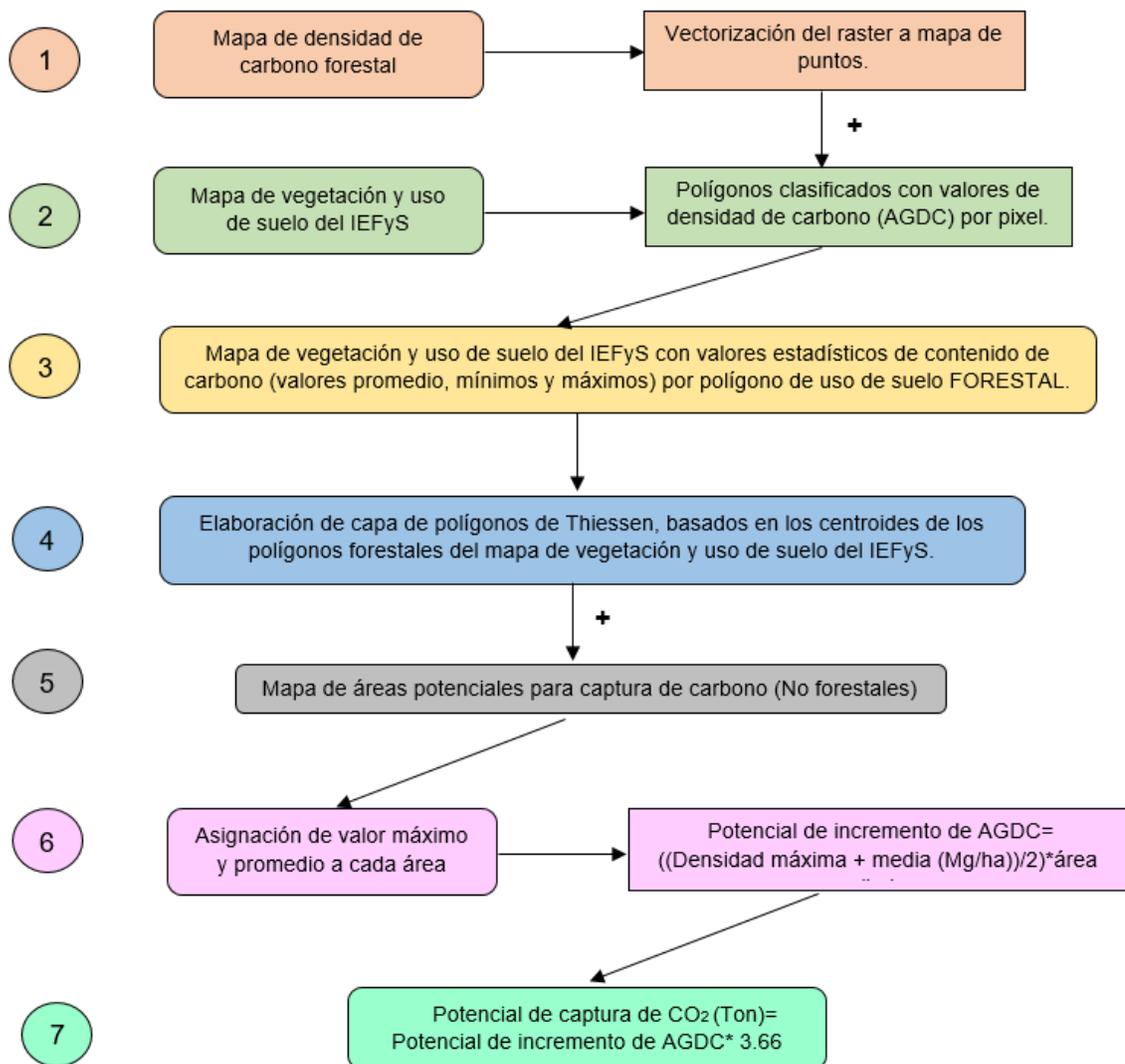


Figura 2.15. Procedimiento metodológico para la definición del potencial teórico de captura de carbono.

Los resultados del potencial de captura de carbono, bajo los supuestos de restauración forestal acorde con el tipo de vegetación circundante, resultó de la sumatoria de cada uno de los 3,047 polígonos identificados como áreas no forestales y el resultado del potencial de incremento de AGDC individual para cada polígono. Para toda el área que comprende la RPCX se obtuvo una estimación de potencial de incremento de densidad de carbono de 68,807.52 MgC o captura de 251,835 tCO<sub>2</sub> (Cuadro 2.5). La cual se distribuye por tipo de tenencia de la siguiente manera (Figura 2.16):



Figura 2.16. Potencial de incremento en la densidad de carbono aéreo (AGDC) por tipo de tenencia.

Este potencial se considera posible alcanzarse en el largo plazo ( $\geq 20$  años) considerando una tasa de incremento anual de carbono en biomasa sobre el suelo conservadora de  $1.6 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ , la cual ha sido reportada en la literatura como alcanzable en promedio a nivel nacional en los bosques húmedos tropicales (De Jong *et al.*, 2010).

Cuadro 2.5. Potencial de captura de carbono en la RPCX de este estudio.

Clasificación del área	Superficie (ha)	Potencial incremento de carbono aéreo total (MgC)	Potencial $\text{tCO}_2^1$ total
Áreas no forestales ( $\leq 25\%$ de cobertura vegetal)	2,136	68,807	251,835

<sup>1</sup> Obtenido de multiplicar la cantidad de total de carbono por el factor de equivalencia 3.66.

La factibilidad de gestión del total del potencial de incremento de carbono aéreo en la RPCX acorde a los datos de tenencia y legalidad del RAN, se reduce a  $16,627.61 \text{ MgC}$  considerando el cumplimiento de los dos criterios de elegibilidad (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Potencial de incremento de densidad de carbono aéreo (MgC) de acuerdo con criterios de tenencia y legalidad.

Legalidad de la propiedad	Comunidad	Ejido	Pequeña propiedad	Total
Tenencia regularizada	93.33	16,534.28	0.00	<b>16,627.61</b>
Con litigio conocido	7,922.16	12,977.97	0.00	<b>20,900.13</b>
Información no disponible	0.00	0.00	31,279.78	<b>31,279.78</b>
<b>Total</b>	<b>8,015.49</b>	<b>29,512.25</b>	<b>31,279.78</b>	<b>68,807.52</b>

Este potencial de incremento de carbono aéreo representa una captura de carbono de 60,857.05 tCO<sub>2</sub> estimada en trece ejidos y dos comunidades, los cuales son (Cuadro 2.7):

Cuadro 2.7. Calculo potencial de captura de carbono y CO<sub>2</sub> para los ejidos que cumplen los criterios de elegibilidad y factibilidad.

Nombre de la localidad	Superficie de área elegible (ha)	Potencial de incremento en densidad de carbono aéreo (MgC)	Potencial de captura de CO <sub>2</sub> (Ton) <sup>1</sup>
Soledad de Zaragoza	162.57	5,352.58	19,590.44
Miramar	124.31	3,829.16	14,014.73
Ollita del pino	83.96	2,759.74	10,100.65
Coronel Castillo	66.05	2,475.57	9,060.59
Apetzco	23.84	725.19	2,654.20
Xilitlilla	14.51	445.82	1,631.70
Aguayo	12.92	575.61	2,106.73
Amayo de Zaragoza	9.00	229.50	839.97
San Antonio Xalcuayo	2.68	90.73	332.07
Ahuacatlán	0.87	29.57	108.23
Xuchiayo	0.57	17.34	63.46
San José de Hoyja	0.12	2.57	9.4
Bagazo	0.03	0.90	3.29
COMUNIDADES			
San Antonio Xalcuayo	1.95	51.5	188.49
Cañón de Tlamaya	1.15	41.83	153.10
<b>TOTAL</b>	<b>504.53</b>	<b>16,627.61</b>	<b>60,857.05</b>

1. Obtenido de multiplicar la cantidad de total de carbono por el factor de equivalencia 3.66

La inversión, en términos económicos, realizada para aplicar esta metodología de estimación del potencial de captura de carbono en un área a nivel local correspondieron a un mes de trabajo de gabinete a medio tiempo, considerando el tiempo empleado para fundamentar los pasos del diseño, aproximadamente \$12,000. El software utilizado y el equipo de cómputo se consideran costos fijos ya que cualquier persona interesada en realizar un proyecto forestal de carbono tendría que tener estos insumos invariablemente.

## 2.4. Discusión

Esta propuesta metodológica facilita la implementación de la NMX al ser replicable y costo-eficiente. El costo requerido para realizar esta estimación es menor al que implicaría realizar este mismo diagnóstico con trabajo de campo. Los resultados obtenidos permiten inferir la viabilidad en torno a la productividad esperada de una propuesta de proyecto forestal de carbono para su promoción e implementación a escala local.

A diferencia de otros estudios elaborados para determinar el potencial de captura de carbono, este trabajo incorpora el análisis de tres de los requerimientos básicos para la aplicación de la NMX: i) continuidad en las condiciones del suelo en los últimos cinco años, ii) derecho de la propiedad del predio iii) cumplimiento con la legislación y normatividad vigentes.

En la RPCX se han llevado a cabo dos estudios para identificar el potencial de captura de carbono del área. El *Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación en seis ANP como base para el monitoreo biológico y captura de CO<sub>2</sub>* (Mesomaya A.C., 2010), reportó estimaciones a nivel regional a partir de datos con base en una clasificación de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000 y valores estándar del IPCC por tipos de vegetación, sin considerar para el análisis las áreas no forestales. Estas características del estudio impiden que sus datos sean de utilidad para identificar áreas específicas para la implementación de un PFC a escala local con criterios de la Norma.

El otro estudio encontrado denominado *Determinación de acervos y potencial de carbono en la RPC Xilitla* (Balderas *et al.*,2014) realizó estimaciones totales de captura de carbono a nivel regional, a diferencia del anterior si se consideró una superficie de 6,820 ha de áreas no forestales (áreas agrícolas y pastizales) utilizando los mismos criterios de clasificación de vegetación y uso de suelo del estudio de Mesomaya A.C. (2010), las estimaciones del potencial de captura de carbono se calcularon con valores estándares del IPCC para sus tres niveles de confiabilidad (Tier1, Tier 2, Tier 3)<sup>4</sup> y fueron de 25,727, 5,989 y 13,895 tCO<sub>2</sub>eq/año

---

<sup>4</sup> Las Directrices del IPCC de 2007 reporta tres enfoques por nivel relacionados con los métodos usados en el sector AFOLU (IPCC,2007):

- Nivel 1 o Tier 1 es el método básico; están diseñados para ser los más sencillos de usar; las ecuaciones y los valores paramétricos por defecto (p.ej., factores de emisión y de cambio de reservas) para estos métodos, son suministrados por las directrices del IPCC.

