

# IMPLEMENTACIÓN MULTI-ESCALA DEL MECANISMO REDD+: UNA PRUEBA DE CONCEPTO EN CHIAPAS, MÉXICO

## MULTI-SCALE IMPLEMENTATION OF THE REDD + MECHANISM: A PROOF OF CONCEPT IN CHIAPAS, MEXICO

Fernando Paz<sup>1†</sup>, Ben de Jong<sup>2</sup>, Ma. Isabel Marín<sup>3</sup>, Fernando Ibarra<sup>3</sup>, Marisol Reyes<sup>3</sup>, Fermín Pascual<sup>3</sup> y Edgardo Medrano<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GRENASER, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México, México

<sup>2</sup> Unidad Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, Campeche, México

<sup>3</sup> Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

### RESUMEN

La implementación de mecanismos REDD+ a escala local y nacional requiere de sistemas MRV (medición/ monitoreo, reporte y verificación) en términos multi-escala, construidos de “abajo hacia arriba”, si la intención es representar la escala local, donde se dan las acciones hacia los objetivos de REDD+. La implementación de abajo hacia arriba fue analizada en el estado de Chiapas, para analizar la viabilidad del mecanismo y detectar problemas o vacíos, para orientar los desarrollos a futuro. A través del uso de información de sensores (satélite Landsat), con resolución temporal de 30 m, se generaron las clases Bosque, No Bosque y Bosque Degradado a nivel estatal y se mapearon estas clases a las series del INEGI para el periodo 1992-2010. Los factores de emisión (densidades de carbono) fueron obtenidos de los inventarios de la CONAFOR e INEGI, para caracterizar los almacenes de carbono (biomasa viva y suelo) a nivel de todos los predios en el estado, para después integrarlos a escala de municipios, subcuencas y estado. Los escenarios de referencia multi-escala permiten integrar en forma armónica acciones locales con la planeación estatal y nacional, lo que identifica actores intervinientes en el logro de las metas de REDD+ y permite su implementación operacional progresiva, para ir reduciendo las incertidumbres asociadas a la disponibilidad de información.

**Palabras Clave:** *almacenes de carbono; clases de bosques; patrones dinámicos; imágenes Landsat; escenarios multi-escala.*

### ABSTRACT

The implementation of REDD + mechanisms at the local and national scale requires MRV systems (measurement / monitoring, reporting and verification) in multi-scale terms, built from “bottom up”, if the intention is to represent the local scale, where the actions are made towards REDD + objectives. The bottom-up implementation was piloted in the state of Chiapas, to analyze the viability of the mechanism and detect problems or gaps, to guide future developments. Through the use of information from remote sensing (Landsat satellite), with a temporal resolution of 30 m, the classes Forest, Non-Forest and Degraded Forest were generated at the state level and these classes were mapped to the INEGI series for the period 1992-2010. The emission factors (carbon densities) were obtained from the CONAFOR and INEGI inventories, to characterize the carbon stocks (living biomass and soil) at the level of all the properties in the state, to later integrate them at the municipal, sub-basins and state level. The multi-scale reference scenarios allow harmonious integration of local actions with state and national planning, identifying actors involved in the achievement of REDD + goals and allowing their progressive operational implementation, to reduce the uncertainties associated with the availability of information.

**Index words:** *carbon stocks, forest classes, dynamic patterns, multiscale escenarios*

## INTRODUCCIÓN

El mecanismo de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada, más (+) la conservación de los almacenes de carbono, el incremento de éstos y el manejo forestal sustentable, denominado REDD+ (UNFCC, 2016), ha sido promovido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático o CMNUCC (UNFCC, 2014). Actualmente, el Acuerdo de París (UNFCC, 2015) ha dejado de lado el mecanismo REDD+, aunque las negociaciones en la CMNUCC continúan con relación al tema. Aunque el tema REDD+ fue planteado para considerar solo el sector forestal, las propuestas más recientes plantean una visión más integral del territorio y usos del suelo no forestales (*i.e.* Soluciones Climáticas Naturales; Griscom *et al.*, 2017). El mecanismo REDD+, a pesar de su popularidad inicial, ha tenido grandes retos en los intentos de implementación (Kohl *et al.*, 2009; Angelsen *et al.*, 2018), además plantea la necesidad de reconsiderar algunas acciones emprendidas y consolidar las que han facilitado su operación basada en resultados.

En México se han realizado inventarios de gases efecto invernadero (GEI) del sector Uso del Suelo y Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura, USCUS, (de Jong *et al.*, 2006; IPCC, 1996) y del Sector Agricultura, Forestería y Otros Usos del Suelo, AFOLU, por sus siglas en inglés (de Jong *et al.*, 2009, 2010a; IPCC, 2003, 2006) que permiten realizar avances hacia las metas de REDD+; aunque actualmente hay debate sobre las actualizaciones de los inventarios nacionales de gases efecto invernadero (de Jong *et al.*, 2019; Paz *et al.*, 2019a).

El Programa Mexicano del Carbono (PMC), desde el 2008 ha trabajado en el mecanismo REDD+ y su implementación a escala local utilizando como piloto el estado de Chiapas. De las acciones realizadas, se desarrolló una prueba de concepto de la implementación de “abajo hacia arriba” de REDD+ desde la escala de predios a la estatal, armonizando las escalas para poder anidarse con los enfoques a escala nacional. Los resultados de este trabajo fueron presentados en la COP 16 de Cancún 2010 y no fueron publicados. El enfoque local analizado por el PMC planteó una visión de todos los usos del suelo, no solo el forestal (Paz, 2012) desde su concepción, para tener una visión fundamentada en territorios y no en sectores administrativos.

El desarrollo de escenarios de referencia, así como el proceso de medición/monitoreo, reporte y verificación

(MRV), se han identificado como elementos centrales de cualquier estrategia REDD+ y de los inventarios de emisiones GEI para las comunicaciones nacionales ante la CMNUCC o planes de acción ante el cambio climático estatales y municipales. En México se considera que los sistemas y protocolos de MRV deben ser nacionales, pero lo suficientemente flexibles para incorporar actividades subnacionales y locales dentro de una estrategia coherente, para permitir la presentación de los reportes de manera consistente y transparente. Al implementar iniciativas REDD+, el enfoque de la contabilidad de emisiones a nivel nacional permite considerar la mayor parte de las fugas en forma explícita, si bien la capacidad de planeación y manejo regional y del paisaje es principalmente subnacional y la implementación de acciones ocurre localmente. La compatibilidad y consistencia entre escalas y actores (gobiernos nacionales, estatales y municipales, organizaciones de la sociedad civil, la academia, organizaciones de productores, comunidades, etc.) son elementos esenciales de un sistema transparente y confiable. Entre las escalas espaciales subnacionales relevantes están los estados, los municipios, las comunidades locales y los propietarios privados.

En este trabajo se presenta la metodología establecida por el PMC en el estado de Chiapas en 2008, como prueba de concepto piloto en la implementación operacional de REDD+. Se presenta la versión conservadora la metodología y las consideraciones en los diferentes pasos y procesos realizados que, en todo caso, puede ser perfectible en función de la información adicional disponible. La metodología PMC utiliza al predio catastral (propiedad privada o social) como la unidad mínima fundamental para generar los escenarios de referencia (ER) en términos netos de emisiones / remociones, ya que a esa escala local ocurren las estrategias de intervención (acciones) y se logra la integración vertical (“de abajo hacia arriba”), para garantizar su armonización con otras escalas de intervención (ER regionales) como lo plantea REDD+.

## ENFOQUES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO REDD+

La implementación operacional del mecanismo REDD+ en México ha sido planteada recientemente como un enfoque de “arriba hacia abajo” (CONAFOR, 2017), con diferentes argumentos, entre los que destaca la limitación de conocer a los “dueños” de acciones locales de deforestación y degradación forestal evitada

(Balderas-Torres y Skutsch, 2012). Así, con el uso de información a escala nacional, tipo mapas de uso del suelo y vegetación o USyV del INEGI (1997), las actividades locales quedan englobadas en grandes polígonos de USyV, lo cual representa un problema debido a la incapacidad de diferenciar acciones particulares de los dueños y poseedores legales de la tenencia de la tierra. El mecanismo REDD+ establece que la contabilidad de las emisiones de GEI debe ser

nacional, aunque el enfoque subnacional es permitido (UNFCCC, 2016).

Los requerimientos de armonización de escalas de contabilidad y de distribución de beneficios plantean escalar los almacenes y flujos de carbono desde el nivel de predios (parcelas en los ejidos y comunidades) hacia nuevos niveles de agregación (*i.e.* áreas geoestadísticas básicas, municipios, regiones, subcuencas hidrológicas, estados, país), Figura 1.



Figura 1. Enfoques de implementación tipo abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo en de REDD+.

El enfoque nacional o *de arriba hacia abajo* no permite desagregar información, a diferencia el enfoque local o *de abajo hacia arriba*. El reto en la implementación de REDD+ para una perspectiva de los productores (los que ejecutan las acciones locales y cuidan sus recursos), requiere analizar su viabilidad técnica y operacional, lo cual es discutido en lo siguiente como una prueba de concepto para el estado de Chiapas. En general, de acuerdo a las guías y lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático o IPCC (2003, 2006), la estimación de las emisiones de GEI consta de datos de actividad (mapas de USyV) y factores de emisión (densidades de carbono). En el caso de los mapas de actividad, la información disponible en el país está a escala 1:250 000 (INEGI, 1997, 2009), la cual es demasiado gruesa para la implementación local de REDD+. Dada esta restricción es necesario acoplar la información nacional a las actividades locales *sensu* INEGI.

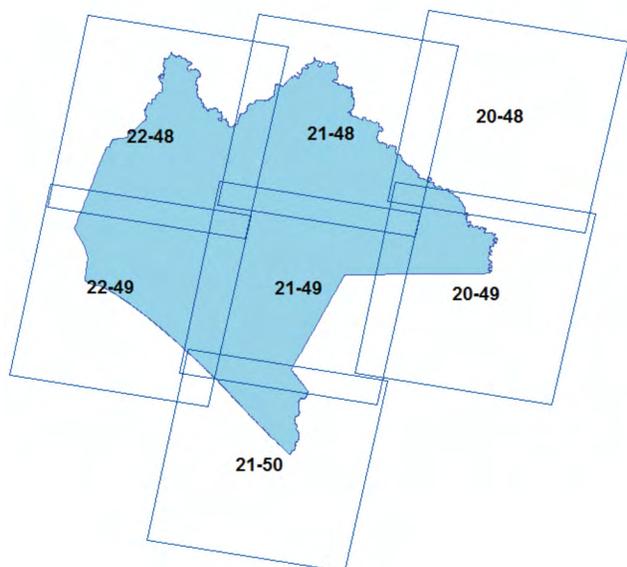
### ESTIMACIÓN MULTI-TEMPORAL DE DATOS DE ACTIVIDAD

En este apartado se describe el procedimiento empleado para la elaboración de mapas anuales de deforestación y degradación forestal para el periodo 1992-2010. Los detalles del procedimiento se reportan

en Paz *et al.* (2010b), quien obtuvo mapas de cobertura del suelo únicamente para los años: 1990, 1995, 2000, 2005, 2007 y 2009. Los mapas se generaron a partir de imágenes satelitales y un clasificador genérico de objetos. Los mapas de clases constituyen el insumo base para la elaboración de los mapas de deforestación y degradación forestal. A continuación, se describen las características de los insumos empleados. Posteriormente se detallan los pasos del procesamiento de los insumos, hasta la obtención de los productos de datos de actividad. La documentación a mayor detalle puede ser encontrada en Paz (2010) y Paz *et al.* (2010c y 2012).

### Descripción de Insumos

Para la integración de los mapas se emplearon imágenes LANDSAT de los sensores TM y ETM+. En la Figura 2 se muestran las escenas (*path-row*) que cubren el estado de Chiapas. Las imágenes se obtuvieron desde el sitio oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), cuya dirección es: <http://landsat.usgs.gov>. Se descargó el registro completo de imágenes disponibles para el periodo de estudio (1992–2010), con remuestreo a 30 m (reflectancias) con el método de convolución cúbica. La proyección fue UTM (Universal Transverse Mercator) con datum WGS84.



**Figura 2.** Escenas LANDSAT con cobertura en el estado de Chiapas.

El procedimiento de imágenes se realizó con el Sistema de Procesamiento de Imágenes Satelitales (SPIAS), desarrollado por Medrano *et al.* (2011 y 2014) para generar insumos base para la implementación de esquemas como REDD+ y su MRV.

El software SPIAS fue conceptualizado para procesar información con diferente resolución (espacial, espectral y temporal) proporcionada por sensores como AVHRR, MODIS, TM y ETM+; entre otros. Para el caso específico de los sensores TM y ETM+ (imágenes LANDSAT), SPIAS utiliza módulos orientados a compensar los efectos que tienen la atmósfera, la geometría de iluminación y el relieve topográfico; esto debido a que el insumo son imágenes que al ser adquiridas ya cuentan con cierto nivel de procesamiento (1T, 1Gt o 1G, entre otros) y, por lo tanto, ya vienen georeferenciadas y proyectadas. La línea de proceso que sigue el SPIAS con imágenes LANDSAT es: 1. Lectura de imágenes, 2. Corrección topográfica, 3. Calibración, 4. Clasificación de objetos, 5. Corrección atmosférica y 6. Corrección de BRDF.

Los módulos del SPIAS utilizado fueron:

*Módulo 1: Lectura de imágenes.* Las imágenes LANDSAT (con formato.tar.gz) se descomprimen y se leen por el sistema.

*Módulo 2: Corrección topográfica.* Consiste en la corrección de los valores de la imagen, por la distorsión que ocasiona el efecto de sombreado debido al relieve. En el caso del presente trabajo no se aplicó esta corrección, ya que el módulo de BRDF aproxima esta corrección.

*Módulo 3: Calibración.* Los números digitales, asociados a la información espectral captada por las distintas bandas, son convertidos a radianzas y posteriormente a reflectancias o brillantez térmica. Los coeficientes proporcionados en los metadatos de la imagen ya consideran la degradación del sensor.

*Módulo 4: Clasificación genérica.* En esta etapa se utiliza un algoritmo de clasificación en forma de árbol de decisión (Figura 3) desarrollado por Palacios *et al.* (2006), el cual se basa en la identificación de los patrones exhibidos por las firmas espectrales de los objetos discernibles en una imagen LANDSAT para clasificarlos en 14 clases genéricas (Cuadro 1).

