

Comparación de métodos de detección de cambio forestal en el marco del proyecto **Forests 2020**

*Comparison of Forest Change Detection Methods in the Framework of the **Forests 2020 Project***

Miguel Muñoz,* Miguel Castillo,** Felicia Line,*** Edith Mondragón,** Oswaldo Carrillo,* Richard Tipper*** y Catherine Navarro*

El monitoreo y medición precisa del cambio forestal son esenciales para evaluar el progreso hacia la reducción de emisiones por deforestación y degradación exigido por el *Acuerdo de París* bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático. No obstante, persisten amplias diferencias en las estimaciones de la extensión del bosque remanente y la tasa a la que se está perdiendo. Dichas variaciones se deben a una serie de factores entre los que destacan: las disparidades en la escala de los mapas, los métodos y los insumos utilizados e, incluso, en las propias definiciones de los conceptos *bosque* y *deforestación*. En este trabajo, en el marco del proyecto *Forests 2020*, se realizó un análisis comparativo entre distintos enfoques y métodos para detectar cambios en la cobertura forestal en una región de la Selva Lacandona en Chiapas con la finalidad de poner en perspectiva los distintos alcances y limitaciones de cada uno.

Palabras clave: monitoreo; deforestación; imágenes satelitales; evaluación de la incertidumbre; México.

Recibido: 1 de abril de 2020.

Aceptado: 26 de junio de 2020.

* Comisión Nacional Forestal; miguelmrv.munoz@gmail.com, ocarrillo.ute@conafor.gob.mx y oswaldisma@gmail.com, catherine.navarro@conafor.gob.mx, respectivamente.

** El Colegio de la Frontera Sur, mcastill@ecosur.mx y edith.mondragonvazquez@gmail.com, respectivamente.

*** Ecometrica, felicia@ecosistemasconsultora.org y flicline@gmail.com, Richard.tipper@ecometrica.com y richard.tipper@resilienceconstellation.com, respectivamente.

Nota: este trabajo es parte del proyecto *Forests 2020*, el cual fue desarrollado del 2016 al 2020, financiado por la Agencia Espacial del Reino Unido a través de su programa de Socios Internacionales y coordinado por Ecometrica.

Accurate measurement and monitoring of forest cover change are essential for assessing progress towards reducing emissions from deforestation and forest degradation as agreed in the UNFCCC Paris Agreement. Unfortunately, wide differences persist in estimates of the extent of remaining forest area and the rate at which it is being lost. The variations in the estimations of these parameters arise from several factors, among which are the scale of the maps, the methods used, inputs used and even in the very definitions of forest and deforestation. In this work, within the framework of the *Forests 2020* project, a comparative analysis was carried out between different approaches and methods to detect forest change in the Lacandon forest region in Chiapas, in order to put into perspective the different scopes and limitations of each one.

Key words: Monitoring; Deforestation; Satellite Imagery; Accuracy Assessment; Mexico.



Una triste realidad/Carlos Miguel Herrera Tapia

Introducción

México es considerado como líder en políticas de cambio climático (CC) entre los países de economías emergentes. Fue una de las primeras naciones en regular las acciones de mitigación y adaptación al CC mediante la publicación de la *Ley General de Cambio Climático* en el 2012; en el 2015, presentó sus *Contribuciones nacionalmente determinadas*, que fueron decretadas en el 2018 para su alineación con el *Acuerdo de París* (Averchenkova y Guzman Luna, 2018; CONAFOR, 2020).

En el 2017, nuestro país publicó la *Estrategia para la reducción de emisiones por la deforestación y degradación (REDD+)*, en la que se reconoce que el sector forestal contribuirá con casi 22 % de la meta de mitigación de México en el 2030 (CONAFOR, 2020).

Por lo tanto, existe una creciente necesidad de monitorear el progreso en la reducción de las emisiones relacionadas con cambios de usos de suelo, sobre todo asociados a la deforestación, la cual se define en la *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)* como la "... pérdida de la vegetación forestal en forma permanente, por causas inducidas o naturales..." (art. 7, fracción XVIII) o, en términos operativos, como la reducción del dosel por debajo del umbral mínimo (10 %) con cambio de uso de suelo forestal a no forestal, de manera permanente (CONAFOR, 2020).