- Nivel 2 o Tier 2 es el nivel intermedio; puede usar el mismo enfoque que el Nivel 1, pero se aplican los factores de cambio de existencias y de emisión que están basados en datos específicos de país o región, para las categorías de uso de la tierra o ganado más importantes y

respectivamente en esas áreas. Sus resultados son a nivel regional y no se consideran los criterios sociales de factibilidad que establece la norma. Los cálculos de potencial son regionales y no son comparables a los encontrados en este estudio debido principalmente a la consideración del reservorio de biomasa subterránea y las consecuentes diferencias metodológicas.

En la UNFCCC-COP12, como parte de la tercera comunicación nacional del inventario de emisiones de GEI por parte de México, se reportó un promedio en contenido de carbono en biomasa aérea de 52 MgC ha<sup>-1</sup> para bosques húmedos tropicales correspondientes a las selvas altas y medianas perennifolias, así como a los bosques mesófilos de montaña. Las áreas clasificadas como no forestales los rangos de carbono en biomasa variaban entre 6 y 19 MgC ha<sup>-1</sup> (De Jong *et al.*, 2010). En la presente investigación, la densidad más alta de carbono en biomasa estuvo en las selvas altas perennifolias con valores de 91 MgC ha<sup>-1</sup>, valores mínimos de 18 MgC ha<sup>-1</sup> y una media de 54.5 MgC ha<sup>-1</sup>. Las áreas consideradas como no forestales tuvieron un promedio de 14.67 MgC ha<sup>-1</sup>, ambos datos son congruentes con los valores presentados a nivel nacional.

En términos generales, la superficie no forestal de este estudio fue de 2,136 ha con un cálculo general de potencial de incremento de carbono en biomasa aéreo de 68,807 MgC que equivaldrían a 251,835 tCO<sub>2</sub>. Sin embargo, la estimación del potencial de captura de carbono es aún más compleja en regiones tropicales por la gran variabilidad de condiciones ecológicas, climatológicas, de suelo, topográficas y biogeográficas (Malhi *et al.* 2016) de los sitios donde se vaya a realizar el proyecto. Los factores que definen el potencial de captura de carbono son la tasa de incremento anual de biomasa y el periodo de tiempo del estudio o proyecto, que para esta investigación se asumió la restauración sería acorde al tipo de vegetación nativa y a largo plazo, sin embargo, en la práctica ambos criterios se deben definir en fases posteriores en acuerdo con las comunidades interesadas.

En este sentido a nivel internacional se reportan tasas de incremento de biomasa en bosques nubosos de montaña desde 21 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> a 1000 msnm hasta 9 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> a 3000 msnm en Perú (Malhi *et al.* 2016), tasas de incremento de biomasa de 10 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> a elevaciones de 1000 msnm y 4 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> a 2250 msnm por los primeros 5 a 7 años de regeneración

---

• Nivel 3 o Tier 3 es el más exigente en términos de complejidad y requisitos de datos, se usan métodos de orden superior, incluyendo modelos y sistemas de medición de inventarios adaptados a las circunstancias nacionales, repetidos en el tiempo, y dirigidos por datos de actividad de alta resolución, desagregados a nivel subnacional.

natural que disminuye a 1-2 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> después de los 12 a 15 años de regeneración en bosques nubosos de montaña en Ecuador (Spracklen y Righelato, 2016). En República Dominicana las tasas de incremento de biomasa en bosques húmedos son en promedio de 3.87 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> (Sherman *et al.*, 2012). Con estos datos asumimos que para nuestra área de estudio dependiendo la altitud del proyecto variara su tasa de incremento en biomasa.

En México Etchevers *et al.*, 2001 elaboró un estudio en bosques de liquidámbar en la Sierra norte de Oaxaca concluyendo que la vegetación de ladera alterada y secundaria tiene una tasa de incremento de biomasa total (aéreo y subterráneo) de 2.5 a 3 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> en los primeros 40 años, y la tasa de incremento de biomasa total en acahuales fue de 2.5 a 5 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. En las selvas y bosques secundarios tropicales de la región de los Tuxtlas Veracruz, Hughes *et al.*, en 1999 encontró que las tasas de acumulación de biomasa sobre el suelo oscilaban entre los rangos de 2.3 -18.3 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, esta variabilidad esta inversamente correlacionada con la duración del uso anterior de la tierra (área agrícola o pastizal). En la reserva de la biosfera en Calakmul, al sur de la Península de Yucatán Aryal *et al.*, 2014 reportaron tasas promedio de acumulación de biomasa sobre el suelo de 2.9-3.0 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> en bosques jóvenes de 4 a 10 años y menores tasas de 1.1-1.6 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> en bosques maduros de más de 35 años. Por lo tanto para las áreas elegibles las tasas de incremento de biomasa se definirán y variaran de acuerdo al tiempo que lleven siendo parcelas agropecuarias.

Entonces, las tasas de acumulación de biomasa arriba del suelo son variables y responden a la etapa sucesional en la que se encuentre el bosque después de su abandono (Hughes *et al.* 1999; Etchevers *et al.*, 2001; Aryal *et al.*, 2014; Malhi *et al.*, 2016). Para esta investigación, la tasa promedio utilizada para la estimación del potencial de incremento de carbono en biomasa aéreo de 1.6 MgC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> es congruente con las otras tasas reportadas, aunque técnicamente esta tasa será mayor en los primeros años de sucesión (Hughes *et al.* 1999; Etchevers *et al.*, 2001; Aryal *et al.*, 2014; Malhi *et al.*, 2016; Spracklen y Righelato, 2016) y una vez alcanzado su estado de equilibrio o madurez, el incremento se mantendrá (Figuroa-Navarro *et al.*, 2005). El uso de esta tasa sobre las áreas elegibles nos permite identificar un estimado del tiempo requerido para alcanzar el potencial estimado, y por lo tanto tener un primer horizonte de planeación del proyecto con datos conservadores.

Para definir el potencial que pudiera alcanzar cada área elegible, se consideró un incremento al 75% de la densidad de carbono arriba del suelo (AGDC) máxima registrada en el mapa de Cartus *et al.* 2014, según el tipo de vegetación forestal más cercano a cada polígono. Dichas áreas de influencia se obtuvieron a través de los polígonos de Thiessen, este método ha sido utilizado en el sector forestal para analizar variables que están intrínsecamente relacionadas a ciertas condiciones de espacialidad como edad de los rodales, tenencia de la tierra, e inclusive características fisionómicas como altura de las coronas en los arboles (Nelson *et al.*, 2004; Butler *et al.*, 2014 y Argamosa *et al.*, 2016).

En el área de estudio, cada área elegible presenta condiciones ambientales (factores abióticos) variadas, como de crecimiento (factores bióticos). Esta metodología resulta en un cálculo personalizado para cada área elegible, por ejemplo, un rodal podría estar inmerso en un área de influencia de selva mediana secundaria con un potencial de captura de 38 MgC ha<sup>-1</sup>, o dentro de un área de influencia de una selva alta con un potencial de 72 MgC ha<sup>-1</sup>. Según la literatura, el primer caso podría alcanzar su nivel óptimo en un periodo de 30-40 años, mientras que el segundo de 60-65 años (Aryal *et al.*, 2014; Etchevers *et al.*, 2001). Esto nos permite inferir que dicha restauración no sucederá en un mismo periodo de tiempo para todas las áreas elegibles.

En los bosques tropicales los periodos necesarios para que los reservorios de carbono arriba del suelo de un bosque secundario lleguen a niveles de un estadio primario se estima entre 73 y 85 años (Hughes *et al.*, 1999, Martin *et al.*, 2013, Spracklen y Righelato, 2016) o hasta 125 años (Aryal *et al.*, 2014) siempre que sean considerados los demás reservorios como es sotobosque, material leñoso muerto y hojarasca, y bajo condiciones de regeneración natural. Esto se debe a que las tasas de incremento anuales de biomasa no son lineales, sino que dependiendo del tipo de vegetación responden a diferentes modelos de crecimiento. Durante el proceso de restauración ocurren cambios asociados a las dinámicas de reclutamiento de nuevas especies las cuales disminuyen con el tiempo y la mortandad de árboles aumenta al cambiar el dominio de especies de madera blanda en las primeras etapas de sucesión al de dominancia de madera dura, explicando el largo tiempo requerido para recuperar las densidades de carbono previas a la perturbación (Aryal *et al.*, 2014). Con este fundamento en el presente estudio se estableció que el periodo mínimo para poder alcanzar esa densidad de carbono tendría que ser mayor a 20 años.

Por lo que para poder precisar el tiempo que tardará un área elegible en alcanzar su densidad como bosque maduro es necesario definir las condiciones particulares del sitio y aplicar alguna de las diferentes metodologías que permiten modelar el crecimiento del bosque en su conjunto desde diferentes puntos de vista i.e. empírico (ecuaciones alométricas) o fisiológico (modelos biofísicos) (Vanclay, 1994). En este sentido, los investigadores han desarrollado una serie de herramientas que permiten hacer estos cálculos considerando las especies involucradas y las características del potencial productivo del sitio. Algunos modelos que permiten hacer estas aproximaciones son el modelo estadounidense Forest Vegetation Simulator (FVS) (Crookston *et al.*, 2005), o el modelo canadiense Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) (Kurz *et al.*, 2009), o para el caso de selvas el modelo de Tropical Rain Forest Stand Table Projection (Vanclay, 1995).

Los retos a los que se enfrentó esta investigación fueron la falta de datos de campo que pudieran validar las estimaciones, aunada a la falta de insumos actualizados, ya que el mapa de densidad de carbono forestal en México fue generado en el 2014, pero como ya se ha dicho a lo largo de esta discusión, la biomasa es un indicador de la salud de los ecosistemas que se encuentra en constante cambio (DeVries *et al.*, 2015). La sugerencia para poder aplicar esta metodología es contar con un mapa de densidad de carbono aéreo forestal actualizado de manera periódica.

Respecto al uso de software, para alcanzar el objetivo de costo eficiencia, el uso y acceso gratuito a imágenes satelitales ha impulsado a su vez una serie de programas de código abierto. De forma que, aunque el proceso metodológico fue elaborado en IDRISI 17.1 y ArcMap 10.3, ambos software con licencia y de amplio uso en el sector académico, es recomendable se adapte esta metodología a un software de libre acceso como podría ser GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) un software SIG que puede soportar información tanto *raster* como vectorial, posee herramientas de procesado digital de imágenes y ofrece clasificación de imágenes de satélite y correcciones radiométricas; y QGIS que proporciona múltiples herramientas para llevar a cabo el análisis, tratamiento y explotación de *imágenes de satélite* en el campo de la Teledetección (Morales, 2018).

Finalmente, los datos obtenidos en esta investigación son estimaciones que permiten identificar los sitios precisos para la implementación de un proyecto forestal de carbono, calcular el potencial de captura de carbono que al utilizar la tasa promedio nacional de

incremento de carbono en biomasa nos puede orientar acerca del tiempo estimado para alcanzarlo, procurando que el resultado sea coherente a los parámetros de crecimiento de bosques tropicales secundarios ya descritos. Esta información nos orienta y permite la toma de decisiones con bases científicas y la posibilidad de futuras inversiones en PFC de este tipo.