*Módulo 5: Corrección atmosférica.* Esta corrección se realiza utilizando un algoritmo con las siguientes características (Palacios *et al.*, 2018): (a) Se basa en la correlación existente entre la reflectancia de la banda centrada en 2.2 micrómetros (banda 7) y la banda centrada en 0.485 micrómetros (banda 1). La ordenada al origen de la regresión entre la banda 7 y la banda 1 es un estimador de la reflectancia de trayectoria en la banda 1. (b) Con la reflectancia de trayectoria en la banda 1, se selecciona el modelo de atmósfera y el modelo de aerosol, se estima el espesor óptico de los aerosoles centrado en 0.55 micrómetros. (c) El desarrollo del algoritmo se apoyó en el acoplamiento de varios modelos de simulación y bibliotecas de datos espectrales para la representación del sistema óptico suelo – planta – atmósfera.

*Módulo 6: Corrector BRDF.* Este módulo realiza la estandarización de la geometría de iluminación para todos los píxeles en una escena, utilizando la Función de Distribución de la reflectancia Bidireccional (BRDF). La BRDF describe como varía la señal captada por el sensor en función de los ángulos (cenitales y acimutales) de visión y de iluminación. El modelo utilizado se desarrolló por el Colegio de Postgraduados (Bolaños *et al.*, 2010; Cano *et al.*, 2018; Paz *et al.*, 2018) y su principal ventaja es que depende un solo parámetro, por lo que se puede caracterizar con solo una medición.

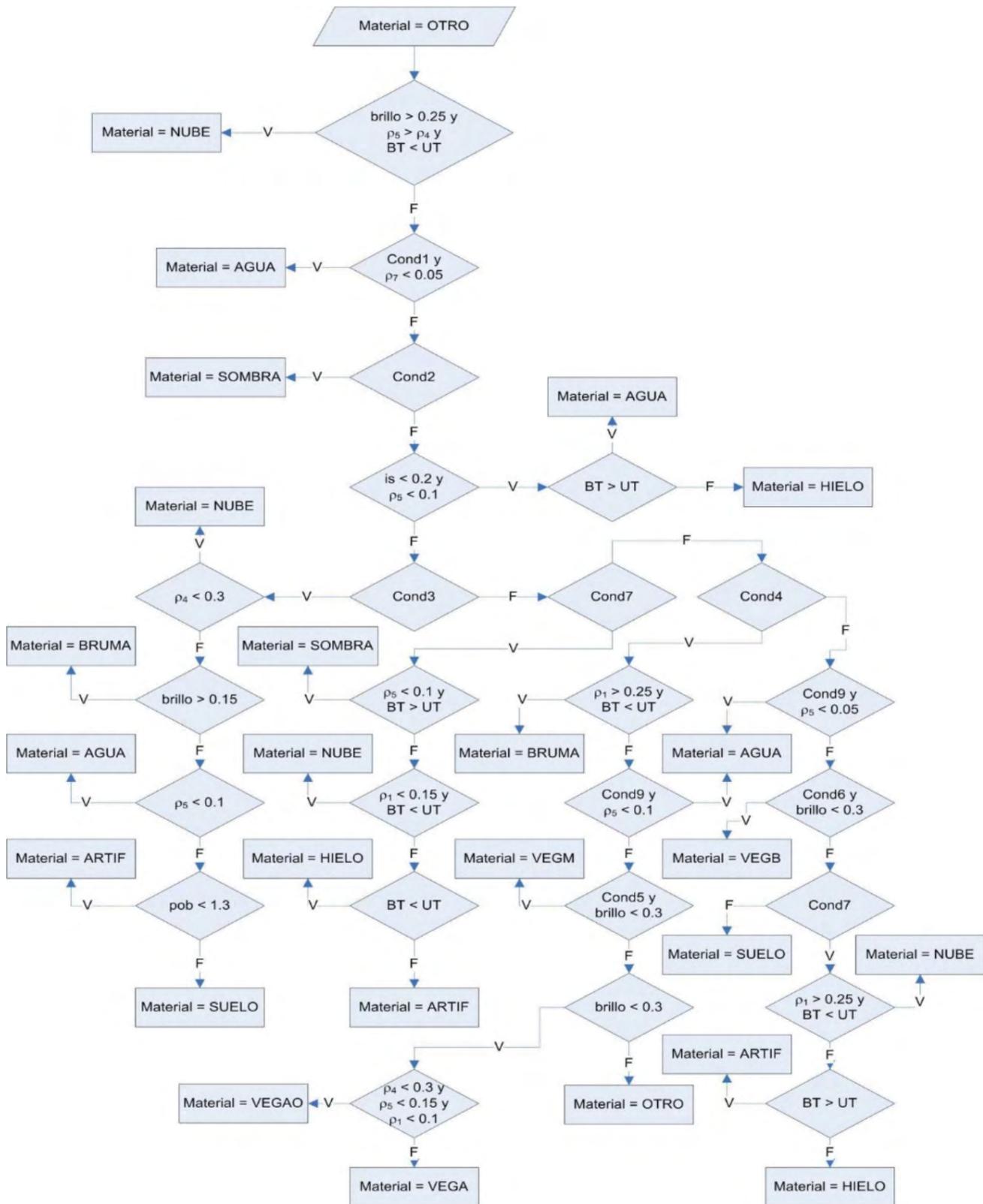


Figura 3. Algoritmo de clasificación de objetos.

**Cuadro 1. Clases genéricas del algoritmo de clasificación de objetos.**

Código	Clase	Descripción
1	Sombra	Sombras proyectadas por nubes y relieve topográfico
2	Nube	Nubes densas
3	Bruma	Calina, neblina y nubes poco densas
4	Hielo	Glaciares y nieve
5	Agua	Cuerpos de agua
6	Artificial/Arena	Poblaciones y suelos arenosos oscuros
7	Suelo desnudo claro	Suelos lateríticos y dominados por hierro
8	Suelo desnudo medio	Suelos de textura moderadamente gruesa
9	Suelo desnudo oscuro	Suelo con mayor contenido de materia orgánica
10	Vegetación baja cobertura	Vegetación con baja cobertura del suelo
11	Vegetación media cobertura	Vegetación con mediana cobertura del suelo
12	Vegetación alta cobertura	Vegetación con alta cobertura del suelo
13	Vegetación oscura (densa)	Vegetación oscura (bosques, pantanos)
14	Otros o sin información	Todo valor que no corresponde a las anteriores

**Elaboración de mapas anuales de clases de cobertura del suelo**

Del procesamiento de imágenes con el SPIAS se obtuvieron imágenes de clases genéricas de objetos, para ello el sistema utiliza un clasificador genérico que fue desarrollado por Palacios *et al.* (2006).

Las imágenes de clases genéricas se utilizaron para elaborar mapas anuales de “clases de cobertura del suelo”, con los pasos que se describen a continuación.

Primero, las categorías obtenidas en las imágenes de clases genéricas se reclasificaron como se indica en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Reclasificación de las categorías en las imágenes de clases genéricas de objetos.**

Clase inicial	Clase final	Descripción	Cobertura asociada
1, 2, 3, 4, 5, 6, 14	0	Sin información	No definida
7, 8, 9	1	Suelo desnudo	0-10%
10	2	Vegetación baja cobertura	10-30%
11	3	Vegetación media cobertura	30-60%
12	4	Vegetación alta cobertura	60-100%
13	5	Vegetación densa	100%

Con las imágenes resultantes de la reclasificación se construyeron mosaicos anuales con cobertura espacial en todo el estado de Chiapas. Para realizar este ejercicio se programó un algoritmo para analizar píxel a píxel, la información multi-temporal correspondiente a cada año de estudio y extraer el valor representativo de la serie de datos, atendiendo los siguientes criterios:

- a. En áreas de selva caducifolia (más del 75% de las plantas pierden sus hojas) y sub-caducifolia (entre el 50 y 75% de las plantas pierden sus hojas) se extrajo el valor de cobertura del suelo más alto disponible (fuera del periodo de pérdida del follaje).

- b. En áreas diferentes a selva perennifolia (más del 75% de las plantas conservan sus hojas) y sub-perennifolia (entre el 50 y 75% de las plantas conservan sus hojas), se extrajo el valor más bajo diferente de cero.

Para revisar la caducidad del follaje, se generaron mapas de caducidad (caducifolia, sub-caducifolia, sub-perennifolia y perennifolia) a partir de las series II, III y IV del INEGI (2007a, b y c, para todos los tipos de vegetación natural o perturbada en Chiapas. Estos mapas se muestran en la Figura 4. Con esta información fue posible minimizar los efectos de confusión para analizar el estado de los ecosistemas forestales en un determinado año, así como para seleccionar las imágenes satelitales más apropiadas para su uso.

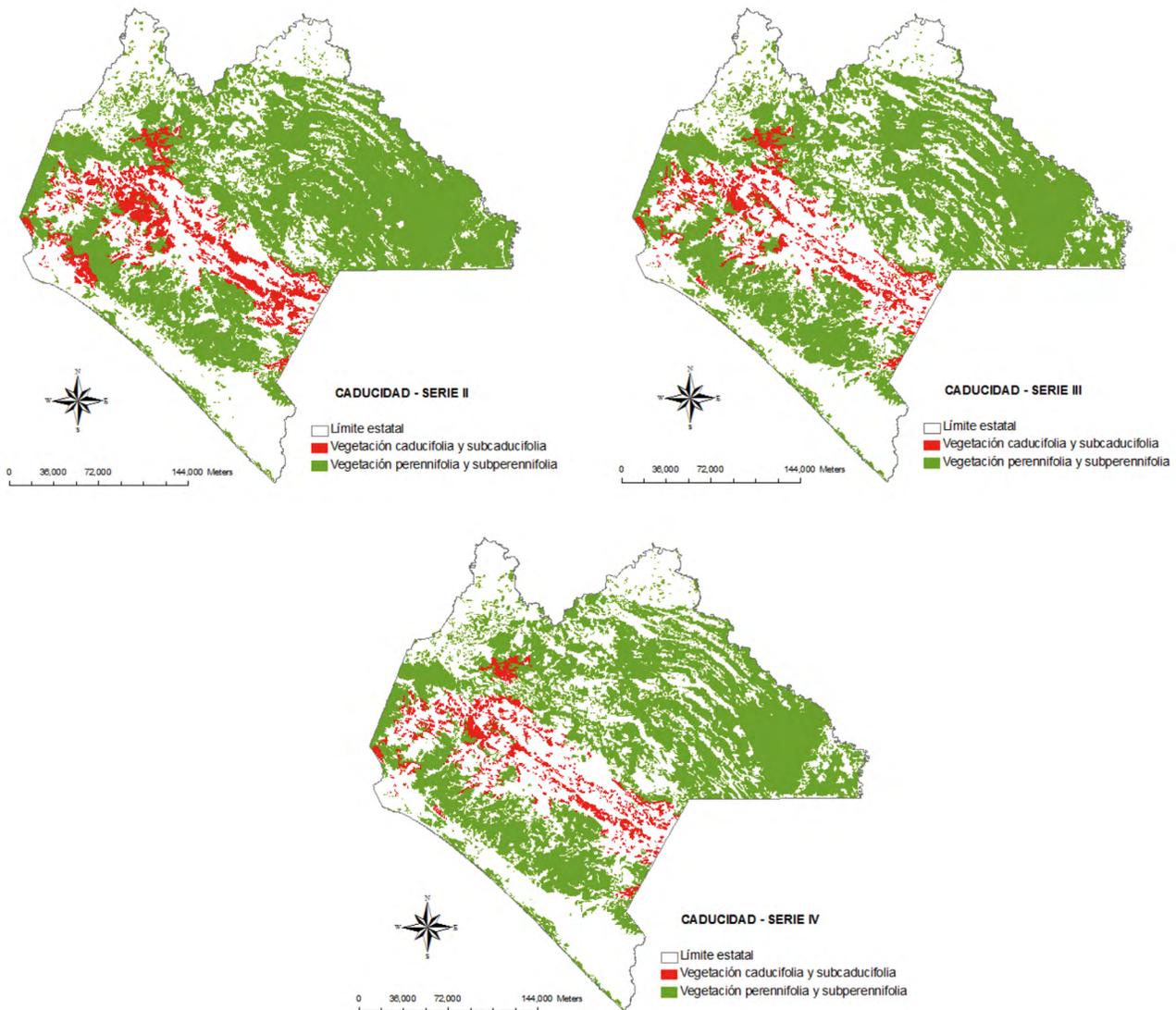


Figura 4. Mapas de caducidad del follaje en Chiapas.

Debido a que se considera el problema de caducidad es que se extrae el valor más alto en los píxeles correspondientes a vegetación caducifolia y sub-caducifolia. Si se extrajera el valor más bajo, estas áreas quedarían representadas con la clase suelo desnudo o baja cobertura. Un problema que prevalece aquí es la discriminación de cultivos, puesto que, al extraer el valor más alto, dicho valor corresponde con la etapa de máxima producción de follaje, quedando representado por las clases 4 o 5 (vegetación alta cobertura o vegetación densa). De este modo, los píxeles de cultivo no son diferenciables de los píxeles de selva caducifolia o sub-caducifolia.

En las áreas correspondientes a selva perennifolia y sub-perennifolia se extrajo el valor más bajo, lo que considera que de esta forma se podría evitar la confusión entre los píxeles de cultivos o pastizales y los píxeles de vegetación perennifolia y sub-perennifolia. Estos últimos conservan valores altos a lo largo del año, por lo que al realizar la extracción quedan representados

por las clases 4 o 5 (vegetación de alta cobertura o vegetación densa), en tanto que los píxeles de cultivos o pastizales quedan representados dentro de las clases 1 o 2 (suelo desnudo o vegetación de baja cobertura).

Los mapas de caducidad se emplearon según el año de proceso de la información, de este modo, se empleó el mapa de caducidad de la serie II para para analizar y extraer la información de cobertura del suelo en el periodo el periodo 1992-1999, el de la serie III para el periodo 2000-2004 y el de la serie IV para el periodo 2005-2010.

Como resultado de este proceso se obtuvieron mosaicos anuales de las “clases de cobertura del suelo” en Chiapas, éstos se recortaron al tamaño de la envolvente del estado para generar los mapas anuales. En la Figura 5 se muestra un acercamiento al mapa del año 1995, se puede verificar que las áreas de selva caducifolia (delineadas en color blanco) se encuentran representadas por los valores más altos de clases.