Si bien a nivel mundial se han creado iniciativas para el monitoreo de los bosques —como el caso de *Global Forest Change (GFC)* desarrollado por la Universidad de Maryland (Hansen *et al.*, 2013), que en la actualidad se encuentra disponible en la plataforma *Global Forest Watch*—, estas

no cuentan con procesos de estimación de la exactitud temática o medición de error asociado a los cambios detectados; por ejemplo, los mapas que se generan a partir de GFC reportan solo la pérdida de cobertura forestal, que no necesariamente se relaciona con superficies de deforestación; además, en algunos casos no se consideran las definiciones locales de *bosque*, lo que puede provocar sobreestimaciones o bien, sesgos estadísticos significativos.

Considerando lo anterior, de acuerdo con los insumos disponibles y las capacidades técnicas en cada país, se han diseñado y puesto en operación sistemas de monitoreo forestal tratando de consolidar y adecuar métodos precisos en las estimaciones tanto estadísticas como geográficas (Argotty *et al.*, 2019).

En el caso de México, desde el 2014, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha operado el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF), establecido en el artículo 34 de la *LGDFS*, mediante el cual se han elaborado y sometido los Niveles de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) en la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático (CONAFOR, 2020). De manera histórica, la Comisión ha utilizado los mapas de uso de suelo y vegetación de las series I a la VI del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el monitoreo de los cambios en esta y el cálculo de tasas de deforestación (TD).

En el primer NREF para México, donde se estimaron TD brutas (CONAFOR, 2015), estas fueron sustancialmente mayores que las reportadas con anterioridad a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) debido, sobre todo, a modificaciones en las metodologías y en las definiciones de los conceptos de *bosque* y *deforestación* (CONAFOR, 2020). Además, las series del INEGI no son insumos adecuados para el propósito de detectar la deforestación, ya que son elaboradas como mapas de referencia de la vegetación existente en el país para su respectivo año base en una escala de 1:250 000.

Por lo tanto, en el marco del proyecto *Forests 2020*,¹ la CONAFOR y El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), en colaboración con la Universidad de Leicester y el Centro de Geografía Ambiental (CIGA) de la Universidad Nacional Autónoma de México, se han desarrollado metodologías robustas para la estimación y mapeo de las coberturas y la detección de cambios de cobertura del suelo mediante el uso de herramientas satelitales, empleando definiciones locales de bosque, así como métodos adaptados a las condiciones específicas del país, para generar TD con alta certidumbre.

Bajo este contexto es que se llevó a cabo un análisis comparativo de enfoques de detección de cambios en la cobertura forestal y deforestación para evaluar sus alcances y limitaciones.

Se eligió como área de estudio a la región de Marqués de Comillas, en Chiapas, ya que se ha caracterizado por presentar una alta frecuencia de cambio en el uso del suelo, lo cual se consideró idóneo para realizar este análisis y evaluar la efectividad de los diferentes métodos de detección y mapeo de la deforestación.

A partir de un enfoque espacialmente explícito, se elaboraron cuatro mapas de deforestación de la zona de estudio y se estimó la superficie dañada de acuerdo con los siguientes métodos: 1) sobreposición de cartas de uso de suelo y vegetación (INEGI), 2) Sistema Satelital de Monitoreo Forestal (SAMOF) de la CONAFOR, 3) detección de cambios desarrollado en el Laboratorio de Análisis Geográfico de ECOSUR (LAIGE-ECOSUR) y 4) el algoritmo *Breaks For Additive Season and Trend (BFAST)*.

Además de los métodos espacialmente explícitos, se calculó la superficie de deforestación usando el enfoque de muestreo propuesto en el capítulo 3 del volumen 4 de las *Directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático* (IPCC, por sus siglas en inglés) del 2006. Para evaluar y comparar de forma objetiva la efectividad de los diferentes métodos de mapeo, fue necesario obtener

¹ Para más información, ver <http://ecometrica.com/space/forests2020>.

estimaciones insesgadas de las superficies siguiendo la metodología de Olofsson *et al.* (2014). Por último, se realizó un análisis comparativo entre los métodos propuestos y se discutieron los alcances y limitaciones de cada uno.