## **2.5. Conclusiones**

La utilización de imágenes Landsat contribuye al diseño de una metodología costo eficiente al ser recursos gratuitos y con resoluciones funcionales a nivel local. Sin embargo, es indispensable trabajar de manera adecuada las imágenes satelitales para no sobre u subestimar la información generada y derivar en toma de decisiones mal fundamentadas. La metodología propuesta consta de dos etapas la primera permite identificar de manera local los sitios que cumplen los criterios establecidos en la NMX y la segunda etapa estima el potencial de captura de carbono viable de acuerdo con las condiciones reales de cada zona. Cada una de estas etapas consta de siete pasos que nos permitirá determinar la viabilidad de una propuesta de proyecto forestal de carbono a nivel local sin necesidad de invertir en levantamientos en campo para esta primera etapa de diagnóstico, sin embargo es preciso aclarar que la actividad de levantamiento de datos en campo sigue siendo indispensable para dar certeza a los cálculos en las etapas posteriores de diseño del proyecto forestal de carbono y las estimaciones propias de los rendimientos esperados. Al utilizar insumos disponibles a nivel nacional, la metodología es replicable y orientadora para la implementación de la Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015).

## 2.6. Literatura citada:

- Aguirre Salado.C.A. (2007). Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México. pp.25.
- Aguirre-Salado, C. A.; Trevino-Garza, E. J.; Aguirre-Calderón, O. A.; Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Miranda-Aragón, L., Valdez-Lazalde, J.R., Aguirre-Salado, A.I. & Sánchez -Díaz, G. (2012). Forest Cover Mapping in North-Central Mexico: A Comparison of Digital Image Processing Methods. *Giscience & Remote Sensing*, 49(6), 895-914.
- Aguirre-Salado C.A. (2013). Modelación geoespacial de variables de densidad forestal. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León, facultad de Ciencias forestales, Linares, Nuevo León, México. Pp.35
- Aguirre-Salado, C.A.; Soubervielle-Montalvo, C.; Miranda-Aragón, L.; Flores-Cano, J. A.; Méndez-Cortés, H.; Pompa-García, M.; y Reyes-Hernández, H. (2017). Improving identification of areas for ecological restoration for conservation by integrating USLE and MCDA in a GIS-environment: A pilot study in a priority region northern Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), doi: 10.3390/ijgi6090262
- Argamosa, R. J. L., Paringit, E. C., Quinton, K. R., Tandoc, F. A. M., Faelga, R. A. G., Ibañez, C. A. G., Posilero, M.A.V. y Zaragosa, G. P. (2016). Fully automated GIS-based individual tree crown delineation based on curvature values from a lidar derived canopy height model in a coniferous plantation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B8-563-2016
- Aryal, D. R., De Jong, B. H., Ochoa-Gaona, S., Esparza-Olguín, L., & Mendoza-Vega, J. (2014). Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, ecosystems & environment*, 195, 220-230.<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.06.005>.

- Balderas A., Ross D., Hernández J. C., de Alba H. (2014). *Estimación y valoración de los acervos y potencial de captura de carbono en cuatro áreas protegidas de la Sierra Madre Oriental*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. México.
- Butler, B. J., Hewes, J. H., Liknes, G. C., Nelson, M. D., y Snyder, S. A. (2014). A comparison of techniques for generating forest ownership spatial products. *Applied Geography*, 46, 21-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.09.020>
- Camacho-Sanabria, J. M., Pérez, J., Isabel, J., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., y Sánchez López, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y bosques*, 21(1), 93-112.
- Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., & Fuentes, J. M. (2014). A National, Detailed Map of Forest Aboveground Carbon Stocks in Mexico. *Remote Sensing*, 6(6), 5559. doi:10.3390/rs6065559
- Chazdon R.L., E. N. Broadbent, D. M. A. Rozendaal, F. Bongers, A. M. A. Zambrano, T. M. Aide, P. Balvanera, J. M. Becknell, V. Boukili, P. H. S. Brancalion, D. Craven, J. S. Almeida-Cortez, G. A. L. Cabral, B. de Jong, J. S. Denslow, D. H. Dent, S. J. DeWalt, J. M. Dupuy, S. M. Durán, M. M. Espírito-Santo, M. C. Fandino, R. G. César, J. S. Hall, J. L. Hernández-Stefanoni, C. C. Jakovac, A. B. Junqueira, D. Kennard, S. G. Letcher, M. Lohbeck, M. Martínez-Ramos, P. Massoca, J. A. Meave, R. Mesquita, F. Mora, R. Muñoz, R. Muscarella, Y. R. F. Nunes, S. Ochoa-Gaona, E. Orihuela-Belmonte, M. Peña-Claros, E. A. Pérez-García, D. Piotto, J. S. Powers, J. Rodríguez-Velazquez, I. Eunice Romero-Pérez, J. Ruíz, J. G. Saldarriaga, A. Sanchez-Azofeifa, N. B. Schwartz, M. K. Steininger, N. G. Swenson, M. Uriarte, M. van Breugel, H. van der Wal, M. D. M. Veloso, H. Vester, I. C. G. Vieira, T. V. Bentos, G. B. Williamson, L. Poorter, (2016). Carbon sequestration potential of second- growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 1-10. doi: 10.1126/sciadv.1501639

- Chicas, S. D., Omine, K., & Saqui, P. (2016). CLASlite algorithms and social surveys to assess and identify deforestation and forest degradation in Toledo's protected areas and forest ecosystems, Belize. *Applied Geography*, 75, 144-155.
- CONAFOR. (2015). Cartografía de los recursos forestales 1:50 000 municipio de Xilitla y Aquismón, Inventario Estatal Forestal y de Suelos – San Luis Potosi 2014. SEMARNAT-CONAFOR.
- Crookston, N. L., & Dixon, G. E. (2005). The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(1), 60-80., doi:10.1016/j.compag.2005.02.003
- De Jong, B., Anaya, C., Masera, O., Olguín, M., Paz, F., Etchevers, J., Martínez, R.D., Guerrero G., y Balbontín, C. (2010). Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1689-1701. doi:10.1016/j.foreco.2010.08.011
- DeVries, B., Verbesselt, J., Kooistra, L. y Herold, M. (2015). Robust Monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 161, 107-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.012>
- DOF. (15 de Junio de 2015). *Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-173-scfi-2015.pdf>
- Etchevers, J., Acosta, M., Monreal, C., Quednow, K., & Jiménez, L. (2001, November). Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales* (Vol. 18).
- Figueroa-Navarro, C., Etchevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Acosta-Mireles, M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 57-64.

- François Mas, J., Reyes Díaz-Gallegos, J., & Pérez Vega, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones geográficas*, (51), 53-72.
- Franklin, S. E. (2001). *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Boca Raton, Fla: CRC Press.
- Gebhardt, S., Wehrmann, T., Ruiz, M.A.M., Maeda, P., Bishop, J., Schramm, M., Kopeinig, R., Cartus, O., Kellndorfer J., Ressler, R., Santos, L.A. y Schmidt M. (2014). MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing*, Vol 6, Iss 5, Pp 3923-3943 (2014), (5), 3923. doi:10.3390/rs6053923
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045023
- Gitta. 2013. Thiessen Polygon. Geographic Information Technology Training Alliance. [http://www.gitta.info/Accessibilit/en/html/UncProxAnaly\\_learningObject4.htm](http://www.gitta.info/Accessibilit/en/html/UncProxAnaly_learningObject4.htm)
- Gizachew, B., Solberg, S., Næsset, E., Gobakken, T., Bollandsås, O. M., Breidenbach, J., Zahabu, E. & Mauya, E. W. (2016). Mapping and estimating the total living biomass and carbon in low-biomass woodlands using Landsat 8 CDR data. *Carbon balance and management*, 11(1), 13. doi: 10.1186/s13021-016-0055-8
- Herold, M., y Johns, T. (2007). Linking requirements with capabilities for deforestation monitoring in the context of the UNFCCC-REDD process. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045025. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045025
- Hughes, R. F., Kauffman, J. B., & Jaramillo, V. J. (1999). Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology*, 80(6), 1892-1907. <http://www.jstor.org/stable/176667>

- INECC y SEMARNAT. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing Of Environment*, 122(Landsat Legacy Special Issue), 11-21. doi:10.1016/j.rse.2011.08.026
- Kelsey, K. C., y Neff, J. C. (2014). Estimates of Aboveground Biomass from Texture Analysis of Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 6(7), 6407-6422
- Kim, D., Sexton, J., Noojipady, P., Huang, C., Anand, A., Channan, S., & ... Townshend, J. (2014). Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000. *Remote Sensing Of Environment*, 155178-193. doi:10.1016/j.rse.2014.08.017
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., White, T. M., Stinson, G., Shaw, C. H., Rampley, G. J., Smyth C., Simpson B.N, Neilson E.T., Trofymow J.A., Apps M.J. & Metsaranta, J. (2009). CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological modelling*, 220(4), 480-504., doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018
- Lu D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12):2509–25. doi: 10.1080/01431160500142145
- Lui, G.V. y Coomes, D. A. (2015). A Comparison of Novel Optical Remote Sensing-Based Technologies for Forest-Cover/Change Monitoring. *Remote Sensing, Vol 7, Iss 3, Pp 2781-2807 (2015)*, (3), 2781. doi:10.3390/rs70302781
- Malhi, Y., Girardin, C. A., Goldsmith, G. R., Doughty, C. E., Salinas, N., Metcalfe, D. B., Huasco W.H., Silva-Espejo J.E., Aguilla-Pasquell J., Amezquita F.F., Aragão, L. E., Guerrieri R., Yoko F.I., Bahar N.H.A., Farfan-Rios W., Phillips O.L., Meir P. y Silman M. (2017). The variation of productivity and its allocation along a tropical elevation gradient:

- a whole carbon budget perspective. *New Phytologist*, 214(3), 1019-1032. doi: 10.1111/nph.14189
- Martin, P. A., Newton, A. C., & Bullock, J. M. (2013). Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests. *Proc. R. Soc. B*, 280(1773), 20132236. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.2236>
- McRoberts, R.E. 2008. Using satellite imagery and k-nearest neighbors technique as a bridge between strategic and management forest inventories. *Remote Sensing Environment*. 112:2212-2221. doi: 10.1016/j.rse.2007.07.025
- Mesomaya A.C. y Comisión Nacional para las Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2010). "Iniciativa de México para la protección del clima en el Corredor ecológico Sierra Madre Oriental y en las lagunas costeras Laguna Madre y Marismas Nacionales" (Cambio Climático en ANP's). Informe final. Producido por ASERCA-CONANP. México. 197 pág. Disponible en línea: [http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/TTH/LMadre\\_Marismas\\_Zicuiran\\_Atanchipa/LMadre\\_Marismas\\_Zicuiran\\_ATanchipa\\_TTH.pdf](http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/TTH/LMadre_Marismas_Zicuiran_Atanchipa/LMadre_Marismas_Zicuiran_ATanchipa_TTH.pdf)
- Morales Aurelio, 2018 Mayo 9, 16 programas gratuitos para trabajar con imágenes de satélite, <https://mappinggis.com/2017/12/programas-gratuitos-para-trabajar-con-imagenes-de-satelite/>
- Nelson, T., Boots, B., Wulder, M., & Feick, R. (2004). Predicting forest age classes from high spatial resolution remotely sensed imagery using Voronoi polygon aggregation. *Geoinformatica*, 8(2), 143-155.
- Pechanec, V., Stržínek, F., Purkyt, J., Štěřbová, L., & Cudlín, P. (2017). Carbon stock in forest aboveground biomass – comparison based on Landsat data, *Central European Forestry Journal*, 63(2-3), 126-132. doi: <https://doi.org/10.1515/forj-2017-0014>
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., y Ohmann, J. L. (2010). Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with

Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114(5), 1053-1068.