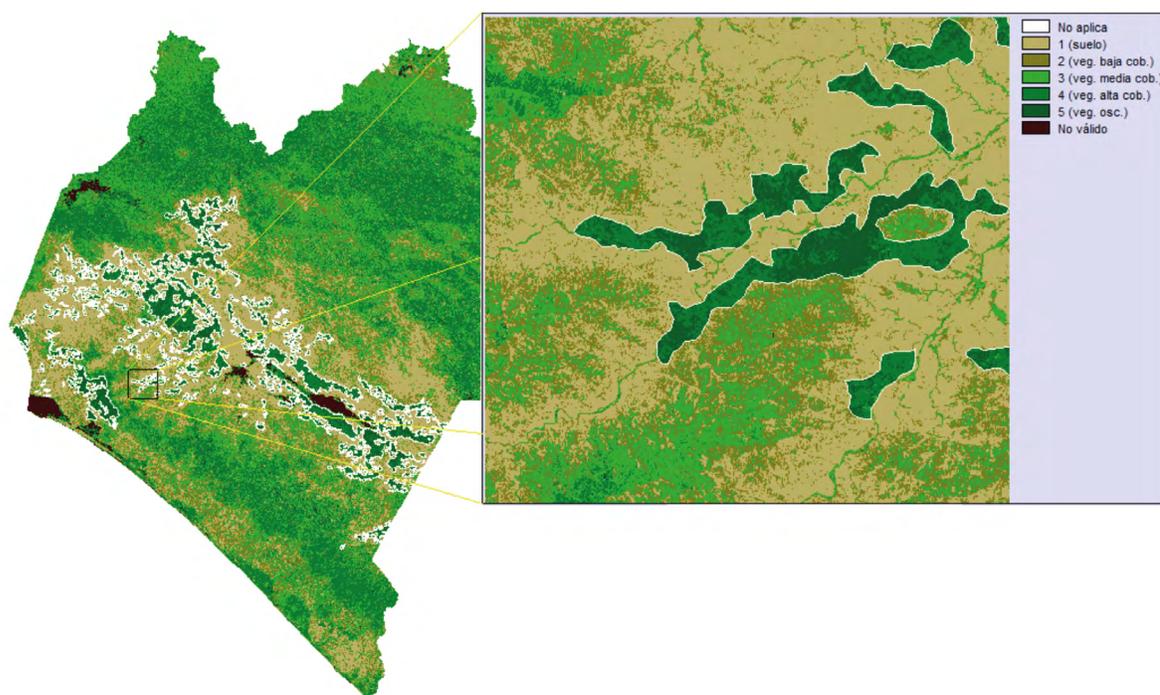


Figura 5. Verificación de la extracción de información en las áreas de selva caducifolia (año 1995).

### Integración de mapas anuales de deforestación y degradación forestal

Al considerar los valores de la cobertura (%) asociada a las clases de cobertura del suelo del Cuadro 2, se definieron umbrales para generar los mapas

anuales de deforestación y degradación forestal, de la siguiente forma:

- No bosque: cobertura < 10%
- Bosque degradado: cobertura 10-30%

- Bosque: cobertura > 30%
- Sin información

La elección de los umbrales de cobertura para las categorías definidas fue basada en trabajos previos donde se analizaron diferentes opciones (Paz *et al.*, 2010b), donde los propuestos fueron los que obtuvieron una mejor confiabilidad en relación a puntos de control terrestres de validación (confiabilidad del 90% o mayor – ver más adelante). Los mapas de “clases de cobertura del suelo” en Chiapas se intersectaron con los polígonos de las categorías Bosque y No bosque derivados de las series II, III y IV de INEGI (Figura 6). La superficie

intersectada por la categoría No Bosque-INEGI no se revisó con base a la información de las clases de cobertura del suelo. La superficie intersectada por la categoría Bosque-INEGI fue revisada y modificada a No Bosque o Bosque Degradado o Bosque, de acuerdo con los umbrales de cobertura definidos previamente, esto se hizo para mantener una estimación conservadora de la superficie clasificada como “Bosque” en las imágenes de satélite. De este modo, la clase Bosque de las series del INEGI se tomó como verdadera y fue sujeta a revisión (cambio de la categoría bosque a otra de menor cobertura). La clase No bosque-INEGI se mantuvo igual, por lo que no se consideraron procesos de regeneración de la vegetación.

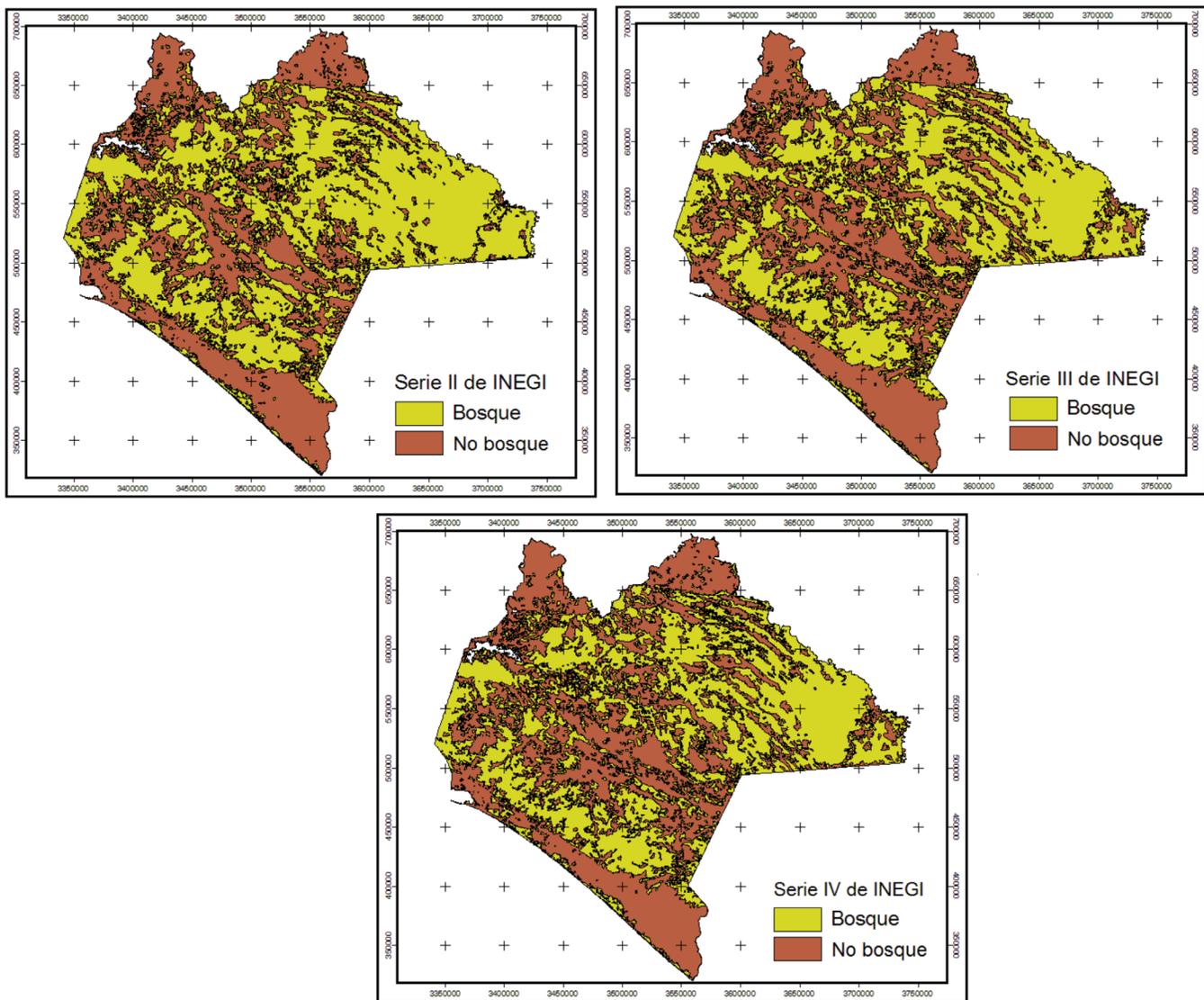


Figura 6. Categoría Bosque en las series II, III y IV del INEGI.

Las Figuras 7 a 11, muestran los mapas de clases de cobertura generadas (resolución temporal de 30 m) para el periodo 1992 a 2010.

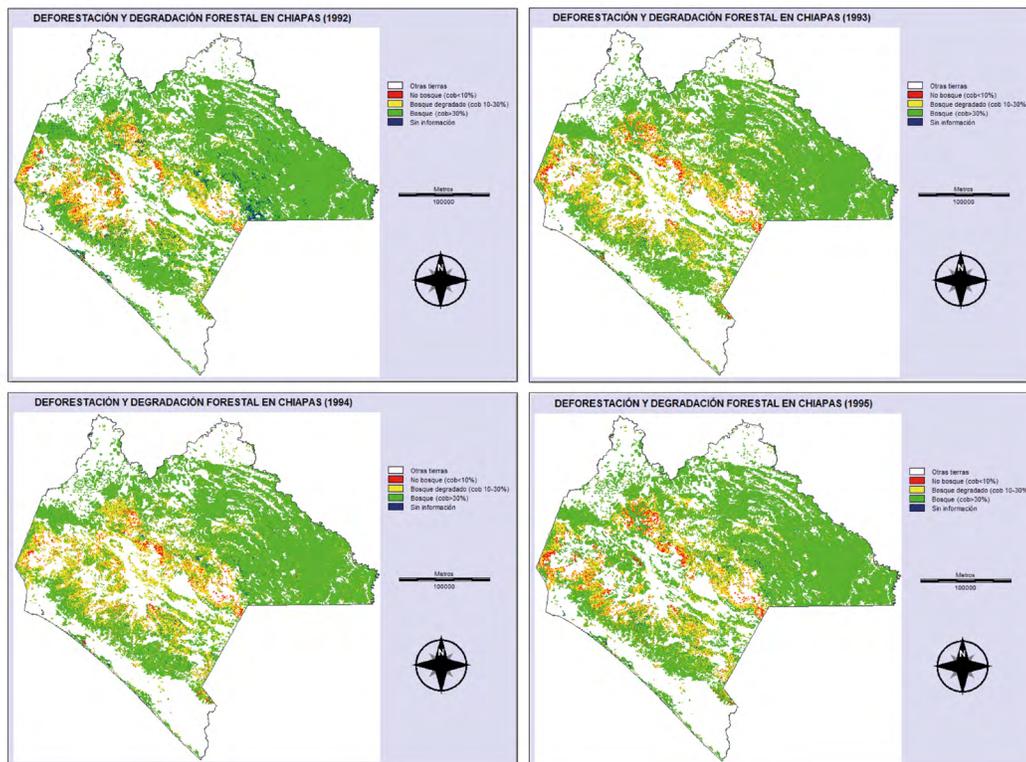


Figura 7. Deforestación y degradación forestal en Chiapas en los años 1992-1995.

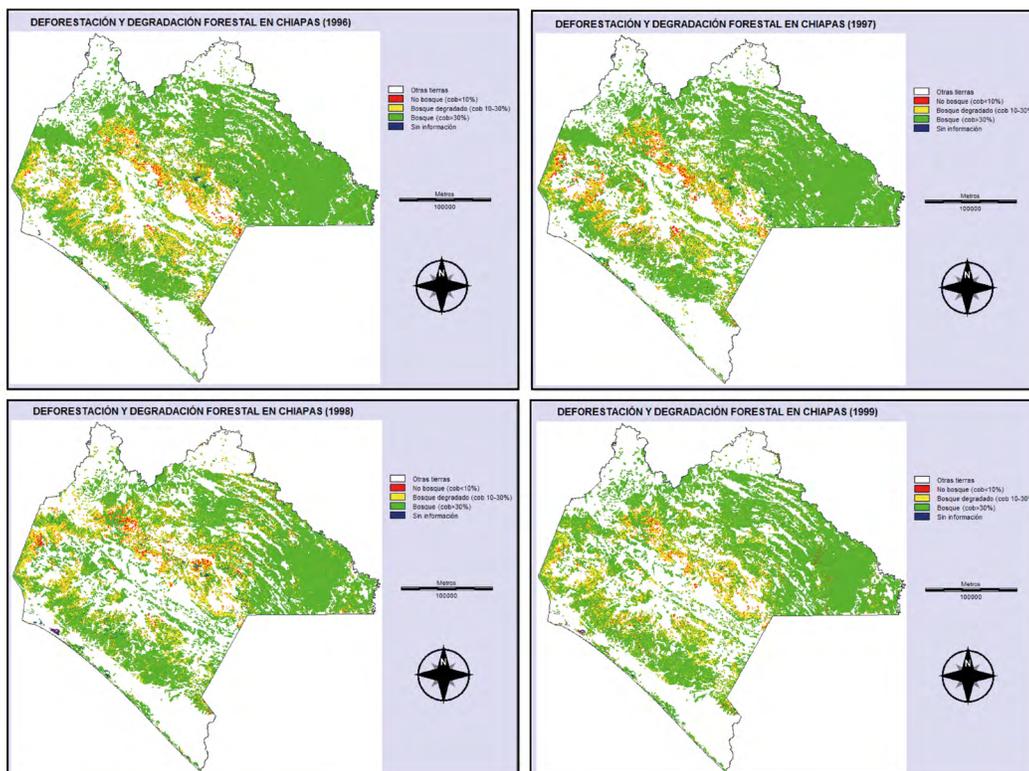


Figura 8. Deforestación y degradación forestal en Chiapas en los años 1996-1999.

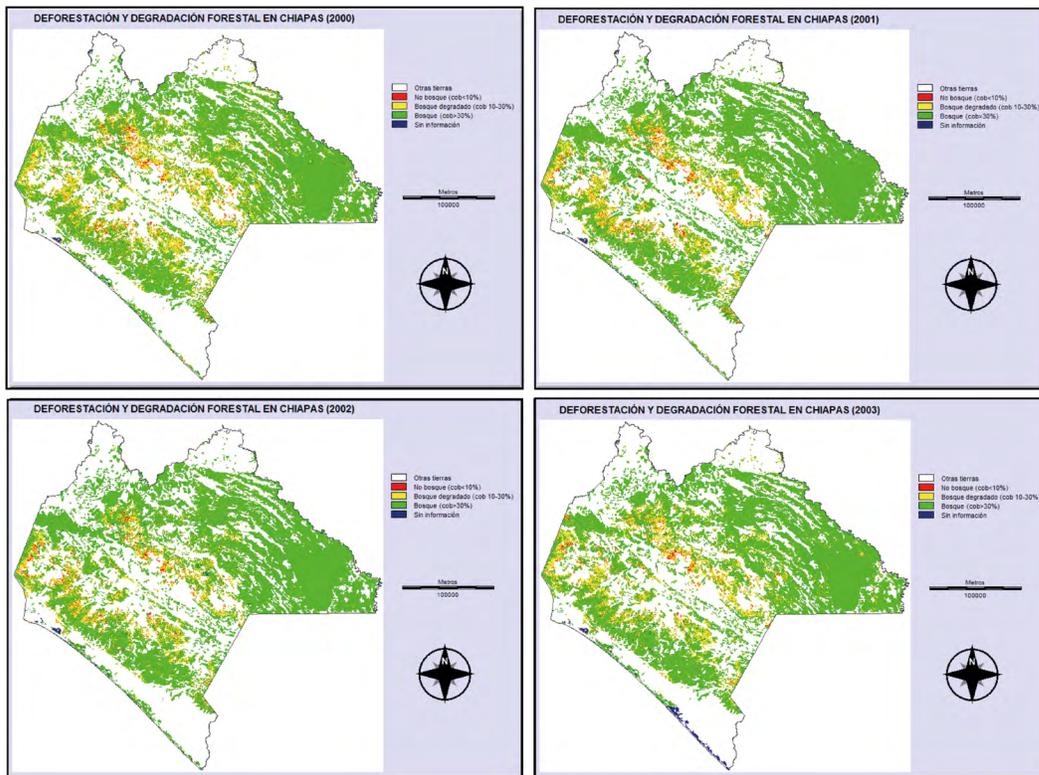


Figura 9. Deforestación y degradación forestal en Chiapas en los años 2000-2003.