Área de estudio

El análisis comparativo sobre los enfoques de estimación de la deforestación se hizo en la región de la Selva Lacandona, en Chiapas, denominada Marqués de Comillas (ver mapa 1), que abarca una extensión de 200 mil hectáreas. De acuerdo con la *Carta de uso de suelo y vegetación* correspondiente a la serie

VI (INEGI, 2014), en la zona se encuentran presentes de forma natural las selvas alta perennifolia (SAP) y mediana subperennifolia (SMQ), en sus diferentes fases vegetativas (ver imagen 1).

En esta zona hay una gran dinámica de cambio en la flora natural derivada de actividades como la ganadería y el cultivo de la palma de aceite, como se aprecia en las imágenes 2 (Covaleda *et al.*, 2014). Fue elegida como una de las áreas piloto del proyecto *Forests 2020* y ahí se realizaron las experimentaciones metodológicas iniciales, antes de escalar a nivel estatal pues, además, cuenta con amplia información de campo por parte de ECOSUR para la validación de los métodos.

Mapa 1

Ubicación del área de estudio, zona Marqués de Comillas, Chiapas, México

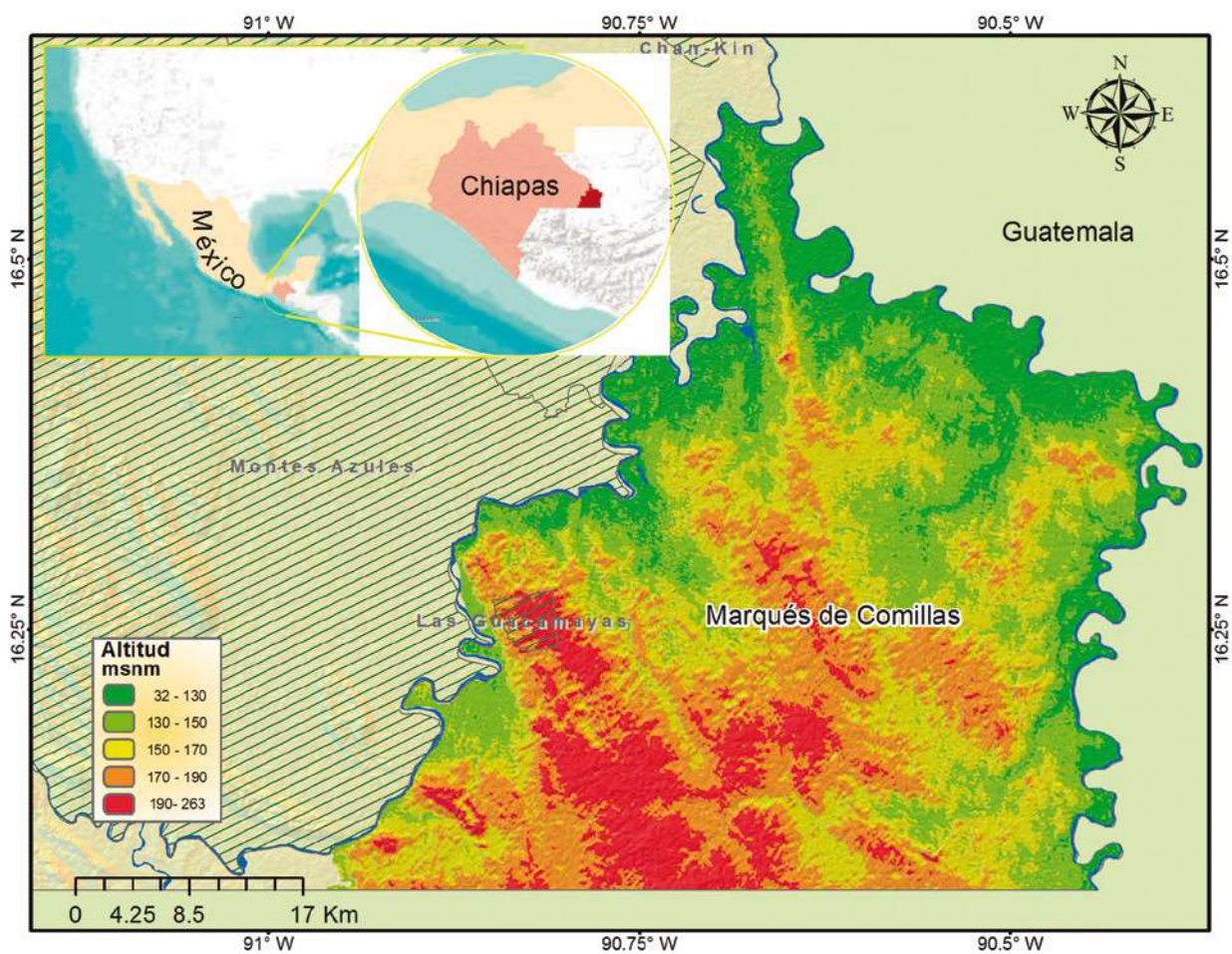


Imagen 1



Agricultura de temporal (maíz), con fragmento de selva mediana perennifolia en el fondo, San Isidro, Marqués de Comillas; coordenadas: UTM 15. X: 735699 Y: 1799272 Z: 169.
Fuente: LAIGE-ECOSUR.

Imágenes 2



Ganadería en San Isidro, Marqués de Comillas, Chiapas; coordenadas UTM 15. X: 728810 Y: 1801748 Z: 171.
Fuente: LAIGE-ECOSUR.



Plantación de palma de aceite, en la Victoria, Marqués de Comillas, Chiapas; coordenadas: UTM 15 X: 743323 Y: 1798520 Z: 181.

Fuente: LAIGE-ECOSUR.

Metodología

De manera general, son tres las etapas en las que se divide y que abonarán después al análisis de los resultados y la discusión. La primera es la construcción de mapas para detección de cambios en la cobertura forestal empleando distintos métodos de mapeo, así como la estimación de la deforestación bruta. La segunda es la descripción del método empleado para el cálculo de superficies insesgadas realizada a las estimadas de manera previa. Por último, la tercera es una propuesta de valoración de deforestación no espacialmente explícita basada en un enfoque de muestreo sistemático.

Métodos para la detección y mapeo de cambios