Reyes, H.H., Galarza R.E., Torres D.E.G., Sahagún S.F.J., de Nova V.J.A. (2016) Proyecto de fortalecimiento de las acciones de restauración del bosque de niebla en la RPC Xilitla. Programa de conservación de especies en riesgo (PROCER) 2016 Región noreste y Sierra Madre Oriental. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). México.

Rizvi, R.H., Newaj, R., Jain, A.K., Chaturvedi, O.P., Prasad, R., Alam, B., Handa, A.K., Sangram Ch., Maurya, A., Karmakar, P.S., Saxena, A. y Gupta, G. (2016). Challenges in agroforestry mapping for carbon sequestration through remote sensing and CO2 Fix model in Guna district. *Indian Journal of Agroforestry*, 18 (1): 58-62.

Ruiz D.C, Rodríguez O.G., Leyva L.J.C y Enríquez V.J.R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12 (1): 28-45.

Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E. Painter, T.H. Dangel, S. and Martonchik, J.V. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing- definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*. 103:27-42. doi: 10.1016/j.rse.2006.03.002

Shimizu, K., Ota, T., Mizoue, N., y Yoshida, S. (2018). Assessments of preprocessing methods for Landsat time series images of mountainous forests in the tropics. *Journal of Forest Research*, 1-10. doi:10.1080/13416979.2018.1434034

Sherman, R. E., Fahey, T. J., Martin, P. H., & Battles, J. J. (2012). Patterns of growth, recruitment, mortality and biomass across an altitudinal gradient in a neotropical montane forest, Dominican Republic. *Journal of Tropical Ecology*, 28(5), 483-495.

Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2016). Carbon storage and sequestration of re-growing montane forests in southern Ecuador. *Forest Ecology and Management*, 364, 139-144.

- Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10), 2741-2754. doi:10.5194/bg-11-2741-2014
- Steininger, M. K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1139-1157.
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., Bewket, W., Wenningerm, J., y B. Simane, (2010). The Use of Remote Sensing to Quantify Wetland Loss in the Choke Mountain Range, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 (12) 2415–2428 doi:10.5194/hess-14-2415-2010
- Torres-Rojas, G., Romero-Sánchez, M.E., Velasco-Bautista, E., y González-Hernández, A. (2016). Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota / Forest parameter estimation in conifer forests using remote sensing techniques. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (36), 7-24.
- Toutin, T. (2004). Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*. 25(10):1893-1924. doi: 10.1080/0143116031000101611
- Valdez-Lazalde, J., González-Guillén, M.J. y de los Santos-Posadas H. (2006). Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución/ Tree Crown cover estimation using high resolution multispectral satellite images. *Agrociencia* 40(3): 383–394.
- Vanclay, JK 1994, Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests, CAB International, Wallingford, UK.
- Vanclay, J.K., 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. *Forest Science* 41:7-42.

Watson, R., I. Noble, B. Bolinet et al. (2000). *IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Cambridge, IPCC: 377

Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920-932. doi: 10.1002/ecy.1730

Zhu, X.L., Liu, D.S. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102:222–3. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014

### **Capítulo 3. Implementación de la Norma Mexicana del Carbono en la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla.**

#### **Resumen:**

En este trabajo se analizó la implementación de la Norma mexicana del carbono NMX-AA-173.SCFI-2015, en el ejido Ollita del Pino, situado en la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla RPCX. Este ejido tiene una superficie elegible de 83 ha y una estimación de potencial de captura de carbono de 10,061 TCO<sub>2</sub> a largo plazo (≥ 20 años). Para ello, en una primera etapa se realizó un taller participativo para presentar el proyecto forestal de carbono con fines de restauración forestal y con un cálculo de beneficios económicos estimados de \$1,171 ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>. Posteriormente se realizaron encuestas para comprobar el consentimiento pleno, libre e informado (CPLI) de los ejidatarios para participar en el proyecto, tal como lo señalan las salvaguardas establecidas por la norma. La propuesta no despertó el interés en los ejidatarios, la causa principal de rechazo fue la incertidumbre de convertir el actual uso de suelo de sus parcelas a áreas nuevamente forestales y sacrificar la actual seguridad alimentaria que mantienen. Otros factores que influyeron en esta decisión fue la escasa presencia de organismos gubernamentales y no gubernamentales para apoyar la iniciativa, la falta de recursos económicos e inversores que brinden certeza para el capital semilla requerido y la falta de información y difusión que aún se tiene de este tipo de proyectos de captura de carbono y su mercado.

**Palabras clave:** Norma NMX-AA-173.SCFI-2015, proyectos forestales de carbono, captura de carbono, restauración forestal, planeación comunitaria, Salvaguarda CPLI.

### 3.1 Introducción

Los Proyectos Forestales de Carbono (PFC) en México adquieren una mayor relevancia debido a las políticas públicas actuales que impulsan un sistema de comercio de emisiones de carbono nacional a través de la implementación del impuesto sobre los combustibles fósiles y el actual ejercicio de proyección de mercado de carbono. A finales del 2017, entró en vigor un reglamento que establece las reglas para el uso de créditos de reducción de emisiones (CRE) para el dar cumplimiento a estas nuevas normativas. Dicha regulación permite el uso de CRE provenientes de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en México, así como aquellos elegibles para el uso en la Unión Europea (World Bank y Ecofys, 2018).

La mayoría de los estándares voluntarios internacionales que respaldan los CRE incluyendo el MDL conllevan altos costos desde su planificación e implementación (BioCF World Bank Group 2017; Plan Vivo, 2016). En el 2017 se certificó el primer proyecto en México elaborado con el protocolo forestal para México de la Reserva de Acción Climática (CAR), en la comunidad de San Juan Lachao Pueblo Nuevo, siendo la primera comunidad en realizar la venta de bono de carbono en el mercado voluntario internacional a la ciudad de Palo Alto, California. Los costos necesarios para el registro del proyecto y la primera verificación anual fueron alrededor de \$400,000.00 cuatrocientos mil pesos (*comunicación personal ICICO*), aun siendo que el organismo verificador del Protocolo Forestal para México es la Asociación Nacional de Normalización y Certificación A.C. (ANCE) el cual es el único organismo acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) para la certificación de la norma NMX-AA-143-SCFI-2015, la cual certifica el manejo sustentable de los bosques (CAR, 2017). Con este ejemplo, podemos ver el nivel de insipiente que actualmente tiene el mercado de carbono en el sector forestal en México, de cara al nuevo sistema de comercio de emisiones que actualmente está en su fase piloto.

En 2015 se decretó la Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono NMX-AA-173-SCFI-2015, que pretende facilitar la incursión en este tipo de proyectos a propietarios bajo cualquier régimen de propiedad interesados en implementar proyectos forestales de carbono. A tres años de su publicación, en México aún no hay proyectos registrados bajo esta Norma. Algunas hipótesis son la falta de metodologías propias para su implementación, la escasa oferta de

prestadores profesionales especializados y los altos costos para identificar y diagnosticar las áreas potenciales para su implementación. A esta complejidad se suma el establecimiento de salvaguardas sociales y ambientales que deben cumplirse.

Las salvaguardas sociales deben garantizar la atención, participación y la mejora en las condiciones de grupos específicos y vulnerables, respetando sus procesos internos de gobernanza, usos y costumbres y derechos de los propietarios de bosques y selvas. La primera salvaguarda social es el Consentimiento previo, libre e informado (CPLI) (DOF, 2015). El CPLI es el principio según el cual un pequeño propietario o una comunidad tiene derecho a otorgar o no su consentimiento a proyectos propuestos que podrían afectar a la tierra que poseen, ocupan o utilizan de alguna otra manera, una vez que hayan adquirido una comprensión plena y exacta de las consecuencias del proyecto (Plan vivo, 2016).

Para alcanzar esta comprensión plena, es necesario la participación comunitaria, en la toma de decisiones, identificación conjunta de los problemas o necesidades y la búsqueda de alternativas de solución. La primera etapa es el proceso formativo e informativo, donde la educación ambiental es clave, donde se decide la organización y estructuración de planes concretos de gestión (Elaine *et al.*, 2014).

Desde 1980 cuando se comenzó a popularizar el término de *participación local*, han surgido diversas técnicas participativas que abarcan una amplia variedad de enfoques, instrumentos y métodos. Algunas técnicas participativas son empleadas para reunir información y otras pretenden promover la participación de las personas (Jackson e Inglés, 2004). Ejemplos de ello, son el Diagnóstico Rural Participativo (DRP), empleado para aumentar la concientización individual de los problemas de manejo de recursos y el Desarrollo Participativo de Planes de Acción (DPPA), por su parte buscan la construcción de consenso para aumentar la concientización colectiva sobre los problemas, conduciendo a una acción colectiva que permita solucionarlos (Elaine *et al.*, 2014).

Estas técnicas han sido utilizadas en algunos ejidos beneficiados por el programa nacional de Pago por Servicios Ambientales (PSA) promovido por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) mediante elaboración de Ordenamientos Territoriales Comunitarios y Planes de desarrollo integral como requisitos para mantener el subsidio. Como resultado se ha identificado a necesidad de atraer proyectos productivos acordes a la vocación forestal del

mismo. En la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla (RPCX) existen varios ejidos que reúnen los criterios básicos para la implementación de la NMX-AA-173.SCFI-2015.