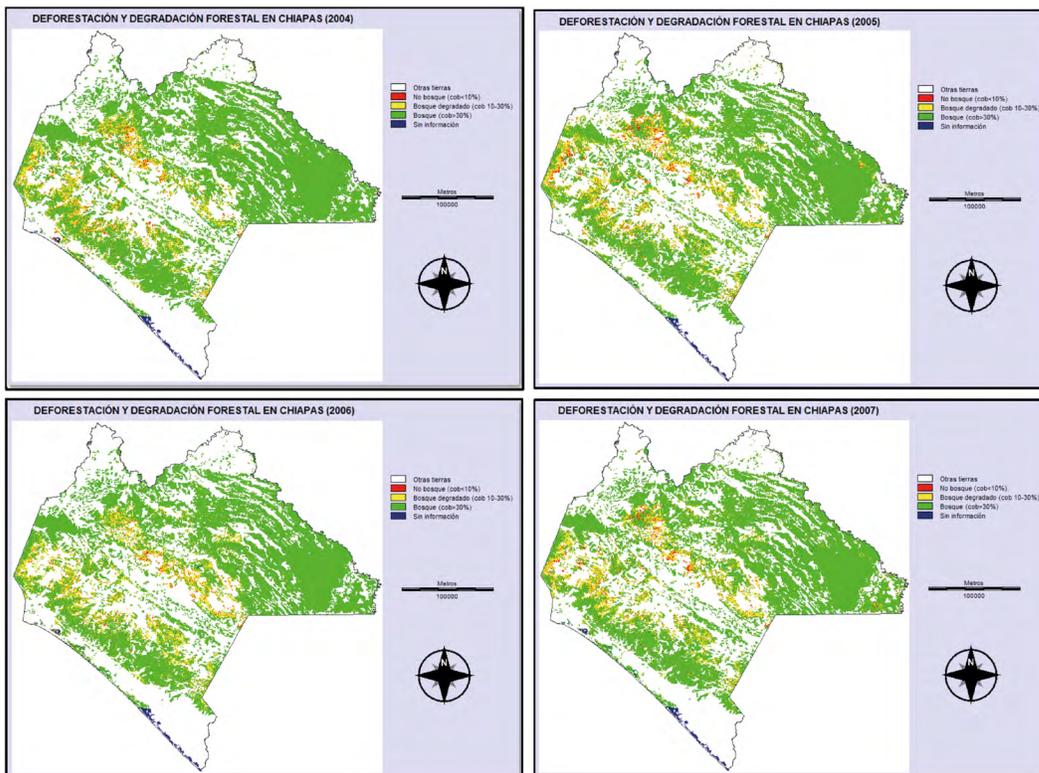


Figura 10. Deforestación y degradación forestal en Chiapas en los años 2004-2007.

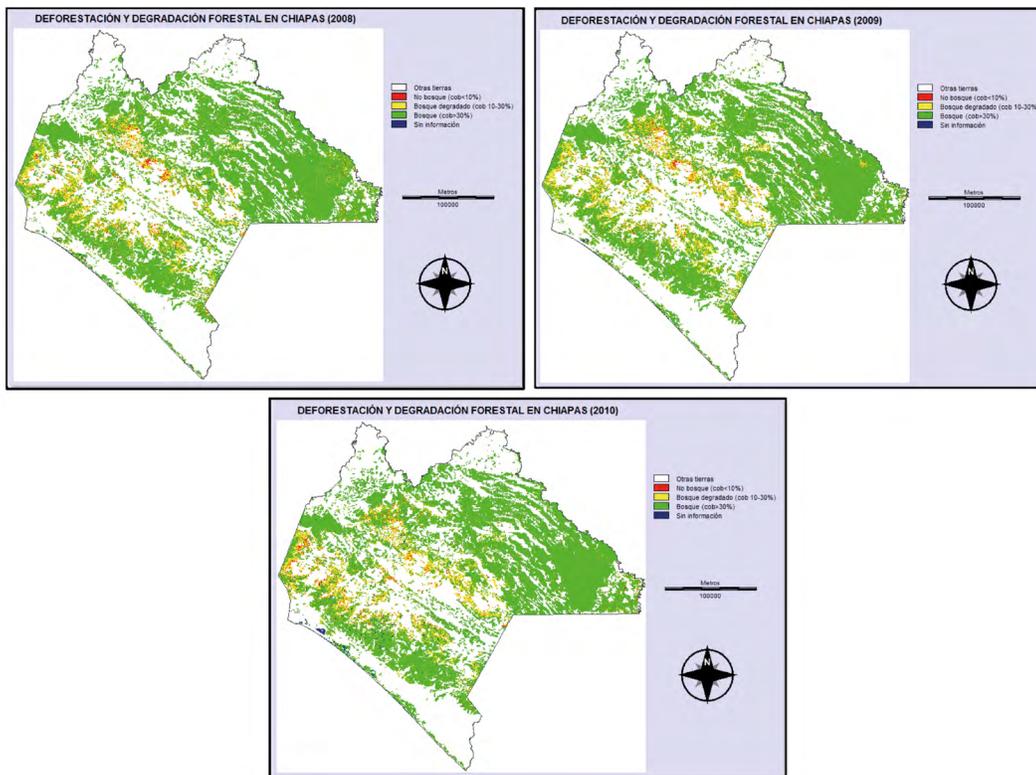


Figura 11. Deforestación y degradación forestal en Chiapas en los años 2008-2010.

La validación de los productos temáticos se realizó usando 1750 puntos de control (Figura 12) con información de campo, u obtenida de imágenes

espectrales de muy alta resolución espacial (1 m). El Cuadro 3 muestra los errores de estimación obtenidos, que tienen una kappa global de 0.9485.

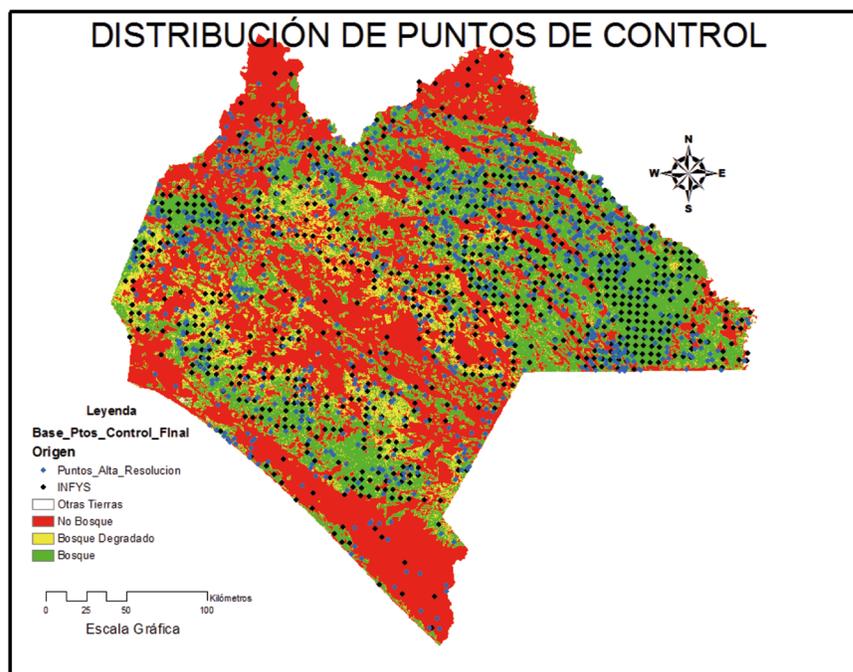


Figura 12. Distribución de los puntos de control para la validación de mapa de USyV.

**Cuadro 3. Análisis de los errores de la validación del mapa de USyV.**

	No Bosque	Bosque Degradado	Bosque	Total	Error de Comisión
No Bosque	272	3	1	276	0.0145
Bosque Degradado	0	179	24	203	0.1182
Bosque	2	9	1271	1271	0.0087
Total	274	191	1285	1750	
Error de Omisión	0.0073	0.628	0.0195		0.0223

**Integración de estadísticos con datos de actividad**

Una vez que se obtuvieron los mapas de deforestación y degradación forestal, se generaron estadísticos de la superficie ocupada por las clases que se reportan en los mismos, considerando cuatro escalas de consulta: predios, municipios, subcuencas y estatal.

Un elemento importante en este ejercicio fueron los mapas de clases de vegetación del INEGI (derivados de las series II, III y IV de uso del suelo y vegetación), estos últimos se emplearon para desglosar la superficie según las clases de vegetación presente en cada unidad de consulta. Los pasos generales para la consulta se esquematizan en la Figura 13.



**Figura 13. Esquema general del proceso de consulta de la información de los mapas de deforestación y degradación forestal.**

Para ejecutar el proceso que se indica en la Figura 13 se programó una rutina de programación. El primer paso consistió en integrar una base multi-temporal con los mapas de deforestación y degradación forestal. Sobre esta base, se consultó la información para cada uno de los polígonos del mapa de clases de vegetación. Debido a que se cuenta con tres mapas de este tipo (serie II, III y IV) se alternó el uso de ellos dependiendo del año de la información consultada. En el Cuadro 4 se indica el orden de uso de estos mapas. Sobre los resultados del paso 2, se realizó una nueva consulta para extraer la información en cada polígono del mapa de la escala de interés (predios, municipios, subcuencas o estado). Con los resultados de esta segunda consulta se

integraron los estadísticos de salida, éstos se encuentran desglosados según el o los tipos de vegetación presentes en el polígono consultado.

#### **Integración de mapas de clases vegetación de las series II, III y IV de INEGI**

Los insumos se generaron agrupando las clases de uso del suelo y vegetación de las series II, III y IV (INEGI, 2007a, b y c), en las 31 categorías que se describen en el Cuadro 5.

Con las clases que se indican en el Cuadro 5 se generaron los mapas de vegetación que se muestran en las Figuras 14, 15 y 16

**Cuadro 4. Mapa de clases de vegetación empleado con cada periodo de información de la base de deforestación y degradación forestal.**

<b>Periodo de información (deforestación y degradación forestal)</b>	<b>Mapa de clases de vegetación empleado en la consulta</b>
1992 – 1999	SERIE II (año base 1993)
2000 – 2004	SERIE III (año base 2002)
2005 – 2009	SERIE IV (año base 2007)

**Cuadro 5. Clases de vegetación derivadas de las series II, III y IV de INEGI.**

<b>CLASE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
NB permanente	Agrupar clases como: cuerpos de agua, zonas urbanas y asentamientos humanos
NB INEGI	En esta categoría se agruparon las superficies agrícolas, los pastizales y otras tierras con vegetación no clasificable en la categoría "bosque"
BA	Vegetación primaria de bosque de Oyamel
BB	Vegetación primaria de bosque de Cedro
BC	Bosque cultivado de ciclo permanente
BG	Vegetación primaria de bosque de Galería
BM	Vegetación primaria de bosque de Mesófilo de montaña
BP	Vegetación primaria de bosque de Pino
BPQ	Vegetación primaria de bosque de Pino-Encino

**Cuadro 5. Clases de vegetación derivadas de las series II, III y IV de INEGI (Continuación).**

<b>CLASE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
BQ	Vegetación primaria de bosque de Encino
BQP	Vegetación primaria de bosque de Encino-Pino
ML	Vegetación indefinida de Chaparral
SAP	Vegetación primaria de Selva Alta Perennifolia
SBP	Vegetación primaria de Selva Baja Perennifolia
SBQ	Vegetación primaria de Selva Baja Subperennifolia
SBC	Vegetación primaria de Selva Baja Caducifolia
SG	Vegetación primaria de Selva de Galería
SMQ	Vegetación primaria de Selva Mediana Subperennifolia
VM	Vegetación primaria de Manglar
VS/BM	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de bosque de Mesófilo de montaña
VS/BP	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de bosque de Pino
VS/BPQ	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de bosque de Pino-Encino
VS/BQ	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de bosque de Encino
VS/BQP	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de bosque de Encino-Pino
VS/ML	Vegetación secundaria de Chaparral
VS/SAP	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de Selva Alta Perennifolia
VS/SBQ	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de Selva Baja Subperennifolia
VS/SMQ	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de Selva Mediana Subperennifolia
VS/VM	Vegetación secundaria de Manglar
VS/SBC	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de Selva Baja Caducifolia
VS/SMS	Vegetación secundaria (arbustiva + herbácea) de Selva Mediana Subcaducifolia

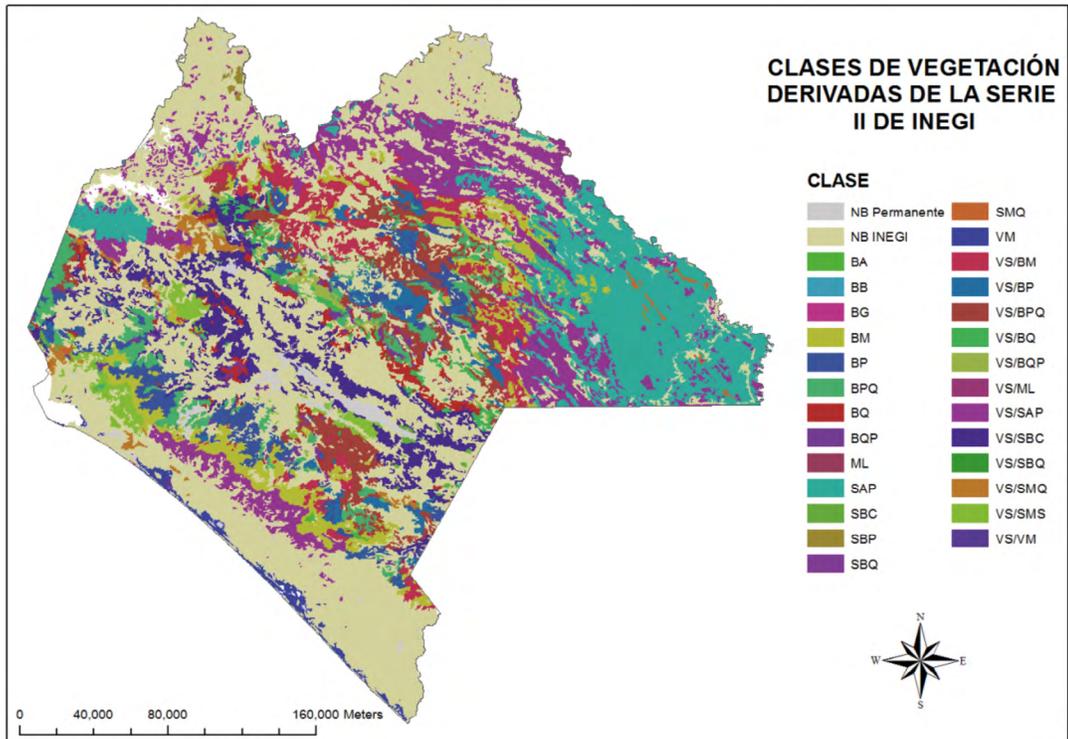


Figura 14. Clases de vegetación, derivadas de la Serie II de INEGI.