Su análisis comparativo se llevó a cabo para el periodo 2011-2014 o en fechas muy cercanas. Los mapas

obtenidos se evaluaron solo en la clase de deforestación bruta con el objetivo de que todas las cartas fueran compatibles y comparables para poder determinar la efectividad de cada método, ya que la definición de bosque varía en cada trabajo.

Sobreposición de mapas de uso de suelo y vegetación de las series del INEGI, 2011-2014

Con este método se compararon y detectaron las modificaciones que ocurren en el tiempo 2 (T_2) con respecto al 1 (T_1) para, después, estimar la superficie de cambio. Es importante señalar que tiene algunas limitantes debido a las características propias de las cartas, *i. e.* la Unidad Mínima de Mapeo (UMM) de las áreas forestales, que es de 50 y 25 ha para áreas agrícolas. Además, su escala es de 1:250 000, lo que la hace un insumo poco adecuado para el monitoreo de cambios de la cobertura del suelo en áreas con poca extensión.

Enfoque pared a pared del SAMOF, 2011-2014

Este método se enmarca en el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal de la CONAFOR y su objetivo principal es la generación de mapas de cobertura y cambios de cobertura del suelo (usando imágenes *Landsat*). El SAMOF genera esta información geoespacial a través de una cadena articulada de seis pasos que incluyen el establecimiento de definiciones operativas de bosque y deforestación, la calibración de algoritmos, la selección de insumos, el procesamiento de imágenes satelitales,² el posprocesamiento manual y la evaluación de exactitud temática (Gebhardt *et al.*, 2014). En particular, la elaboración de los mapas y la detección de los cambios se realizó mediante el análisis de dos compuestos multitemporales (2011-2014) *Landsat* con los algoritmos *iterative Multivariate Alteration Detection (iMAD)* y *Maximum Autocorrelation Factor (MAF)* (Nielsen *et al.*, 1998), así como la aplicación de un proceso manual de fotointerpretación para corregir y validar las modificaciones.

Método de mapeo de cambios de ECOSUR (LAIGE-ECOSUR), 2010-2015

En primer lugar, se elaboró un mapa de cobertura del suelo con la mayor cantidad de datos de campo posibles con el fin de obtener una carta con altos niveles de precisión; a este producto se le denominó *mapa de referencia*.