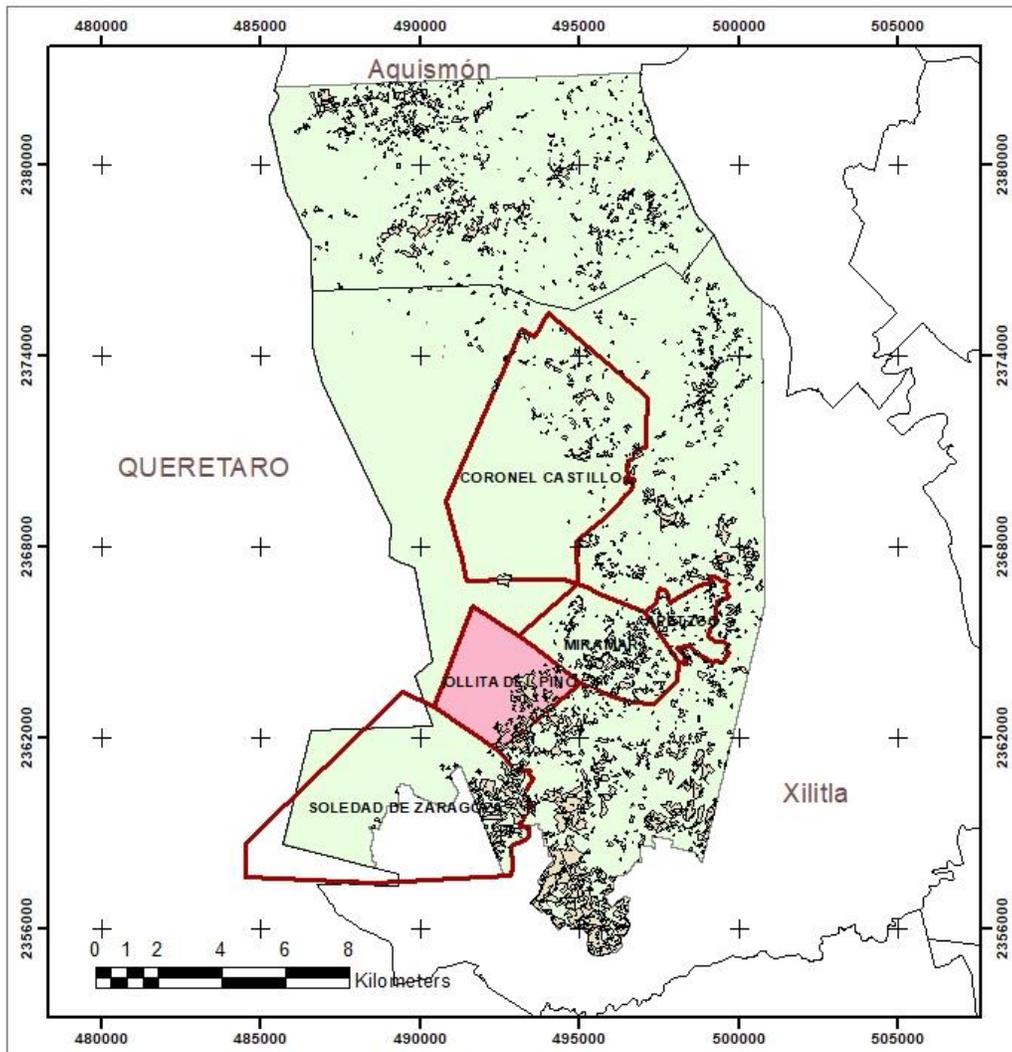
El objetivo de este estudio es documentar el proceso de implementación de la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015 a través del uso de metodologías participativas considerando todos los criterios y principios enunciados en la Norma y proponer una guía de acción que facilite y promueva su uso mediante la utilización de la técnica de Valoración Rural Participativa (VRP); es una técnica utilizada cuando se necesita que la población local adquiera poder para manejar sus recursos naturales ya que trata de catalizar la capacidad local para abordar problemas locales (Jackson e Inglés, 2004).

## **3.2 Materiales y métodos:**

### **3.2.1. Área de estudio:**

La "Región Prioritaria para la Conservación Xilitla" (RPCX), es un área bajo decreto de Reserva forestal desde el año de 1923, con una superficie de 29,885 ha localizada al sureste del estado de San Luis Potosí, México. Esta área ha perdido más del 70% (19,024 ha) de su superficie boscosa original. Actualmente el área ocupada por los cuatro tipos de bosque presentes (encino, oyamel, pino y mesófilo) asciende a 7,991 ha y las selvas ocupan 2,870 ha (Reyes H.H. *et al.*, 2016).

Mediante la interpretación y análisis de imágenes de satélite Landsat 8 AOL de abril del 2011 y 2017, se identificaron 504.53 ha dentro de la RPCX que cumplen con los criterios establecidos en la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015: i: áreas no forestales en los últimos 5 años y ii: libres de litigio. Los cinco ejidos que agrupaban la mayor superficie con condiciones de elegibilidad fueron: Soledad de Zaragoza (162 ha), Miramar (124 ha) Ollita del Pino (83 ha), Coronel Castillo (66 ha) y Apetzco (24 ha).



**Simbología**

Áreas elegibles NMX

Limite de la RPCX

**Ejidos elegibles**

Apetzco

Coronel Castillo

Miramar

Ollita del pino

Soledad de Zaragoza

Municipios SLP

Escala: 1:176,024

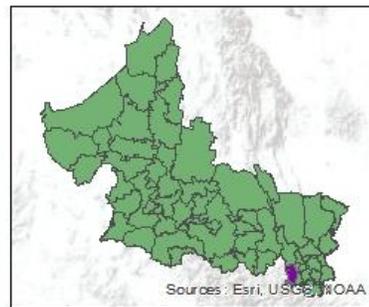


Figura 3.1. Ejidos con superficies considerables de áreas elegibles para la implementación de la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015 en la RPCX.

### 3.2.1.1. Selección del sitio:

La selección del sitio se basó en cuatro criterios principales: 1. Conocimientos previos sobre Pago por Servicios Ambientales y sus alcances, 2. Participación local y condiciones de gobernanza, 3. Superficie elegible y 4. Trabajo previo con la UASLP en la RPCX (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Criterios aplicados para la selección del ejido.

Ejido	Participación previa en PSA	Condiciones aptas de gobernanza	Cantidad considerable de superficie elegible	Interés y trabajo previo con la UASLP	Total
Soledad De Zaragoza		X	X		2
Miramar			X		1
Ollita del pino	X	X	X	X	4
Coronel Castillo	X	X		X	3
Apetzco		X			1

A partir de estos criterios se eligió el ejido Ollita del Pino, el cual tiene una superficie de 1,144.06 ha, de las cuales 811.67 ha corresponden a áreas de uso común en buen estado de conservación con predominancia del bosque mesófilo de montaña y bosque de pino-encino. La altitud del sitio oscila entre los 1,100 y 2,500 m. Las actividades económicas son la agricultura de subsistencia y la ganadería. Entre los principales cultivos destacan café cereza y naranja. La superficie forestal, 61% del ejido es dedicada a la conservación a través del PSA (PROFORESTAL, 2015). Este ejido se integra por cuatro comunidades: Ollita del Pino, El Rincón de Zacatipa, el Cedral y la Ciénaga. De acuerdo al último 2010 existe una población de 587 habitantes, 57% mujeres y 43% hombres.

### 3.2.2. Talleres participativos:

La técnica utilizada para cumplir con el objetivo planteado fue la Valoración Rural Participativa, la cual implica el aprendizaje conjunto con la población local con el fin de que ésta aprenda a analizar, planificar, resolver conflictos, tomar medidas, monitorear y evaluar según una agenda local. Los instrumentos comunes de VRP incluyen desarrollar relación,

clasificar, gráficos de tiempo, caminatas semi-estructuradas, cartografía participativa, uso participativo de fotografías, reuniones de grupo y talleres y observación directa (Jackson e Inglés, 2004).

El proceso de implementación comenzó con la obtención del Consentimiento pleno libre e informado (CPLI) de la población. Para ello, se realizó un primer taller participativo para informar a los habitantes conceptos y definiciones clave de los PFC en un contexto de mitigación al cambio climático. También se incluyeron las oportunidades y beneficios económicos (bonos de carbono) y ambientales (restauración forestal) del proyecto así como los riesgos del proyecto y obligaciones de los participantes. Otros temas contemplados fue la relevancia del servicio ambiental de captura de carbono, requerimientos para la realización de un proyecto forestal de carbono, en que consiste el enfoque de incremento en los reservorios de carbono, las actividades de restauración que contempla la norma mexicana, los tiempos estimados de duración del proyecto y los beneficios económicos del mismo.

El objetivo de este taller fue involucrar a los posibles beneficiarios dentro del proceso de diseño del proyecto y comenzar con el fortalecimiento de sus capacidades autogestoras.

Se realizó un ejercicio de cartografía participativa para la identificación de las áreas elegibles a nivel parcela, donde se lograron identificar los rasgos más distintivos de la comunidad y sus localidades. Para la identificación de parcelas participantes se requirió en un principio los planos originales del PROCEDE proporcionados por ellos mismos y posteriormente se corroboró con la información digitalizada de la base de datos del Laboratorio de SIG y PR de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades de la UASLP.

### **3.2.2.1. *Proyección económica del proyecto:***

Con la intención de facilitar la comprensión y dimensión del proyecto, se elaboró una proyección económica, la cual se refiere al cálculo de los ingresos potenciales a recibir con la implementación del PFC, a partir de los siguientes supuestos:

1. La restauración forestal elegida es acorde al tipo de vegetación nativa circundante a las parcelas, que en este caso corresponde al Bosque Mesófilo de Montaña.

2. La tasa de crecimiento promedio nacional para la biomasa aérea en un Bosque Húmedo Tropical es de 1.6 MgC/ha/y (*De Jong et al.*, 2010).
3. La tasa de crecimiento anual de biomasa aérea es la misma para todos los años, por lo tanto, el potencial de captura de CO<sub>2</sub> anual es igual durante todo el proyecto.
4. El precio del CER se mantiene igual durante todo el periodo del proyecto en promedio \$10 USD, o su equivalente actual en \$200.00 pesos/ TonCO<sub>2</sub>eq.

Por último, se comentó que en base a la selección de actividades de restauración elegidas, plantaciones maderables comerciales, reforestación con árboles frutales y maderables, sistemas agroforestales asociados al café o sistemas silvopastoriles con cercos vivos forrajeros (CONAFOR, 2010); se debía adecuar la proyección económica del proyecto.

### **3.2.3. Encuestas semi-estructuradas:**

Un requisito indispensable para cualquier proyecto forestal de carbono es la demostración del CPLI por parte de los beneficiarios potenciales (McFarland, 2018). Para poder evaluarlo se aplicaron 21 encuestas semi-estructuradas a ejidatarios con áreas elegibles de los cuales 12 asistieron al primer taller participativo.

Las encuestas semi-estructuradas se diseñaron para conocer las características de edad, la escolaridad, la ocupación, el uso actual de suelo, las características de los sistemas de producción, los ingresos anuales, las opiniones personales sobre la participación en un Proyecto Forestal de Carbono, las fortalezas y debilidades desde la perspectiva local, entre otros aspectos. Los motivos para aprobar o rechazar la decisión de implementar un PFC se sistematizó a través de la información obtenida por las encuestas realizadas. Los datos obtenidos fueron capturados en una base de datos para su posterior análisis descriptivo. Con esto se identificaron patrones de respuesta, tendencias e información para obtener una mejor comprensión del entorno social, económico y cultural del sitio.

El número total de beneficiarios potenciales fue de 83 personas, para las entrevistas se consideró una muestra del tamaño del 25%, es decir 21 entrevistas.