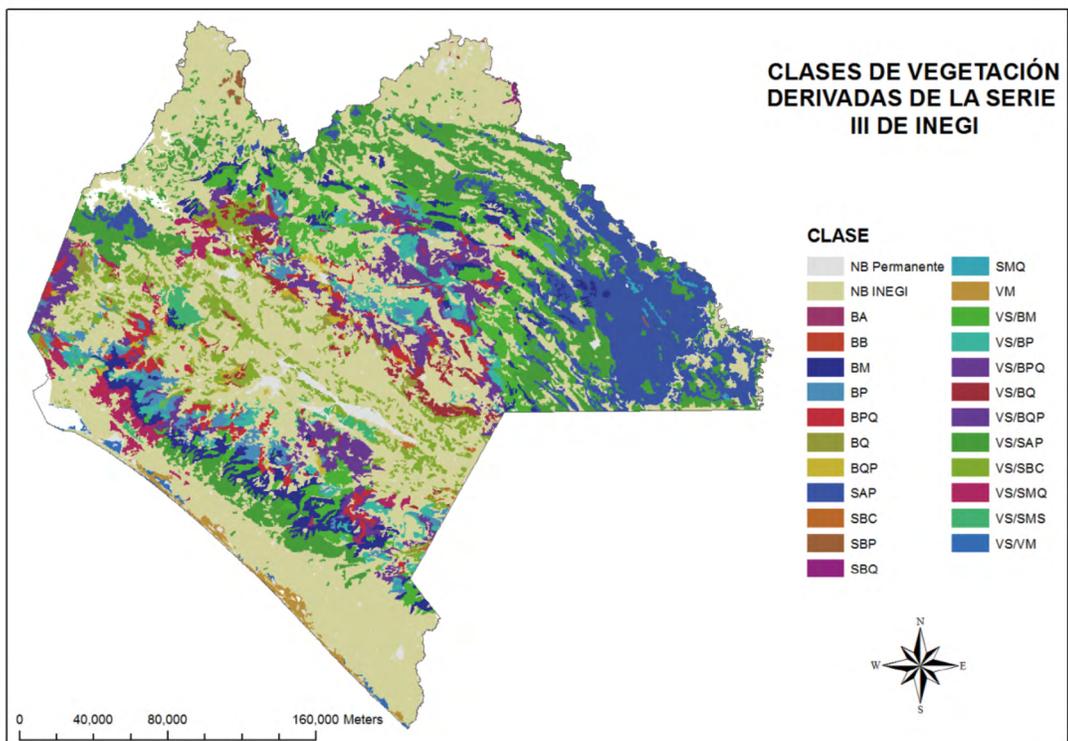


Figura 15. Clases de vegetación, derivadas de la Serie III de INEGI.

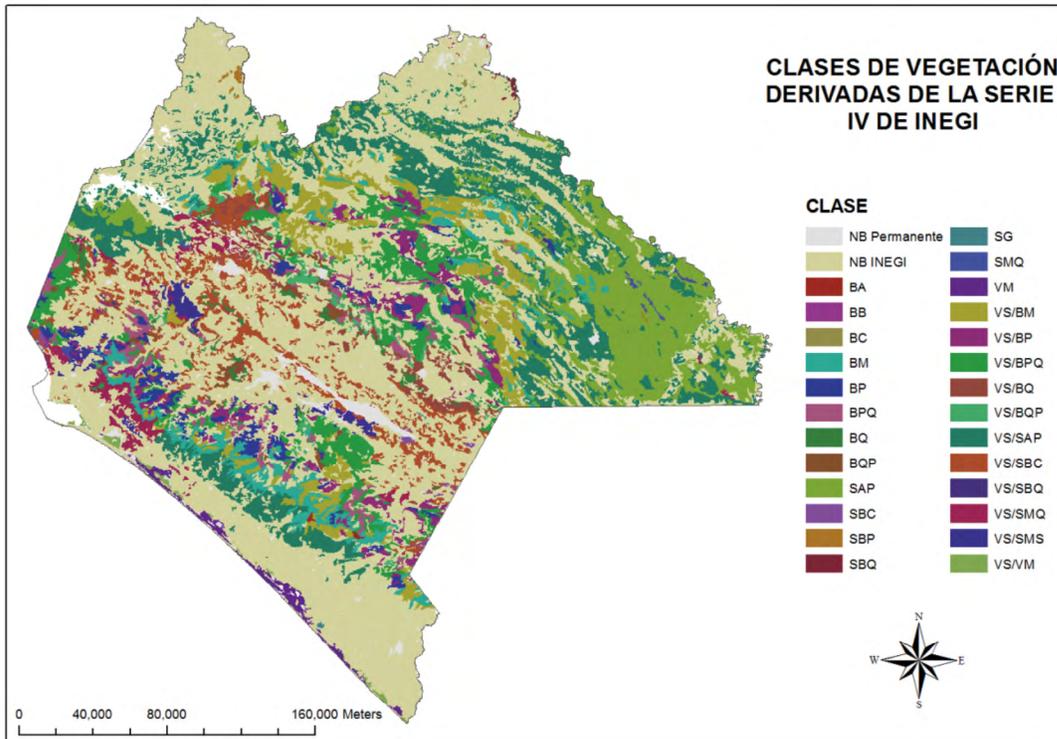


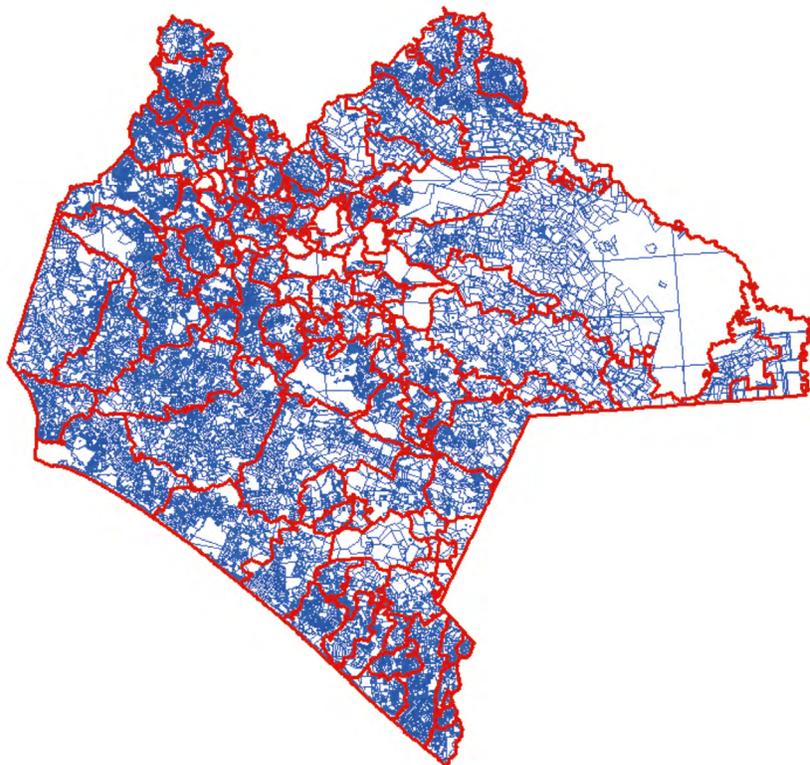
Figura 16. Clases de vegetación, derivadas de la Serie IV de INEGI.

### Integración de mapas de las escalas espaciales de consulta

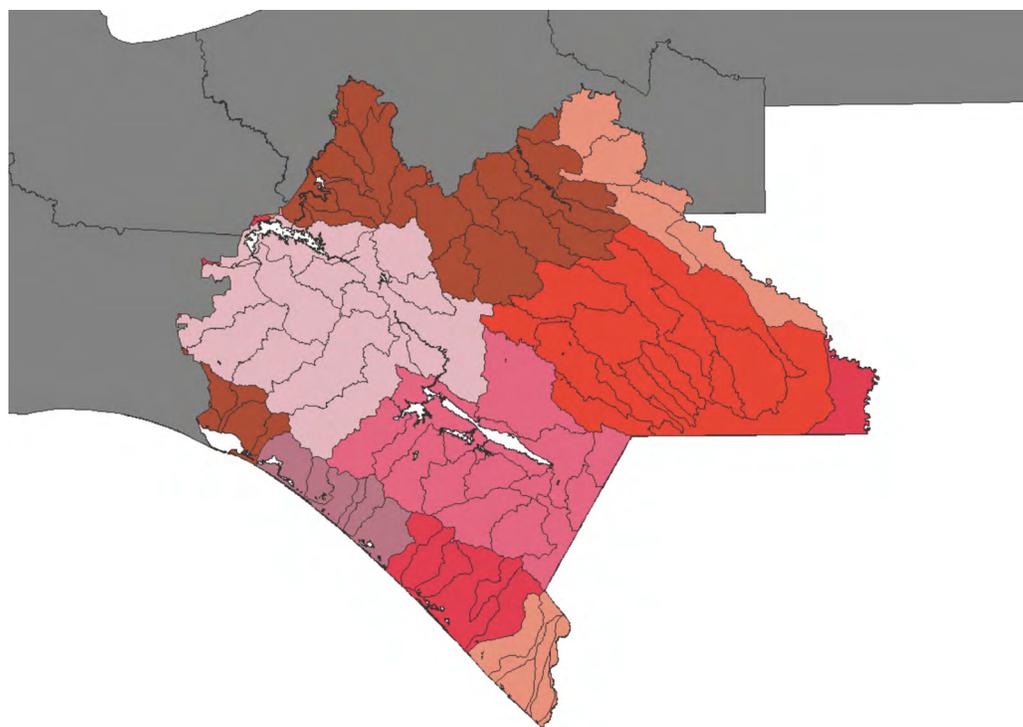
Como se mencionó con anterioridad, para consultar la información de los mapas de deforestación y degradación forestal se consideraron cuatro escalas: predios, municipal, subcuencas y estatal, a partir de las cuales se integró un mapa para cada escala. En el caso de predios se consideraron todos los tipos de propiedad reportados en las bases del RAN y PROCEDE-INEGI. Una vista de este mapa se muestra en la Figura 17.

Es importante aclarar que los insumos de predios catastrales (17 863) representan una superficie total de 5 309 296 ha, que corresponde al 72.5% de la superficie total del estado (7 327 231 ha), por lo que las estimaciones de almacenes y flujos no son los totales para el estado. No obstante, producto de la integración catastral disponible, los resultados que se reportan son representativos del estado, regiones y municipios.

La Figura 18 muestra el mapa con las subcuencas hidrológicas en Chiapas, para un análisis conjunto agua-carbono.



**Figura 17. Mapa de predios y municipios en Chiapas.**



**Figura 18. Mapa de subcuencas hidrológicas en Chiapas.**

## ESTIMACIÓN DEL CARBONO TOTAL Y FLUJO NETO DE CO<sub>2</sub>, A NIVEL DE PREDIOS EN CHIAPAS

Con los datos de actividad generados en la sección anterior, el siguiente paso consistió en la estimación de los factores de emisión y el cálculo del carbono total anual en los diferentes niveles de agrupación espacial utilizados.

### Estimación de las densidades de carbono y sus incertidumbres

Para armonizar la generación de escenarios de referencia estatal con el Plan de Acción ante el cambio Climático de Chiapas o PACCCCh (SEMAHN, 2011; Franco *et al.*, 2012), se utilizaron las densidades del carbono (factores de emisión) de los usos del suelo de dicho trabajo. El inventario estatal de GEI del sector uso del suelo y cambio de uso del suelo (de Jong *et al.*, 2010b) utilizó factores de emisión derivados de la información del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en Chiapas. La Figura 19 muestra la distribución de los 893 conglomerados muestreados en

el periodo 2004-2007. Cada conglomerado tiene cuatro sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup>, dispuestos en forma de Y invertida, en donde en cada sitio se tomaron mediciones de altura, diámetro a la altura del pecho, etc., a nivel de árbol (CONAFOR, 2004).

La biomasa viva subterránea se estimó utilizando la relación de Cairns *et al.* (1997):

$$BmS = \exp[-1.0587 + \{0.8836 \ln(BmA)\}] \quad (1)$$

donde *BmA* es la biomasa viva aérea (t m.s. ha<sup>-1</sup>) y *BmS* es la biomasa viva subterránea (t m.s. ha<sup>-1</sup>).

En el caso del carbono orgánico en el suelo (COS), dado que en la campaña de muestreo del INFyS de la CONAFOR no se tomaron muestras de suelo, se utilizó la base de perfiles de suelo del INEGI (1998) para realizar estimaciones. La Figura 20 muestra la distribución de los 245 perfiles (profundidad hasta 1.0 m) disponibles.

El Cuadro 6 muestra las densidades materia seca (biomasa viva aérea y subterránea -Bm) usadas en la generación de escenarios de referencia para los usos del suelo en Chiapas.