En la fase siguiente, se identificaron las áreas que sufrieron cambios con respecto al mapa de referencia. Para lograrlo, se empleó la siguiente secuencia de métodos: se calculó la diferencia algebraica entre las imágenes satelitales de los años de interés y al resultado de esa operación se le aplicó una segmentación, es decir, se agruparon los píxeles con valores similares; después, se aplicó el algoritmo *Isolation Forest* (Pedregosa *et al.*, 2011) para detectar segmentos sospechosos de haber sufrido modificaciones y se clasificaron los segmen-

² Se implementa con la versión de la CONAFOR del *software* Monitoreo de Datos de Actividad de México (MAD-Mex).

tos usando el método de *Random Forest* (Breiman, 2001); al final se aplicó un proceso de fotointerpretación para corregir y validar los cambios. Se emplearon imágenes *SPOT 5* y *7* (tamaño de píxel 10 y 6 m, respectivamente) correspondientes al 2010 y 2015; para la aplicación de los procesos automatizados, se utilizó el *software Python* y las librerías para el procesamiento de imágenes satelitales.

Detección de cambios con el algoritmo BFAST, 2011-2014

Este es un algoritmo basado en el análisis de series de tiempo de imágenes *Landsat* y *MODIS*, principalmente; integra la descomposición de las series en componentes de tendencia y temporalidad con métodos para detectar y caracterizar el cambio dentro de estas (Verbesselt *et al.*, 2010); calcula, de forma iterativa, el tiempo y el número de cambios bruscos dentro de series de tiempo y caracteriza la modificación por su magnitud y dirección. Para la detección de estos en el área de estudio, se utilizó la plataforma de computación en la nube del *System for Earth Observations, Data Access, Processing & Analysis for Land Monitoring (SEPAL)*, desarrollado por la FAO (SEPAL-FAO, 2018), donde se incluye la herramienta de *software* estadístico *R* (R Core Team, 2020) que permite la implementación del paquete de procesamiento de imágenes BFAST.

Enfoque de estimación de superficies insesgadas

Para evaluar y comparar de manera objetiva la efectividad de los diferentes métodos de mapeo espacialmente explícitos descritos antes, es necesario obtener estimaciones insesgadas de las superficies analizadas. Por lo tanto, a continuación, se presenta el método utilizado para estimarlas tomando como insumos las superficies mapeadas.

Para obtener estimaciones insesgadas de las TD brutas en el área ventana de estudio empleando los productos espaciales de los diferentes métodos de mapeo, se llevó a cabo una evaluación de exac-

titud siguiendo el método propuesto por Olofsson *et al.* (2014), el cual está basado, por un lado, en el conteo de muestras que coinciden con los mapas de cambios de cobertura generados y el llenado de una matriz de confusión con la cual se reportan las exactitudes global, del usuario y del productor y, por el otro, se integran estimadores estadísticos insesgados de las superficies (y sus incertidumbres) de las clases mapeadas a partir de los resultados de la matriz. A continuación, se explica cada uno de los pasos.

Estimación del tamaño de muestra y distribución de las muestras

Para efectuar este análisis, se empleó un muestreo aleatorio estratificado (MAE), el cual es flexible en la distribución de las muestras en zonas de cambio (Olofsson *et al.*, 2013),

En el MAE utilizado, los estratos a evaluar fueron las clases mapeadas: deforestación, bosque estable (BE) y no bosque estable (NBE). Sin embargo, para este ejercicio solo se presentan los resultados para la clase deforestación bruta.

Las muestras se diseñaron considerando *a priori* una exactitud del usuario (U_i) a nivel de estrato con

valores conservadores de 0.5. El nivel de confianza utilizado fue de 95 % ($\alpha = 0.95$) y un error de 0.02 % ($S(O)$) en la precisión total de omisión siguiendo a Olofsson *et al.* (2013). El tamaño de la muestra se calculó según Cochran (1977) y su distribución por estrato se realizó mediante la asignación óptima de Neyman. Para aquellos estratos pequeños, el tamaño de muestra asignado fue de 50 puntos con la finalidad de alcanzar la suficiente representación estadística.