### 3.3. Resultados

A partir de la bibliografía consultada sobre otros estándares para la certificación de proyectos forestales de carbono, se elaboró un programa de planeación para ejecutar el proceso de implementación de la Norma y cumplir con todas las salvaguardas establecidas en la misma con el siguiente orden (Figura 3.2):

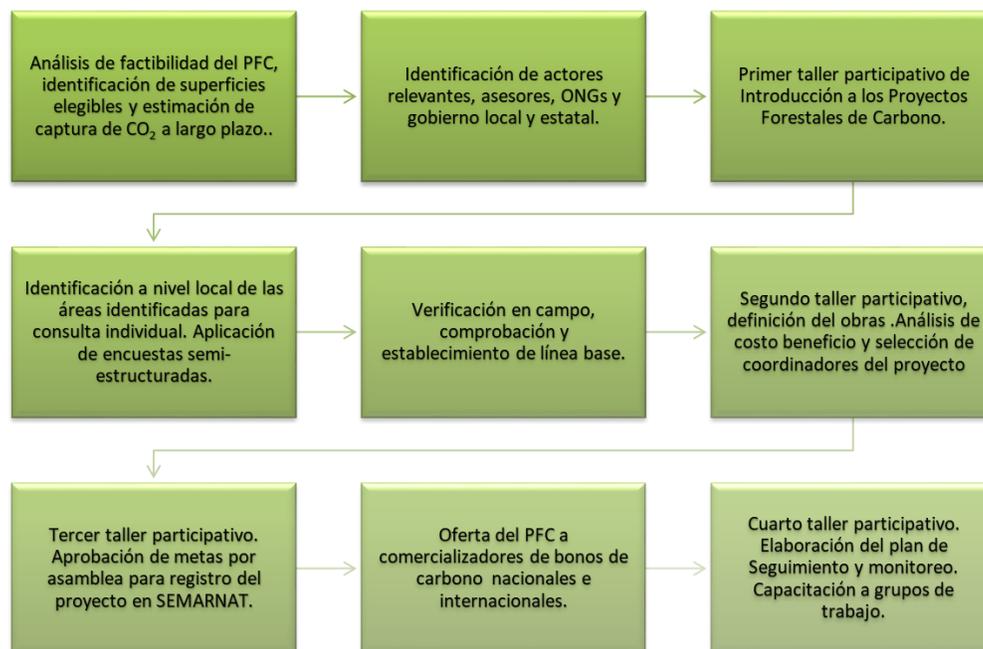


Figura 3.2. Proceso de implementación de la Norma mexicana NMX-AA-173.SCFI-2015

Con el ejido Ollita del pino solo se ejecutó hasta la cuarta actividad, dado que los participantes de manera inesperada decidieron no continuar con el proyecto, ejerciendo su derecho de decisión bajo la salvaguarda de CPLI.

#### 3.3.1. Taller participativo:

Al primer taller de Introducción a los PFC asistieron 27 ejidatarios de los cuales 24 contaban con parcelas en las áreas elegibles identificadas previamente. Durante el taller se explicó un ejercicio simple de proyección económica con la finalidad de motivar y despertar el interés en los participantes.

Con base en los criterios que establece la Norma, el ejido Ollita del Pino cuenta con 83 ha de superficie elegible que tienen en conjunto un potencial de captura de carbono de 10,061 TonCO<sub>2</sub>. Considerando una tasa de crecimiento de carbono en biomasa anual de bosques húmedos tropicales de 1.6 MgC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, se estima un potencial de captura de carbono anual de 490 TonCO<sub>2</sub>. El precio promedio es de 10 USD/ TonCO<sub>2</sub>, alrededor de \$200.00 pesos, la ganancia anual calculada sería de \$98,000.00 pesos, a un plazo de 20 años. Por lo tanto el valor total del proyecto sería aproximadamente de \$ 2,012,000.00 pesos (Cuadro 3.3.).

Cuadro 3.2. Proyección de ingresos económicos del proyecto.

Ejidos	Superficie elegible (ha)	Potencial de incremento de biomasa aérea (Mg) <sup>1</sup>	Potencial de captura de CO <sub>2</sub> (Ton) <sup>2</sup>	Años necesarios, a una tasa de 1.6 MgC/ha/y <sup>3</sup>	Potencial de incremento de biomasa aérea anual (Mg/y) <sup>4</sup>	Potencial de captura de CO <sub>2</sub> anual (Ton/y) <sup>5</sup>	Ingreso potencial por captura de CO <sub>2</sub> (Ton/y) anual en pesos <sup>6</sup>	Ingreso potencial por captura de CO <sub>2</sub> (Ton) total en pesos <sup>7</sup>
Soledad De Zaragoza	162.57	5,352.58	19,590.44	20.57824533	260.11	952.00	190,399.55	3,918,088.56
Miramar	124.31	3,829.16	14,014.73	19.25207143	198.90	727.96	145,591.87	2,802,945.12
<b>Ollita del pino</b>	<b>83.68</b>	<b>2,749.09</b>	<b>10,061.67</b>	<b>20.53196792</b>	<b>133.89</b>	<b>490.05</b>	<b>98,009.79</b>	<b>2,012,333.88</b>
Coronel Castillo	66.05	2,475.57	9,060.59	23.42395307	105.69	386.81	77,361.72	1,812,117.24
Apetzco	23.84	725.19	2,654.20	19.01329636	38.14	139.60	27,919.36	530,839.08

<sup>1</sup> Potencial de incremento de biomasa aérea en Mg, resultado de la metodología descrita en el capítulo 2.

<sup>2</sup> Potencial de captura de carbono en Ton de CO<sub>2</sub>eq, obtenido de multiplicar la cantidad de total de biomasa por el factor de equivalencia 3.66.

<sup>3</sup> Considerando la tasa de crecimiento de 1.6 MgC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> (De Jong et al., 2010) en bosques húmedos tropicales; y= (Potencial de incremento de biomasa aérea/superficie elegible)/1.6

<sup>4</sup> Potencial de incremento de biomasa aérea anual= Potencial de incremento de biomasa aérea/ No. de años necesarios.

<sup>5</sup> Potencial de captura de CO<sub>2</sub> anual=Potencial de incremento de biomasa aérea anual\* factor 3.66.

<sup>6</sup> Ingreso potencial de captura de CO<sub>2</sub> anual= Potencial de captura de CO<sub>2</sub> anual \* \$200.00 pesos (aprox. 10 USD)

<sup>7</sup> Ingreso potencial de captura de CO<sub>2</sub> total= Potencial de captura de CO<sub>2</sub> \* \$200.00 pesos (aprox. 10 USD)

En el ejercicio de cartografía participativa cuyo objetivo fue la identificación de las áreas elegibles, los ejidatarios identificaron que las áreas elegibles se encontraban en sus parcelas (Figura 3.3) y se acordó entregar un listado detallado con los ejidatarios involucrados y su superficie individual, para lo cual se utilizó la información obtenida en el ejercicio y la capa de información geográfica de tenencia del ejido (Figura 3.4), de ahí resulto un listado de 83 ejidatarios, el cual fue entregado previo a la quinta etapa del proceso de implementación (Figura 3.2).



Figura 3.3. Imagen satelital utilizada durante el ejercicio de cartografía participativa.

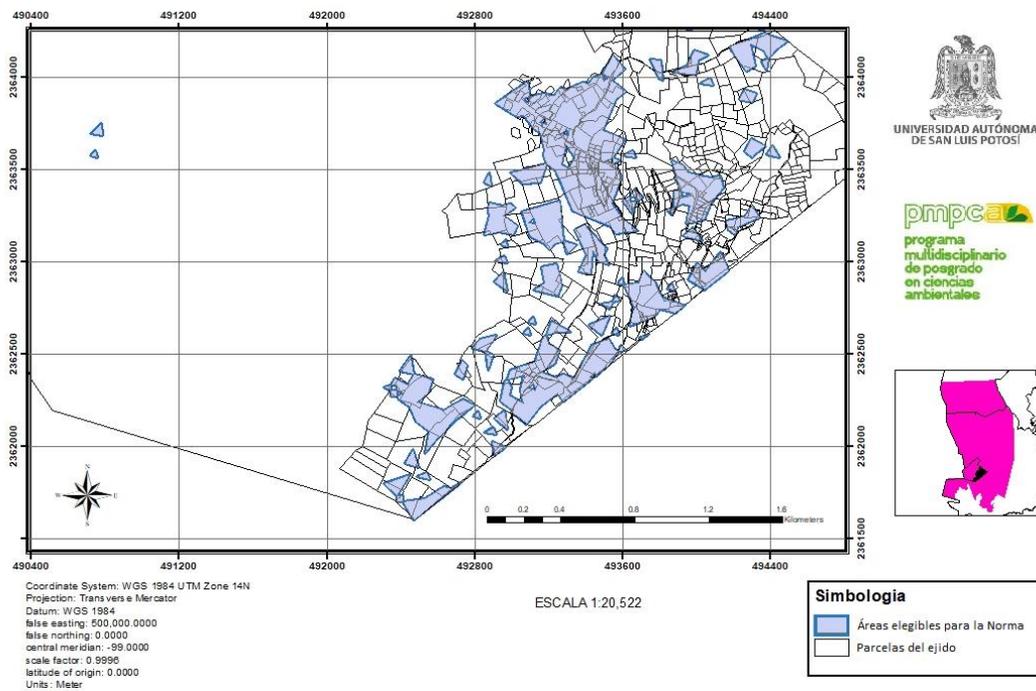


Figura 3.4. Determinación de posibles beneficiarios, identificación individual por parcela y superficie con SIG.

La superficie de 83 ha de área elegible se distribuyó de la siguiente manera: 3 ha de brechas y caminos, 3 ha de tierras de uso común, 10 ha de solares, 67 ha de parcelas agrícolas de temporal. Las 67 ha de parcelas pertenecen a 83 ejidatarios, el tamaño promedio de parcela es de 0.75 ha.

Se les entregó un listado con el detalle de parcela y superficie, esta información resultó diferente a la que ellos esperaban, ya que siempre habían asociado los proyectos de conservación y restauración en las áreas de uso común. La implicación de parcelas agrícolas y pecuarias no fue atractivo para los posibles beneficiarios.

### **3.3.2. Obtención del Consentimiento pleno, libre e informado (CPLI)- Entrevistas semi-estructuradas:**

Una vez socializada la lista de beneficiarios potenciales se realizaron entrevistas semi-estructuradas a 21 personas, de las cuales 12 habían asistido al primer taller. Con el objetivo de identificar qué circunstancias fueron las que influyeron para tomar la decisión de rechazar el proyecto, siendo que la mayoría (60%) de los participantes en el primer taller había mostrado entendimiento del tema. Al cuestionamiento sobre qué temas consideraban hubiese sido necesario abordar de forma más detallada, los entrevistados sugirieron los temas de costo/beneficio del proyecto, actividades elegibles y proyectos productivos asociados (Figura 3.5).