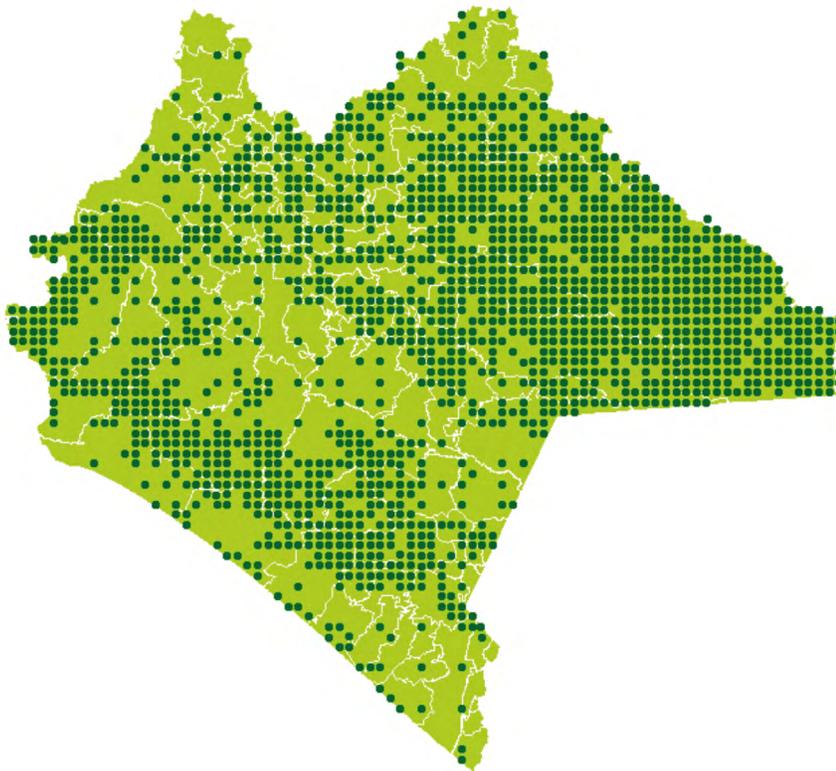


Figura 19. Distribución de los conglomerados del INFyS de la CONAFOR (2004-2007).



Figura 20. Distribución de los perfiles de suelo del INEGI-COLPOS.

Cuadro 6. Densidades de materia seca (Bm viva) de los usos del suelo.

Uso de Suelo	Promedio Bm viva (t m.s. ha <sup>-1</sup> )	Desv. Est. Bm Viva (t m.s. ha <sup>-1</sup> )
SAP	211.3	155.1
BM	211.0	187.8
SMQ	200.8	133.7
BP	162.5	84.4
BPQ	144.8	102.9
BQ	143.4	65.0
BQP	138.9	75.5
SMQ/VSa	132.8	111.0
BQP/VSa	123.9	110.7
BM/VSA	123.6	128.5
BP/VSA	120.8	92.8
SAP/VSa	113.3	131.5
SMS/VSA	108.2	79.6
PI	102.9	104.8
BQ/VSA	100.7	67.2

**Cuadro 6. Densidades de materia seca (Bm viva) de los usos del suelo.**

Uso de Suelo	Promedio Bm viva (t m.s. ha <sup>-1</sup> )	Desv. Est. Bm Viva (t m.s. ha <sup>-1</sup> )
BPQ/VSA	99.3	66.9
TP	93.5	63.6
BM/VSh	92.5	78.5
PC	88.0	86.2
SBC/VSA	86.5	74.9
VP	85.7	68.5
TA	73.5	60.6
VM	61.7	84.2
SBC	61.4	59.0
VM/VSa	59.8	59.9
RA	10.3	8.2
Agricultura	13.0	10.4
Pastizal	21.0	16.8

Nota: Los valores en rojo fueron estimados de relaciones empíricas de los otros usos del suelo.

El Cuadro 7 muestra las estimaciones del carbono orgánico de los suelos (COS), profundidad de 30 cm, para los usos del suelo de Chiapas (Paz *et al.*, 2010a). En el caso de que algún uso del suelo, en el almacén

de biomasa viva o COS, no contara con información, se le asignó un valor promedio de acuerdo con el tipo genérico de uso del suelo a que pertenecía.

**Cuadro 7. Densidades de carbono del carbono orgánico de los suelos.**

Clase de Uso del Suelo	Primario		Secundario	
	COS Promedio (t C ha <sup>-1</sup> )	COS Desv. Est. (t C ha <sup>-1</sup> )	COS Promedio (t C ha <sup>-1</sup> )	COS Desv. Est. (t C ha <sup>-1</sup> )
Bosque de coníferas	105.7	60.0	83.2	51.6
Bosque de encino	115.4	75.8	90.7	57.2
Bosque mesófilo de montaña	219.1	153.8	172.2	118.5
Selva caducifolia	111.7	73.0	87.8	51.7
Selva espinosa	79.4	48.8	62.4	36.0
Selva perennifolia	136.8	91.9	88.3	55.5
Selva sub-caducifolia	124.4	82.6	97.8	62.6
Vegetación hidrófila	176.1	121.4	138.4	93.1
Pastizal	44.8	22.7		
Vegetación inducida	50.0	26.7		
Sin vegetación aparente	35.2	15.5		
Agricultura	47.6	24.9		

### Estimación de almacenes de carbono anuales a nivel de predios

Los almacenes de carbono total (biomasa viva más suelo) en un determinado año, se estiman multiplicando las superficies (ha) de un uso del suelo, por su factor de emisión (densidad de carbono). Para tener estimaciones multi-escala armonizadas del carbono total asociado, se utilizó una escala mínima a nivel de predios y de allí se procedió a integrar las estimaciones a escalas superiores (municipios, subcuencas y estado). En el caso de las estimaciones del carbono total a nivel de predio, se consideraron solo las clases no bosque o NB (NB + OT + SI), bosque o B y bosque degradado o BD. Para las estimaciones de las clases de uso a nivel de suelo, solo se consideró la clase de uso del suelo

predominante (mayor superficie) en cada predio y con las densidades de carbono asociadas a esta clase (B y BD), se estimó el carbono total. Para la clase NB se utilizó una densidad promedio de esta clase de uso.

La Figura 21 muestra algunos ejemplos de predios de Chiapas con relación a la variación temporal del carbono total (biomasa viva + suelos), donde se observan diferentes patrones. La información relacionada a propietarios y localización de los predios ha sido reservada por asuntos de confidencialidad relacionada a la privacidad de la información.

En la Figura 22 se muestran los flujos de CO<sub>2</sub> para el periodo 1992-2010 de cada uno de los predios de Chiapas, para visualizar la distribución geográfica de las emisiones de GEI.

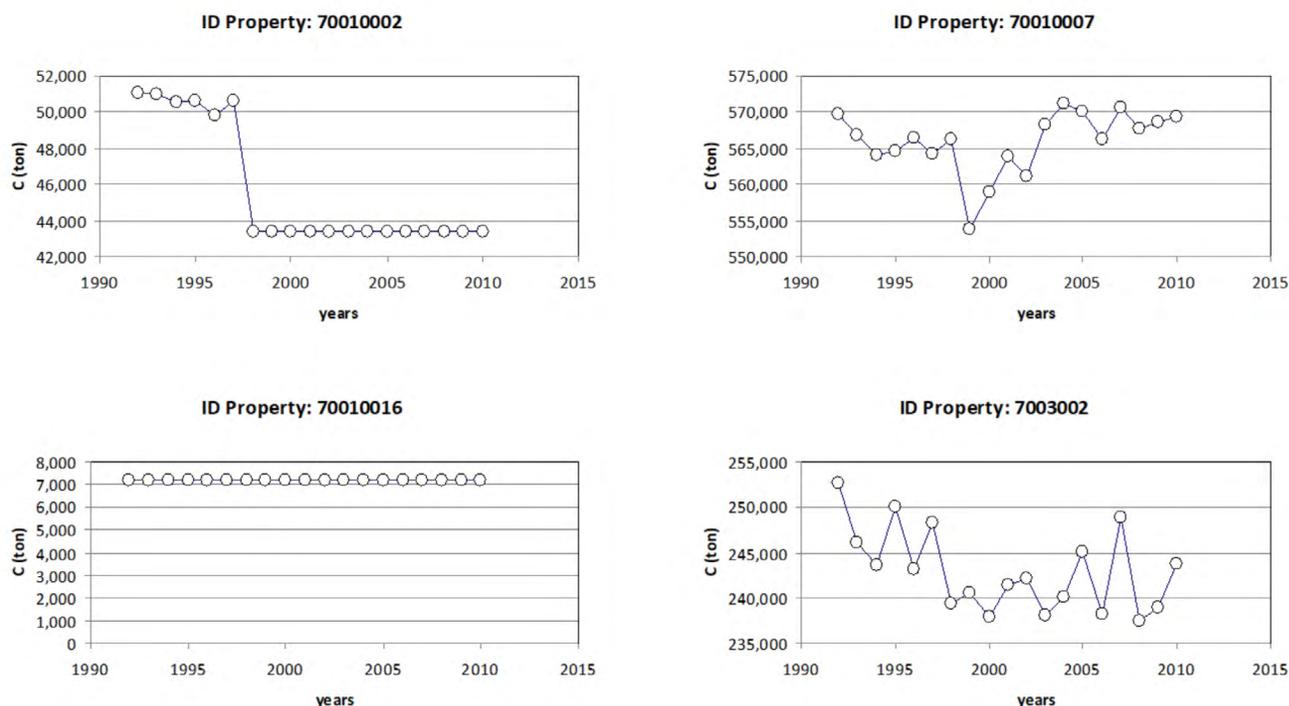


Figura 21. Patrones temporales del carbono total en algunos predios de Chiapas.

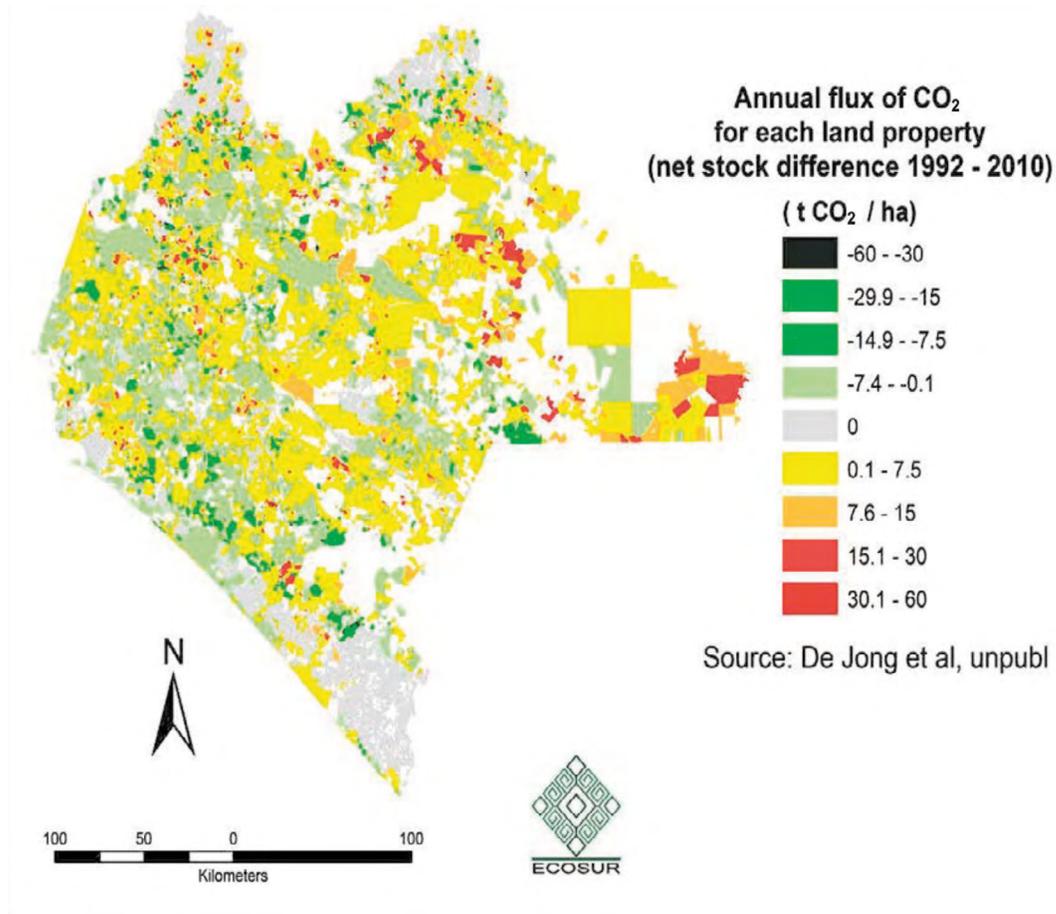


Figura 22. Emisiones de GEI de los predios en el estado de Chiapas.

**Estimación de almacenes de carbono anuales a nivel de municipios y subcuencas**

Con la información de carbono total, generada nivel de predios, se integraron estadísticos a escala de municipios y subcuencas. En términos generales, el procedimiento consistió en sumar el carbono total de los predios interceptados por cada polígono de agregación (subcuencas o municipios). En los predios interceptados por dos o más polígonos de agregación, el carbono total

se distribuyó por fracción de superficie. Las Figuras 23 y 24 muestran ejemplos de los patrones de distribución temporal del carbono total en algunos municipios de Chiapas y, la Figura 25, presente la misma información para dos subcuencas analizadas en el estado. A partir de las estimaciones de carbono total, se analizaron los patrones multi-temporales en diferentes niveles de agregación: municipios, subcuencas y estado. Los análisis se realizaron en términos de t de CO<sub>2</sub> (t C x 44/12).