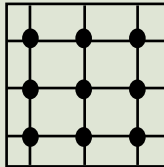
Exactitud temática de los mapas de cambio

Una vez diseñada la muestra, especialistas en interpretación visual de imágenes satelitales analizaron los puntos de muestreo empleando aquellas de mayor resolución disponibles, como *RapidEye* o *SPOt*, para los años de referencia de cada método. En particular, en estos puntos de muestreo se identificó el estrato (bosque y no bosque) al 2011 y 2014 y, después, su estrato de cambio o permanencia (deforestación, BE y NBE).

A partir de la información de referencia generada por los intérpretes, fue posible construir una matriz de confusión y obtener la exactitud total de los mapas de cambio espacialmente explícitos, y las exactitudes de usuario y del productor,

Cuadro 1

Proceso de estimación de superficies por medio de proporciones. Modificado de IPCC, 2006

Ejemplo de la estimación de superficies por medio de proporciones			
Procedimiento de muestreo	Estimación de proporciones	Superficies estimadas de categorías de uso de la tierra	Error estándar
	$p_i = n_i/n$ $p_1 = 3/9 \approx 0.333$ $p_2 = 2/9 \approx 0.222$ $p_3 = 4/9 \approx 0.444$ $\text{Suma} = 1.0$	$A_i = p_i * A$ $A_1 = 300 \text{ ha}$ $A_2 = 200 \text{ ha}$ $A_3 = 400 \text{ ha}$ $\text{Total} = 900 \text{ ha}$	$s(A_i)$ $s(A_1) = 150.0 \text{ ha}$ $s(A_2) = 132.2 \text{ ha}$ $s(A_3) = 158.1 \text{ ha}$

donde:

A = superficie total (= 900 ha en el ejemplo).

A_i = superficie estimada de la categoría de uso de la tierra i .

n_i = cantidad de puntos ubicados en la categoría de uso de la tierra i .

n = cantidad total de puntos.

además de los estimadores insesgados de áreas y sus respectivas incertidumbres, siguiendo la metodología de Olofsson *et al.* (2014).

Metodología para la estimación de superficies de deforestación basada en el enfoque de muestreo

En el capítulo 3 del volumen 4 de las *Directrices del IPCC* (2006) se indica que es posible estimar superficies y cambios mediante un enfoque de proporciones basado en un muestreo sistemático de parcelas. El IPCC sintetiza este enfoque en el cuadro 1.

Siguiendo este enfoque, se procedió al análisis y fotointerpretación manual de parcelas de 1 ha sobre imágenes de satélite, anidadas en el diseño muestral del Inventario Nacional Forestal y de