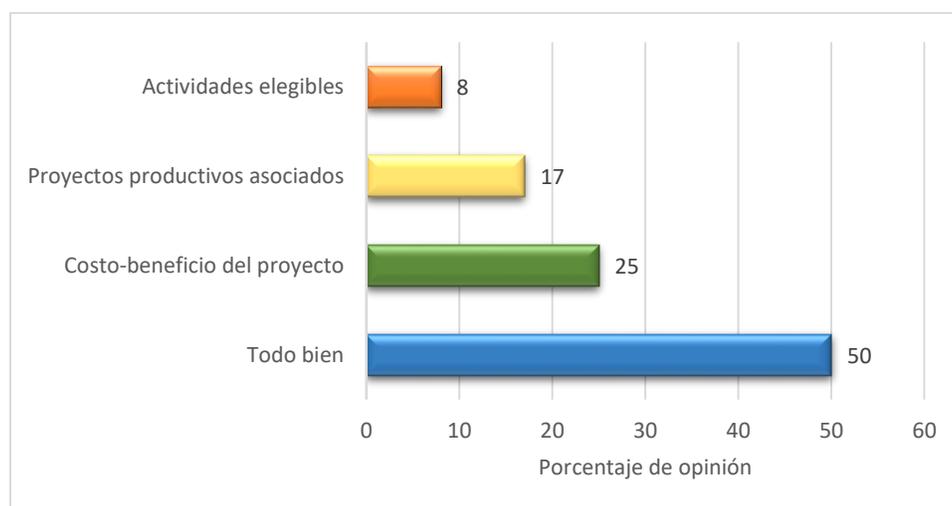


Figura 3.5. Porcentaje de opinión sobre temas para el mejoramiento del primer taller participativo.

La mayoría de los ejidatarios son mayores de 50 años con un nivel básico de educación primaria. El tamaño de la superficie promedio que estaría involucrada en el proyecto es de 0.75 ha por beneficiario. Sus principales actividades económicas son la producción de maíz para autoconsumo y algunos otros cultivos como frijol, hortalizas y café para venta. Solo una cuarta parte de los encuestados se dedica a la ganadería, esta actividad registra ingresos anuales entre 20,000 y 60,000 pesos por venta de productos a nivel local. Esta situación refleja una necesidad económica en la mayoría de las familias encuestadas, lo que les impide comprometerse con los trabajos requeridos para este proyecto al no contar con recursos para invertir en el pago de jornales y carecer de fuentes de ingreso fijas.

El 90% de los encuestados manifestó no tener interés en participar en el proyecto, solo un 10% se mostró indeciso. La causa principal es que prefieren mantener el uso de la milpa para producir maíz para autoconsumo y contribuir a su seguridad alimentaria. El resto refirió el uso de la milpa como una tradición cultural que deseaban heredarle a las nuevas generaciones (Figura 3.6).



Figura 3.6. Porcentaje de opinión de los motivos de rechazo al proyecto forestal de carbono.

El 24% de los encuestados consideran un fracaso las anteriores iniciativas de restauración promovidas en el ejido, debido a la falta de seguimiento y abandono de la asistencia técnica. En 2007, el Grupo Ecológico Sierra Gorda A.C., promovió un plan de reforestación donde los que participaron por un lado se sienten orgullosos por los árboles sembrados, pero

decepcionados a la vez, pues lamentan que sus parcelas dejaran de ser "productivas" debido a la falta de permisos para el aprovechamiento maderable y en palabras de un entrevistado: "el terreno dejo de ser de ellos, ahora es del bosque, es del gobierno, pues ya no lo pueden tocar, porque los meten a la cárcel..." Esta percepción se mantiene en la memoria colectiva de la comunidad, lo que impidió la aceptación del PFC propuesto.

El 29% de los entrevistados manifestó que la restauración con árboles frutales como el aguacate, durazno y nuez de la india habrían sido actividades de restauración más atractivas. Un 14% la reforestación con especies agroforestales como el chalahuite (*Inga vera*), el paraíso (*Melia azedarach*), el cedro rojo (*Cedrela odorata*) y café (*Coffea arabica*), otro 14% la reforestación con especies silvopastoriles como el ramón (*Brosimum alicastrum*) y la leucaena (*Leucaena leucocephala*) y un 5% con reforestación con especies maderables como pino (*Pinus greggii*) y cedro blanco (*Cupressus lindleyi*). Ninguno selecciono la reforestación o restauración con vegetación nativa.

El 33% de los encuestados manifestó que los PFC serían atractivos si la ganancia fuera mayor a \$10,000.00 pesos anuales.

### **3.4. Discusión:**

Cualquier proyecto forestal de carbono deben de seguir una serie de pasos que en términos generales comienza con la idea inicial del proyecto, su diseño e implementación y concluye con la verificación de las estimaciones de sus bonos de carbono (McFarland, 2018). Los proyectos forestales de carbono que han sido documentados con una implementación exitosa alrededor del mundo, coinciden en la identificación de los siguientes aspectos clave para su desarrollo: 1) Comunidades con organizaciones locales activas y participativas en algún proceso de desarrollo, 2) Certidumbre jurídica relacionada a la propiedad o tenencia de la tierra, 3) Participación de grupos intersectoriales, interinstitucionales y multidisciplinarios, 4) Vinculación con entidades académicas nacionales e internacionales, 5) participación e interés de fuentes financieras; 6) proyectos diseñados a largo plazo asociados a proyectos productivos que generen ingresos o cobeneficios adicionales a la captura de carbono (Corbera y Hendrickson, 2015; Jindal *et al.*, 2008; McFarland, 2018; Soto-Pinto *et al.*, 2005).

Todos los estándares internacionales que promueven los proyectos forestales de carbono solicitan una demostración del consentimiento libre, pleno e informado de la comunidad que va a participar, por tanto, es indispensable el uso de herramientas y técnicas de planeación participativa las cuales se ejecutan en base a la experiencia previa de las mismas comunidades. En estas primeras etapas el objetivo es brindar y hacer comprensible la mayor información acerca de los PFC.

Corbera y Hendrickson (2015) encontraron que en el caso del proyecto de captura de carbono Scolel-Te, en Chiapas, México, la principal motivación de los participantes del proyecto no era el beneficio económico de los bonos de carbono, los cuales inclusive consideraban insuficientes, sino que se relacionaba a el mejoramiento de sus sistemas productivos agroforestales, el abastecimiento de madera para uso de leña doméstico y la integración a grupos sociales con capacidades de organización. En este sentido la propuesta de Ollita del Pino, solo proponía un esquema de restauración forestal, en donde también los ingresos económicos por solo la venta de los bonos de carbono resultaban insuficientes y no se propuso un esquema de cobeneficios que resultase atractivo por los beneficiarios para la adopción del proyecto.

El beneficio económico de un PFC con fines de restauración forestal, a partir de cálculos conservadores arrojó un monto aproximado de ingresos por venta de bonos de carbono de \$1,171.25 pesos ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>. La rentabilidad de los bosques y selvas depende de las inversiones requeridas para re-establecer el sistema, de las actividades de cultivos intercalados y de los años que requieren hasta el inicio de la producción forestal. Los sistemas basados en los bosques generan rentabilidad negativa (pérdidas) durante uno o dos años (White y Minang, 2011). Los costos de la restauración forestal, requieren fuertes inversiones iniciales independientemente de la estrategia de restauración, ya sea plantaciones de enriquecimiento, regeneración natural, nucleación o plantaciones de restauración, los costos pueden variar desde la estrategia más sencilla de regeneración natural sin cercado con un monto aproximado a \$9,800.00/ha los primeros tres años hasta una restauración con plántulas y cercado de \$30,255.00/ha por el mismo periodo (Douterlunge y Ferguson, 2012).

Esto explica porque el PFC planteado con fines de restauración natural no resulto atractivo, ya que los actuales sistemas agrícolas y pastizales generan rentabilidad antes que los sistemas forestales. En comparación con el valor productivo de las parcelas agrícolas en México establecen un valor productivo a una hectárea de milpa en las selvas húmedas de Yucatán entre \$3,790.00 a \$1,760.00 (Garcia-Frapolli 2007). Otros, calculan un valor de beneficio neto de las milpas en rangos desde los \$2,392.00 hasta los \$674.00 dependiendo de las prácticas agroecológicas utilizadas para el cultivo de la milpa (Aguilar *et al.*, 2011). En ambos casos el ingreso es insuficiente para el sustento de una familia.

En México, la agricultura de autoconsumo es una constante en la economía campesina menos favorecida (Mata, 1994). Sin embargo, este sistema de policultivo de régimen pluvial conocido como milpa, provee alrededor del 65% de las proteínas y 71% de las calorías que consumen los campesinos mexicanos (De Walt, 1983) asegurando de este modo su seguridad alimentaria y además otorgándole un rol céntrico en la cultura de la comunidad ya que en ella se suele dedicar gran parte de las horas laborables.

La renta de mano de obra temporal o jornales y los apoyos oficiales aportan en su mayoría los recursos mínimos para las necesidades básicas (Aguilar, *et al.*, 2011), en este caso el subsidio para fomento a la agricultura PROCAMPO se añade como otra posible causa del rechazo al PFC.

Los PFC deben plantearse desde un principio con un abanico de opciones y escenarios completos que reflejen beneficios en todos los ámbitos a corto, mediano y largo plazo para que se facilite el proceso de decisión. Un PFC no es rentable por sí solo, debido al riesgo que conlleva su implementación, la volatilización de los precios del carbono, la incipiente estabilidad del mercado voluntario nacional y hasta los cambios abruptos en las políticas internacionales respecto al cambio climático, sin embargo, podría ser un gran aliado cuando se acompaña de otros proyectos productivos (Neupane, 2017).

Scolec-Te, en Chiapas se ha consolidado debido a que la venta de bonos de carbono favoreció al mejoramiento de sistemas agroforestales al igual que el proyecto CARBOIN en Oaxaca (Hendrickson y Corbera, 2015). Otros ejemplos son los proyectos que han apostado para la certificación con estándares internacionales como el proyecto PROTEAK UNO, en Campeche de plantaciones comerciales maderables de Teca o los de mejoramiento al manejo forestal en Oaxaca y Yucatán (Proteak, 2018, Forest trends, 2018).

Los PFC se fundamentan en cuatro pilares para su implementación, ambiental, económico, socio-cultural e institucional. Cada uno con un punto de inflexión que determina la viabilidad de un PFC, si alguno no se cumple, simplemente el PFC no será factible. El punto de inflexión del eje ambiental es que el proyecto defina una línea base clara y asegure un incremento en las remociones de GEI de la atmosfera de forma adicional y exclusivamente a consecuencia del proyecto. El económico es contar con un capital semilla, con un riesgo de inversión mínimo y que garantice la amortización de los gastos de inversión. En el socio-cultural, las actividades propuestas deben contar con el respaldo de la comunidad y el interés genuino en el aprendizaje de nuevos temas como la captura de carbono comprometiéndose al seguimiento y monitoreo a largo plazo. Finalmente, en el ámbito institucional se debe contar con instituciones consolidadas y funcionales que faciliten y promocionen los proyectos, brinden asesoría y respalden jurídicamente a las comunidades.