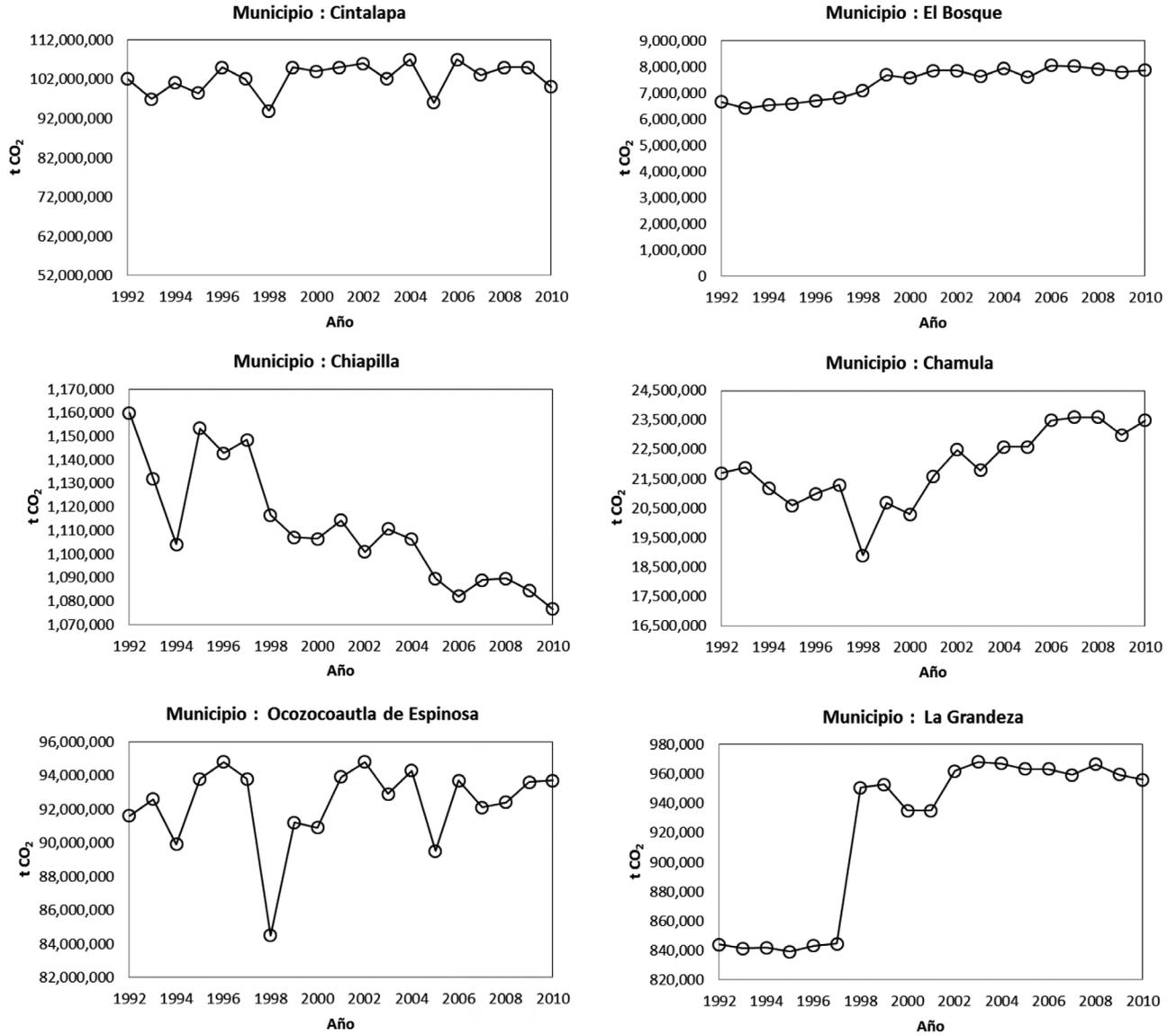


Figura 23. Patrones temporales de los almacenes de CO<sub>2</sub> en seis municipios de Chiapas.

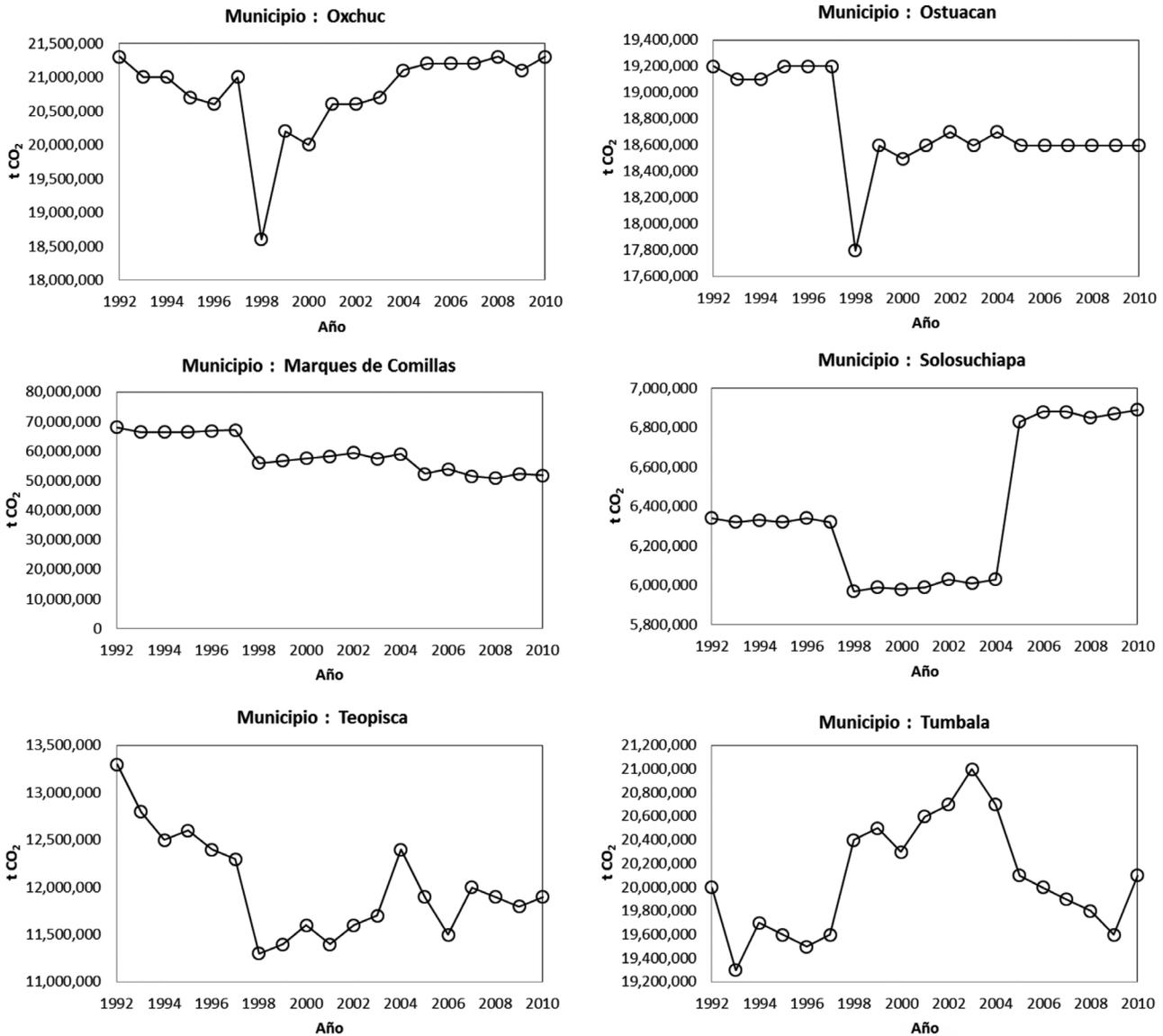


Figura 24. Patrones temporales de los almacenes de CO<sub>2</sub> en seis municipios de Chiapas.

Los patrones temporales para municipios de Chiapas mostrados, algunos presentan el efecto de los incendios de 1998 y el Huracán Stan en el 2005,

los cuales están bien diferenciados de los patrones normales y en otros municipios, no afectados, estos eventos no son evidentes o solo tienen poco impacto.

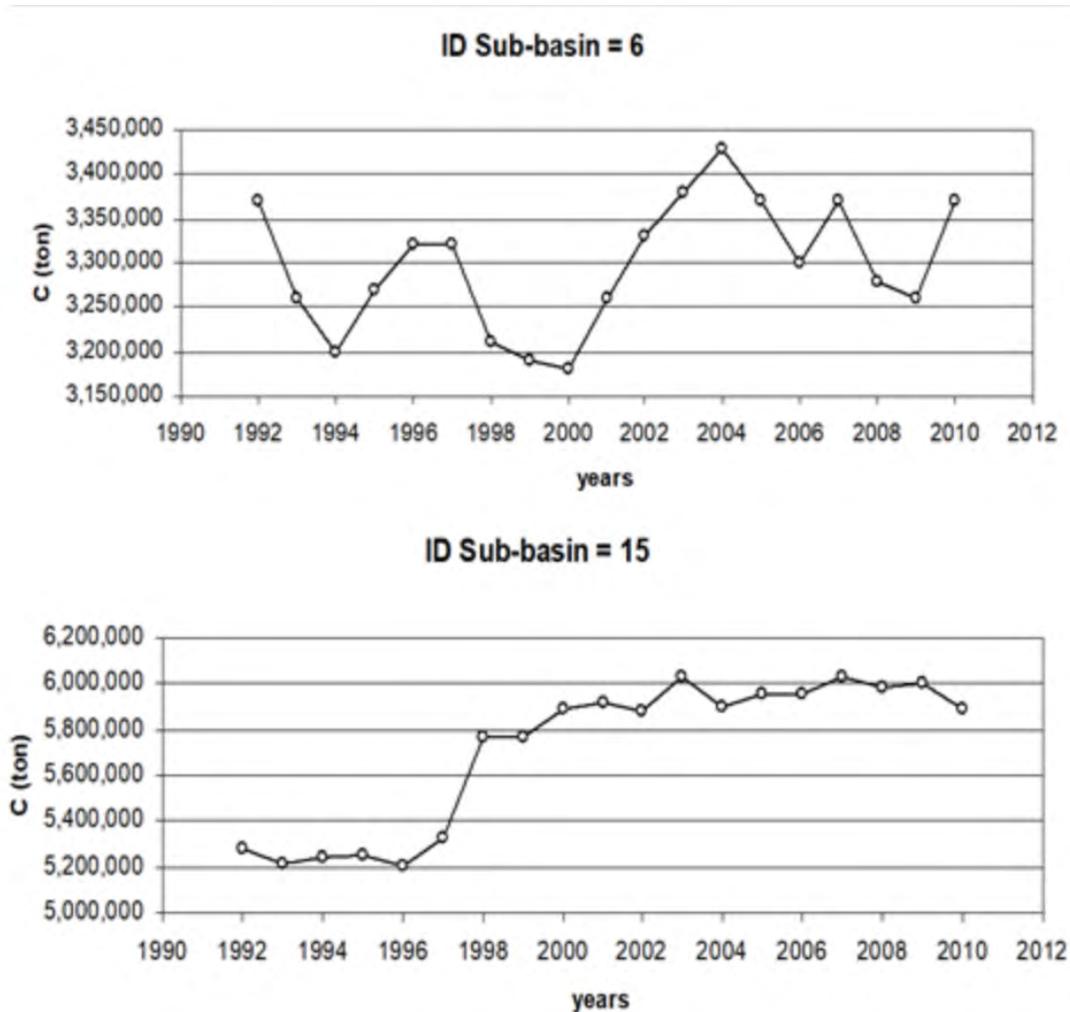


Figura 25. Patrones temporales de los almacenes de CO<sub>2</sub> en dos subcuencas de Chiapas.

### GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE REFERENCIA MULTI-ESCALA

#### Escenarios de referencia para el estado de Chiapas

La Figura 26 muestra el patrón 1992-2010 de los almacenes de CO<sub>2</sub> para el estado de Chiapas. Los almacenes de CO<sub>2</sub> para Chiapas se estimaron de la suma de los almacenes de los municipios en el estado, que difieren ligeramente de la suma de almacenes de las subcuencas por las aproximaciones usadas de discretización (predios). Se observan los efectos de eventos extremos (incendios de 1998 y Huracán Stan en 2005), donde se muestra la vulnerabilidad de REDD+ ante estos impactos fuera de control humano.

De los patrones que se observan en la Figura 25, se ajustaron tres escenarios de referencia inerciales (históricos):

**Escenario 1992 - 2010**  
 $CO_2(t) = a_1 + b_1 \text{año}$

**Escenario 2000 - 2010**  
 $CO_2(t) = a_2 + b_2 \text{año}$

**Escenario 2006 - 2010**  
 $CO_2(t) = a_3 + b_3 \text{año}$

En la Figura 27 se muestran los ajustes de los tres escenarios de referencia discutidos para el caso del estado de Chiapas.

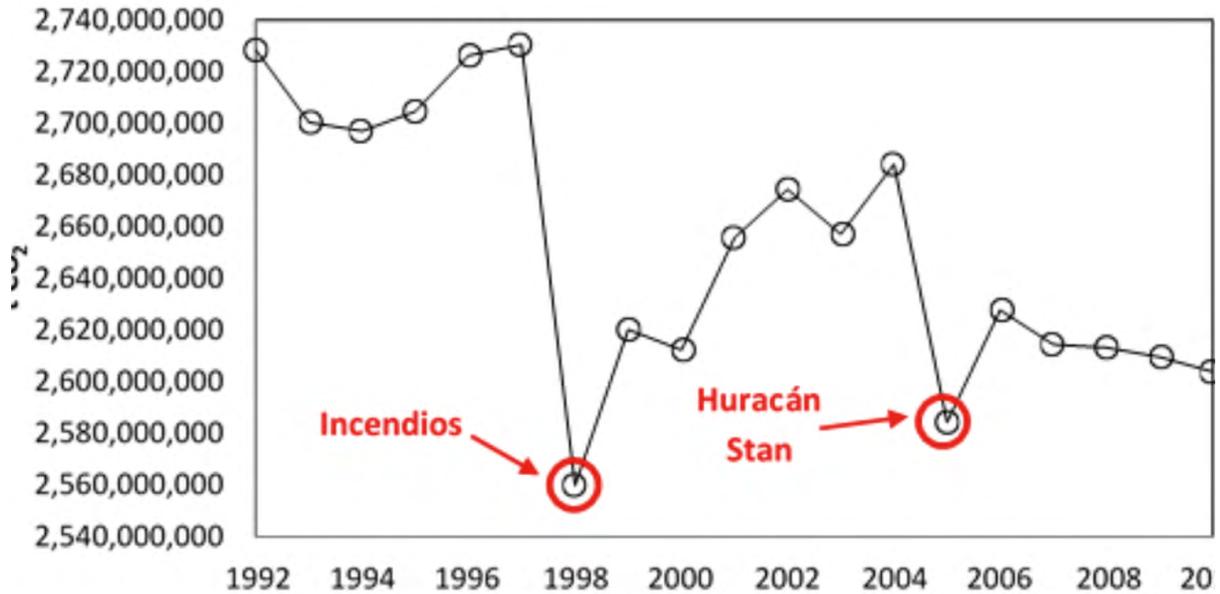


Figura 26. Evolución temporal de los almacenes de CO<sub>2</sub> del estado de Chiapas.