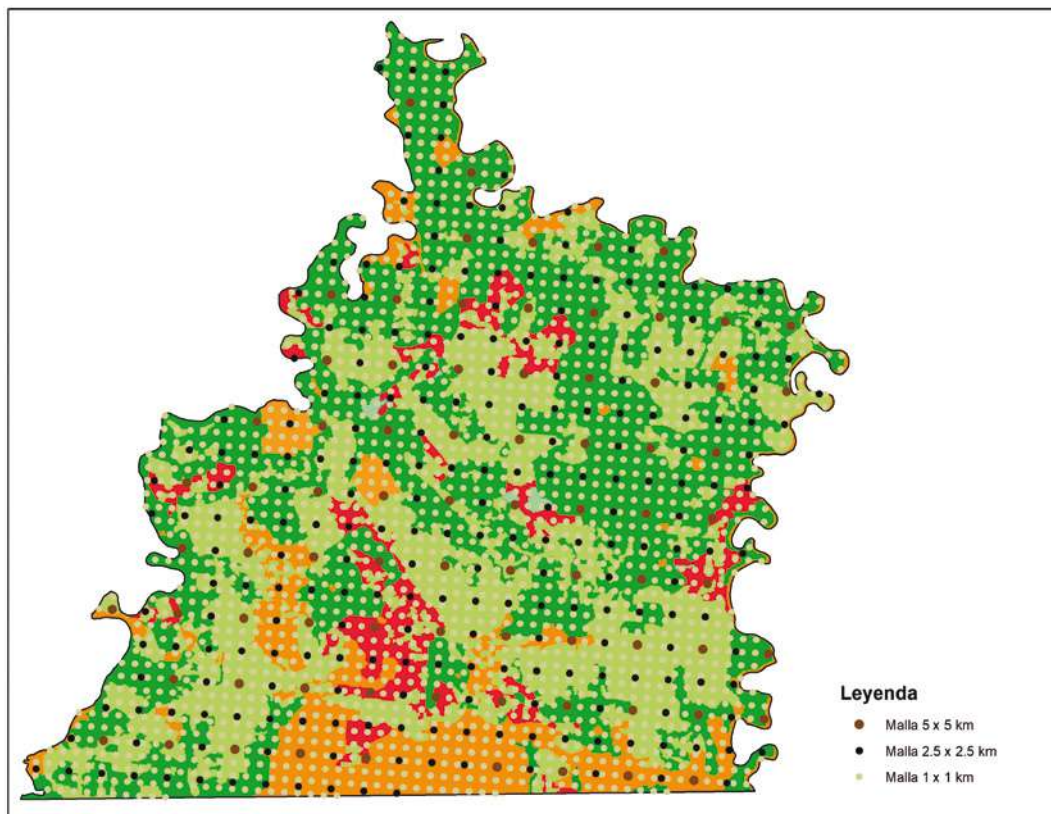
Suelos (INFYS)³ y con una equidistancia de 1 km x 1 km, lo que arrojó en total 1 968 parcelas de muestreo (ver imagen 3). De manera adicional, mediante un protocolo de fotointerpretación con criterios claros, se estableció el tipo de cobertura presente en la parcela en el 2011 y 2014, así como los cambios que ocurrieron en el periodo de análisis (2011-2014).

Una vez que se contó con el análisis de las coberturas de todas las parcelas para el periodo de análisis en el área de estudio, con el enfoque de estimación de superficies por medio de proporciones se calcularon las estadísticas de las pérdidas de la cubierta forestal y las superficies de cada clase que se hubieran determinado al inicio del muestreo.

³ Para la ubicación exacta de los puntos de muestreo, visite la página <https://marquesdecomillas.ecosur.ourecosystem.com/interface/>

Imagen 3

Distribución de las parcelas de la malla de muestreo anidadas en el diseño muestral del INFYS



Las áreas de cambio se obtuvieron de acuerdo con la ecuación:

$$\widehat{ATF}_i = \frac{n_i}{N_i} \times AT$$

donde:

\widehat{ATF}_i = área estimada en el i -ésimo estrato.

n_i = número de parcelas del estrato i .

N_{ij} = número total de las parcelas muestreadas en el estrato i .

AT_{ij} = área total de la zona de estudio.

La incertidumbre del \widehat{ATF}_i se estimó de acuerdo con la ecuación:

$$U(\widehat{ATF}_i) = \frac{Z_{\alpha/2} * s(\widehat{ATF}_i)}{\widehat{ATF}_i} * 100$$

donde:

$Z_{\alpha/2}$ = percentil 95 % del modelo de distribución empírico que ajusta los datos,

$s(\widehat{ATF}_i) = AT * \sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{N_i-1}}$ y $s(ATF_i)$ = desviación estándar del área estimada en el

i -ésimo estrato obtenida anteriormente con los insumos ya definidos y $p_i = \frac{n_i}{N_i}$.

Resultados

El mapa 2 muestra el resultado de mapeo de los cuatro métodos explicados;⁴ en ellos se pueden apreciar las diferencias en la distribución geográfica y tamaño de las áreas de deforestación. Los que utilizaron insumos de mayor resolución arrojaron zonas de deforestación más pulverizada y, en el caso de BFAST, se detectó mayor superficie total de esta. El patrón espacial de la deforestación obtenido con los métodos LAIGE-ECOSUR, BFAST y SAMOF presentó cierto nivel de similitud, pero el que se tuvo con los mapas del INEGI no se asemeja a ninguno de los otros tres; por ejemplo, en la parte central-inferior del segmento a del mapa se observa un área grande de cambios, que no aparece en ninguno de los otros.