En ese sentido la RPCX no cuenta con organizaciones no gubernamentales que promuevan proyectos de conservación o aprovechamiento sustentable de los recursos, tampoco cuenta con programas presupuestales de gobierno estratégicos para la conservación o manejo de recursos naturales específicos de la región. La falta de este respaldo de instituciones y de inversionistas interesados en los PFC puede verse como una limitante más para la implementación del proyecto. Futuros intentos de implementación de esta Norma, deberán mapear los posibles actores locales, gubernamentales y no gubernamentales que podrían apoyar el acompañamiento de un PFC.

### **3.5. Conclusiones**

A diferencia de otros proyectos forestales a corto plazo, los proyectos forestales de carbono son complejos porque requieren de una gran coordinación entre diferentes actores y compromisos a largo plazo. Esto sugiere que los factores que pudieron influir para no consolidar la implementación en el ejido Ollita del Pino fueron la falta de organizaciones no gubernamentales involucradas, falta de fuentes de financiamiento plenamente identificadas y el planteamiento inicial con un enfoque hacia los cobeneficios y sistemas de producción sustentables. Sin embargo, estas condiciones son muy diferentes en otras áreas del país, por ejemplo las áreas de acción temprana REDD+, donde existe una gran confluencia de actores gubernamentales, no gubernamentales, nacionales e internacionales y donde la disponibilidad de fondos para la implementación de proyectos es recurrente. Por las

características de permanecer sin cobertura forestal por 5 años consecutivos de las áreas elegibles para la implementación de la norma para actividades de restauración, se puede inferir que son áreas que actualmente están siendo manejadas para fines agrícolas o pastoriles. De manera que la implementación de un PFC con fines de restauración se pueden considerar una estrategia de manejo y conservación a largo plazo siempre y cuando vayan asociados a otro tipo de proyectos productivos que se relacionen al buen manejo y uso de los recursos naturales. Casi tan importante como estimar la cantidad de bonos de carbono, los cobeneficios se deben de plantear desde un inicio del proyecto ya que estos serán claves para definir la aprobación tanto por la comunidad como por los posibles compradores.

### 3.6 Literatura citada:

Aguilar-Jiménez, C. E., Tolón-Becerra, A., & Lastra-Bravo, X. (2011). Evaluación integrada de la sostenibilidad ambiental, económica y social del cultivo de maíz en Chiapas, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(1), 155-174.

BioCF World Bank Group. (27 de Abril de 2017). *El Fondo de BioCarbono Lecciones sobre proyectos MDL forestales*. Obtenido de Worldbank.org: [http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/BioCF\\_Panama\\_ESPHigh\\_for\\_web.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/BioCF_Panama_ESPHigh_for_web.pdf)

CAR Climate Action Reserve. (12 de Diciembre del 2017) Announcing the First Issuance of Forest Carbon Credits to San Juan Lachao under the Climate Action Reserve's Mexico Forest Protocol. Obtenido de climateactionreserve.org: <http://www.climateactionreserve.org/blog/2017/12/12/announcing-the-first-issuance-of-forest-carbon-credits-to-san-juan-lachao-under-the-climate-action-reserves-mexico-forest-protocol/>

De Jong, B., Anaya, C., Masera, O., Olgún, M., Paz, F., Etchevers, J., Martínez, R.D., Guerrero G., y Balbontín, C. (2010). Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1689-1701. doi:10.1016/j.foreco.2010.08.011

DeWalt, K.M. (1983). Income and dietary adequacy in an agricultural community. *Social Science & Medicine*, 17(23), 1877-1886.

DOF. (15 de Junio de 2015). *Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-173-scfi-2015.pdf>

Douterlungne, D. & Ferguson B.G. (2012). *Manual de restauración ecológica campesina para la Selva Lacandona*, ECOSUR, (No. EE/333.751530972 D6).

- Elaine Artigas Pérez, Alejandro Emilio Ramos Rodríguez y Heriberto Vargas Rodríguez (2014): "La participación comunitaria en la conservación del medioambiente: clave para el desarrollo local sostenible", *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, n. 21 (octubre 2014). En línea: <http://www.eumed.net/rev/delos/21/conservacion.html>
- Etchevers, J., Acosta, M., Monreal, C., Quednow, K., y Jiménez, L. (2001). Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales* (Vol. 18).
- Forest Trends. (28 de Mayo de 2018). *Forest Carbon Portal. Tracking terrestrial carbon*. Obtenido de Forest Project Inventory. Mexico: <http://www.forestcarbonportal.com/project/index.php?KEYWORD=Mexico>
- García-Frapolli, E., Toledo, V. M., y Martínez Alier, J. (2008). Apropiación de la naturaleza por una comunidad maya yucateca: un análisis económico-ecológico. *Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 027-42.
- Hendrickson C. Y. y Corbera, E. (2015). Participation dynamics and institutional change in the Scolel Te carbon forestry project, Chiapas, Mexico. *Geoforum*, 63-72.
- Jackson, W.L., e Ingles, A.W. (2004). Técnicas participativas para actividades forestales comunitarias: manual de campo (No.630.715J14). IUCN Gland (Suiza) WWF, Gland (Suiza) Agencia Australiana para el Desarrollo Internacional, Canberra (Australia).
- Jindal R., Swallow B. y Kerr J. (2008). Forestry-based carbon sequestration projects in Africa: potential benefits and challenges. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., *Natural Resources Forum* 32 (2), 116-130.
- McFarland, B.J. (2018). Payments for Ecosystem Services. Palgrave Macmillan, Cham. *Conservation of Tropical Rainforests*, 337-429
- Mata, B.; 1994. Agricultura campesina y autogestión. En: Martínez, T.; Trujillo, J.; Bejarano, F. (Eds.). Agricultura campesina: orientaciones agrobiológicas y agronómicas sobre

bases sociales tradicionales vs Tratado de Libre Comercio. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillo, México, p. 99-110.

Neupane P.R., Gaudi, A., Maraseni T., Kubler D., Mundhenk P., Dang M.V., y Kohl M., (2017). A segregated assessment of total carbon stocks by the mode of origin and ecological functions of forest: implication on restoration potential. *International Forestry Review*, 19(4), 120-147.

Plan Vivo, 2016. Plan Vivo: Socio-Economic Manual. Updated August 2016. Plan Vivo. <http://www.planvivo.org/docs/Socio-economic-Manual.pdf>

PROFORESTAL A.C. (2015). Estudio de Ordenamiento Territorial Comunitario del ejido Ollita del Pino, Xilitla, S.L.P. CONAFOR.

Proteak (28 de mayo de 2018). Sustainability, Carbon Capture : <http://www.proteak.com/index.php/en/sustainability/carbon-capture>

Reyes, H.H., Galarza R.E., Torres D.E.G., Sahagún S.F.J., de Nova V.J.A. (2016) Proyecto de fortalecimiento de las acciones de restauración del bosque de niebla en la RPC Xilitla. Programa de conservación de especies en riesgo (PROCER) 2016 Región noreste y Sierra Madre Oriental. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). México

Soto-Pinto, L., Jiménez-Ferrer, G., Guillen, A. V., De Jong, B., & Esquivel-Bazán, E. (2005). Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 44-50.

White D. y Minang P. (2011). Estimación de los costos de oportunidad de REDD+. Manual de capacitación. Washington DC. World Bank, 1-21.

World Bank y Ecofys. (2018). State and Trends of Carbon Pricing 2018 (May). Washington, DC. World Bank, p. 47. Doi: 10.1596/978-1-4648-1292-7.

## Capítulo 4. Conclusiones finales

La Norma Mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono (NMX-AA-173-SCFI-2015) es una herramienta que facilitaría la inclusión del sector forestal en el recién mercado voluntario de carbono en México. Actualmente la norma solo establece principios y criterios generales para el diseño de los proyectos forestales de carbono con un enfoque hacia el incremento de los almacenes de carbono, pero no cuenta con metodologías exclusivas para la cuantificación de carbono diferenciadas de acuerdo a la actividad de incremento.

La metodología propuesta en ésta investigación considera los criterios de elegibilidad propuestos en la Norma para su implementación, además de identificar la factibilidad del proyecto y su producción estimada de incremento de carbono en biomasa aérea, considerado un escenario de restauración forestal acorde a su afinidad vegetal original. En toda la RPCX se identificaron 504.53 ha que cumplían con los criterios de áreas sin cobertura forestal en los últimos 5 años, con tenencia regularizada y sin problemas de litigio conocido. Se calculó un potencial de captura de carbono en dicha superficie de 60,857 TonCO<sub>2</sub> a largo plazo en un periodo mayor a 20 años, considerando que el tipo de vegetación original predominante en dichas áreas susceptibles a restauración corresponde a bosques húmedos tropicales y que de acuerdo a numerosas investigaciones se considera un horizonte mayor a 80 años para que este tipo de vegetación alcance los máximos niveles de densidad de carbono aéreo hasta ahora reportados. El uso de datos conservadores supone un ingreso anual estimado, de \$1,171.25 ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>. Los bajos ingresos esperados, constatados con los costos reales de restauración y de seguimiento del proyecto terminaron desanimando a los posibles beneficiarios.

Los proyectos forestales de carbono no son atractivos solo por el ingreso económico que pueden generar, sino que la identificación y promoción de los cobeneficios asociados es clave para lograr la adopción del proyecto. Otras incertidumbres como la falta de un coordinador del proyecto, el riesgo que conlleva el cambio de uso de suelo, la pérdida de los esquemas actuales de subsidios, así como la falta de actores locales que atraigan inversión para proyectos de restauración y conservación influyeron también.

La aplicación de la norma enfrenta condiciones ambiguas que dificultan su implementación, entre ellas la falta de:

1. Metodologías exclusivas para esta norma aprobadas por su Consejo Técnico Consultivo.
2. Registro público o portal designado por CONAFOR para enlistar y registrar los PFC y sus créditos de carbono; vinculado al Registro Nacional de Emisiones.
3. Listado de coordinadores de proyecto acreditados que tengan las capacidades adecuadas para diseñar este tipo de proyectos.
4. Padrón de organismos acreditados que puedan realizar la validación o verificación del proyecto.
5. Estrategia adecuada de comunicación, promoción y divulgación de la misma entre los diferentes actores involucrados, comuneros, sociedad civil, gobiernos locales y sector privado.

Esta propuesta metodológica permitió identificar y calcular de manera local y conservadora el potencial de un área para la captura de carbono. Está diseñada para proyectos con enfoque de restauración forestal, como reforestación, aforestación o regeneración, por el uso de imágenes satelitales que permite diferenciar claramente las áreas sin cobertura. Una innovación es el cálculo aproximado del potencial de captura a nivel local o predio basado en la vegetación predominante por sitio permitiendo dar un estimado de las ganancias a largo plazo.