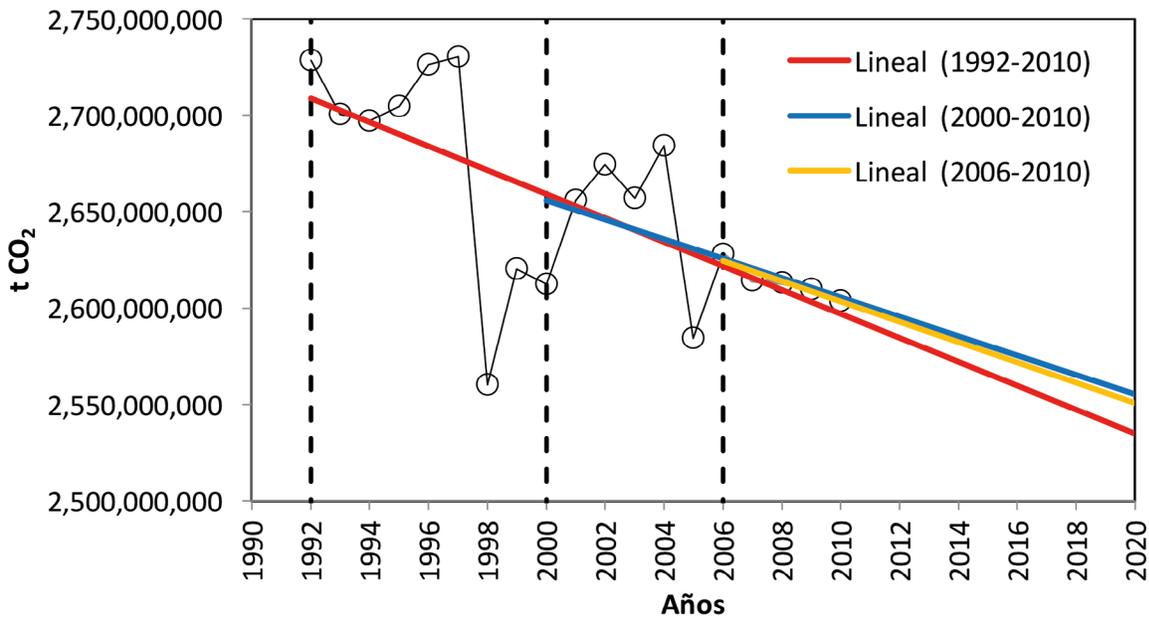


Figura 27. Proyección de tres escenarios de referencia para el estado de Chiapas.

### Escenario de referencia para Chiapas en términos de flujos

Una forma alternativa de visualizar el escenario de referencia para el estado de Chiapas en términos de flujo de CO<sub>2</sub> (diferencia de almacenes de carbono entre años consecutivos) se muestra en la Figura 28.

De acuerdo con lo discutido anteriormente, el escenario de referencia, inercial, en términos de promedios de flujos de CO<sub>2</sub> está dado por: periodo 1992-2010 con -6.9 Mt CO<sub>2</sub>; periodo 2000-2010 con -0.86 Mt CO<sub>2</sub>; periodo 2006-2010 con -6.0 Mt CO<sub>2</sub>.

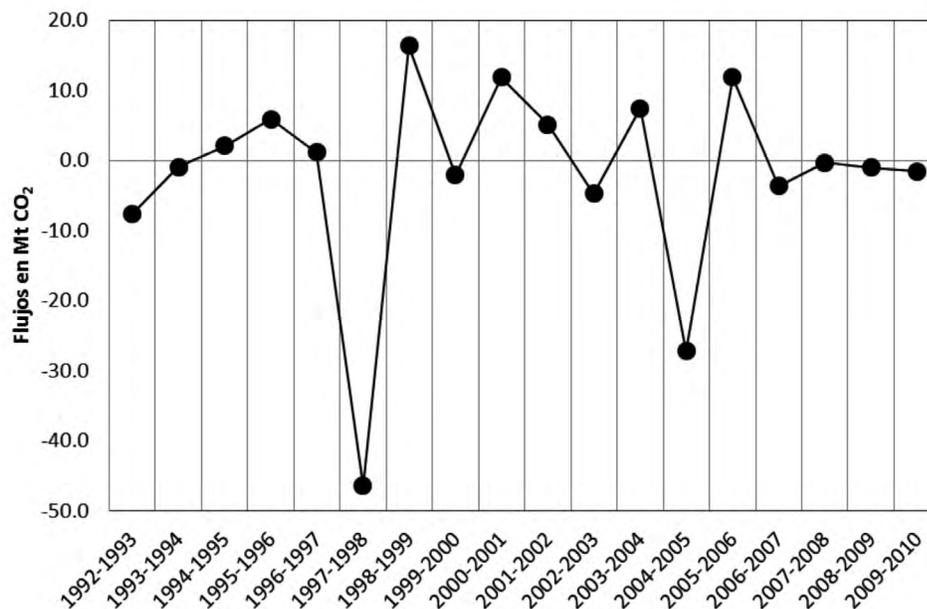


Figura 28. Escenarios de referencia inerciales para el estado de Chiapas en términos de flujos.

De acuerdo con lo discutido anteriormente, el escenario de referencia, inercial, en términos de promedios de flujos de CO<sub>2</sub> está dado por: periodo 1992-2010 con -6.9 Mt CO<sub>2</sub>; periodo 2000-2010 con -0.86 Mt CO<sub>2</sub>; periodo 2006-2010 con -6.0 Mt CO<sub>2</sub>.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los desarrollos mostrados acoplan en forma armónica datos de actividad nacionales (escala 1:250 000) con escalas locales de intervención para el mecanismo REDD+, con principios conservadores, permitieron la integración de información multi-escala de abajo hacia arriba y definiendo la “propiedad” de las acciones locales hacia los objetivos de REDD+; además de contribuir al problema de la tragedia de los comunes, al identificar predios que no cumplen con las metas de REDD+ e incentivando a los que sí.

Aun cuando es posible realizar ejercicios de construcción de escenarios de referencia en términos más sofisticados, particularmente con el uso de la fusión de imágenes satelitales de sensores pasivos (ópticos) y activos (radar y lidar), el enfoque utilizado en la aproximación mostrada es conservador y permite obtener una primera estimación, multi-escala, de la evolución temporal de los almacenes de carbono en el estado de Chiapas.

Una limitación intrínseca de ligar datos de actividad y factores de emisión es la clasificación taxonómica

usada en México por el INEGI, que muchas veces no tiene una asociación clara a clases de densidad de carbono o no es posible de diferenciar con el uso de sensores remotos.

El uso de información actualizada de la biomasa viva y suelo, además de la integración de mapas de uso del suelo escala 1:50 000 requeridos para la escala de implementación de REDD+, permitirá consolidar el enfoque propuesto en términos operacionales. En el aspecto histórico de los escenarios de referencia, es posible incorporar inventarios nacionales forestales previos para contar con tendencias de largo plazo.

La propagación de las incertidumbres asociadas a datos de actividad y factores de emisión no se realizó debido a que no se contó con estimaciones de incertidumbre confiables, de los datos de actividad multi-temporales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angelsen, A., C. Martius, V. De Sy, A.E. Duchelle, A.M. Larson and P.T. Thuy. 2018. REDD+: la transformación. Lecciones y nuevas direcciones. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Balderas-Torres, A. and M. Skutsch. 2012. Splitting the difference: a proposal for benefit sharing in reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+). *Forests* 3:137-154.
- Bolaños González, M.A. y F. Paz Pellat. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1:349-361.

- Cairns, M.A., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111, 1–11.
- Cano González, A., F. Paz, M.I. Marín, E. López, J. Chávez, M. Bolaños y J.L. Oropeza. 2018. Factor de reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes: modelación de los ángulos cenitales. *Terra Latinoamericana* 36:105-119.
- CONAFOR. 2004. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 97 p.
- CONAFOR. 2017. Estrategia Nacional para REDD+. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/bycc/redd-en-mexico/estrategia-nacional-redd-enaredd/> (Consulta: noviembre 12, 2017).
- de Jong, B., O. Maser, R.D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. Balbontín, M. Motolinía y G. Guerrero. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1993-2002. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y bosques. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D.F., México 78 p. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C.O. Cruz y J. A. Argumedo. 2009. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1990-2006. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D.F., México 119 p. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- de Jong, B., C. Anaya, O. Maser, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero and C. Balbontin. 2010a. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701.
- de Jong, B., F. Rojas, M. Olguin, V. de la Cruz, F. Paz, G. Jiménez y M.A. Castillo. 2010b. Establecimiento de una línea base de las emisiones actuales y futuras de Gases de Efecto Invernadero provenientes de Agricultura, Silvicultura y otros usos del suelo. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- de Jong, B., F. Paz-Pellat, F. Rojas-García, D.R. Aryal, O. Maser-Cerutti, R.D. Martínez-Bravo, V. Salas-Aguilar, M. Casiano-Domínguez, S. Covalada-Ocón, J.D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Rodríguez y R. Vargas. 2019. Capítulo 19: Bosques y selvas. pp. 386-435. En: F. Paz-Pellat, J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A.S. Velázquez-Rodríguez. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Franco, J.C., A. Callejas, S. Ramos, B. de Jong, F. Paz, A. Parra, L. Gudiño, E. Díaz, H. Morales, G. Jiménez, M. Castillo, J.C. Carrillo, F. Line y J. Pascacio. 2012. Programa de acción ante el cambio climático del estado de Chiapas. pp. 732-740. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Griscom, B.W., J. Adams, P.W. Ellis, R.A. Houghton, G. Lomax, D.A. Miteva, W.H. Schlesinger, D. Shoch, J.V. Siikamäki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Compari, R.T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M.R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F.E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg and J. Fargione. 2017. Natural climate solutions. *PNAS* doi:10.1073/pnas.1710465114.
- Kohl, M., T. Baldauf, D. Plugge and J. Krug. 2009. Reduced emissions from deforestation and forest degradation (REDD): A climate change mitigation strategy on a critical track. *Carbon Balance Management* doi: 10.1186/1750-0680-4-10
- Hardin, G. 1968. The tragedy of the commons. *Science* 162: 1243-1248.
- INEGI. 1997. Base de datos geográficos. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación (vectorial). Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 56 p.
- INEGI. 1998. Información nacional sobre perfiles de suelo Versión 1.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2007a Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelos y vegetación escala 1:250,000 Serie II. México.
- INEGI. 2007b Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelos y vegetación escala 1:250,000 Serie III. México.
- INEGI. 2007c Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelos y vegetación escala 1:250,000 Serie IV. México.
- INEGI. 2009. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000. Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 77 p.
- IPCC 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Land Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Medrano, E., F. Ibarra, L.A. Palacios, I. Jiménez y F. Paz. 2012. SPIAS: un sistema para proceso de imágenes satelitales a escala de país. pp. 353-358. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), Estado Actual

- del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Medrano-Ruedaflares, E., F. Paz-Pellat y E. Chávez-Castillo. 2014. Nueva plataforma para el Sistema de Procesamiento de Imágenes Satelitales Integrado (SPIAS-I). pp. 261-267. En: F. Paz y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-2-9.
- Palacios, L.A., F. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. Ortiz, y A. Exebio. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+, *Agrociencia* 40: 613-626.
- Palacios Sánchez, L.A., F. Paz Pellat, J.L. Oropeza Mota, B. Figueroa Sandoval, M. Martínez Menes, C.A. Ortiz Solorio y A. Exebio García. 2018. Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana* 36:309-321.
- Paz, F. 2010. Documento de referencia para la estimación de la cobertura aérea anual de la vegetación y productos derivados, en el estado de Chiapas. Reporte preparado para Conservación Internacional México A.C: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 93 p. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- Paz, F. 2012. Una visión integral de territorio y su planeación ante el cambio climático: RETUS (Reducción de Emisiones de Todos los Usos del Suelo). pp. 693-699. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Paz, F. 2014. ¿Es suficiente evaluar “datos de actividad x factores de emisión = emisiones” en mecanismos tipo REDD+ o RETUS? pp. 471-477. En: F. Paz y J. Wong (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-2-9.
- Paz, F., C.O. Cruz, J.A. Argumedo, M.I. Marín y J. Etchevers. 2010a. Documento de referencia del carbono orgánico en el suelo (COS), en el Estado de Chiapas. Anexo 2 del Informe final consultoría para Conservación Internacional México A.C. 37 p. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- Paz, F., M.I. Marín, M. Reyes, F. Ibarra y F. Pascual 2010b. Documento de referencia para la estimación de la cobertura aérea anual de la vegetación y su tendencia de cambio en el estado de Chiapas. Reporte preparado para Conservación Internacional México A.C: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 93 p. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- Paz, F., M.I. Marín, E.R. Medrano, F. Ibarra y F. Pascual. 2010c. Elaboración de mapas multi-temporales de bosque, a partir de imágenes LANDSAT, TM y ETM+ y análisis de la degradación forestal y deforestación en Chiapas. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- Paz, F., B. de Jong, M. Reyes, F. Ibarra, M.I. Marín y M. Olguín. 2012. Un ejercicio de construcción de escenarios de referencia de carbono multi-escala en Chiapas. pp. 239-247. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Paz, F., A. Cano, M. Bolaños, J. Chávez, M.I. Marín y E. Romero. 2018. Factor de reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes: modelación global. *Terra Latinoamericana* 36:61-73.
- Paz-Pellat, F., A.S. Velázquez-Rodríguez, J.D. Etchevers-Barra, C.I. Hidalgo-Moreno, M. Bolaños-González, B. de Jong, S. Covalada-Ocón, M. Fuentes-Ponce, G. Vela-Correa, F. García-Oliva, Mario Guevara y R. Vargas. 2019. Capítulo 20: Suelos. pp. 436-468. En: F. Paz-Pellat, J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A.S. Velázquez-Rodríguez. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Paz-Pellat, F., V.M. Romero-Benítez, J.A. Argumedo-Espinoza, M. Bolaños-González, B. de Jong, J.C. de la Cruz-Cabrera y A. Velázquez-Rodríguez. 2019. Capítulo 23: Dinámica del uso del suelo y vegetación. pp. 529-572. En: F. Paz-Pellat, J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A.S. Velázquez-Rodríguez. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. D.F., México 81 p.
- SEMAHN. 2011. Programa de Acción Ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas. Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural del Estado de Chiapas. <http://www.cambioclimaticochiapas.org/portal/descargas/paccch/paccch.pdf> (Consulta: agosto 30, 2016).
- UNFCCC. 2014. La convención del cambio climático. Recuperado de [http://unfccc.int/portal\\_espanol/informacion\\_basica/la\\_convencion/items/6196.php](http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/items/6196.php).
- UNFCCC. 2015. The Paris Agreement. Recuperado de [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php).
- UNFCCC. 2016. Key decisions relevant for reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries (REDD+). Decision booklet REDD+. Recuperado de [http://unfccc.int/land\\_use\\_and\\_climate\\_change/lulucf/items/6917.php](http://unfccc.int/land_use_and_climate_change/lulucf/items/6917.php).