⁴ Para ver y comparar los mapas visite la plataforma interactiva en línea de EO Labs: <https://marquesdecomillas.ecosur.ourecosystem.com/interface/>

Mapas

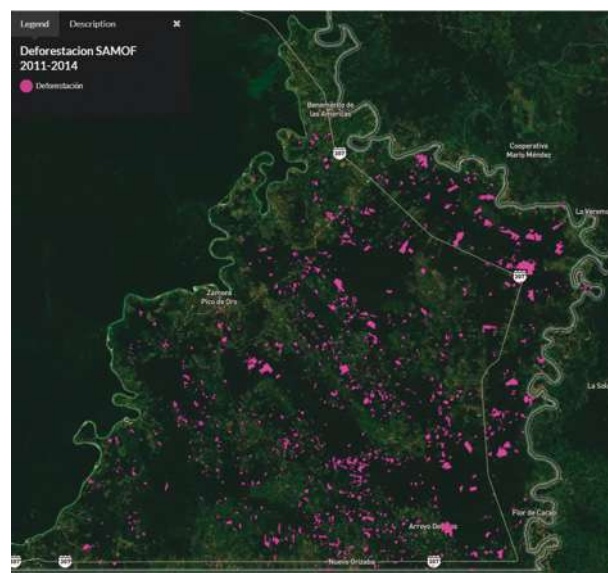
Continúa

Cartas de deforestación para el área de Marqués de Comillas utilizando los cuatro métodos

a) INEGI 2011-2014



b) SAMOF (2011-2014)



Cartas de deforestación para el área de Marqués de Comillas utilizando los cuatro métodos

c) LAIGE-ECOSUR (2010-2015)



d) BFAST (2011-2014)



En el cuadro 2 se muestran las estimaciones de deforestación bruta obtenidas por cada método, así como la gráfica asociada. Cabe señalar que, en el caso de la metodología LAIGE-ECOSUR, el periodo de análisis fue más amplio, contemplando cinco años (2010-2015). Sin embargo, para que estas fueran comparables, se anualizaron los datos. De

forma adicional, y como referencia, se pone la estimación de GFC, al ser considerada como una de las cifras que se utilizan con mayor frecuencia para referir datos de deforestación, aunque se define como la pérdida de cobertura forestal (en lugar de deforestación); entonces, no es estrictamente comparable con las demás estimaciones.

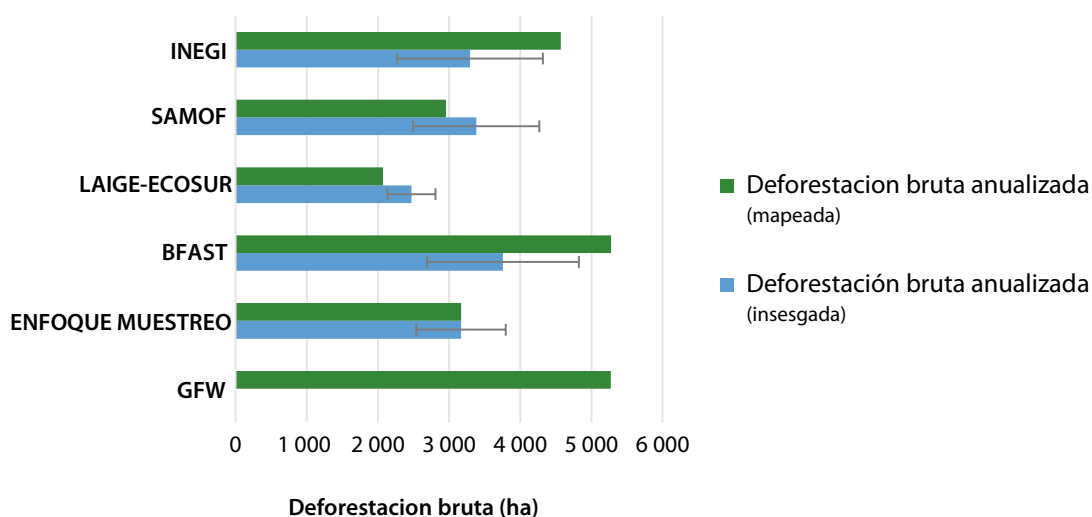
Cuadro 2

Resultados en la estimación de deforestación bruta para los métodos analizados (superficies mapeada y ajustada)

Clases	Método de estimación					
	INEGI	SAMOF-CONAFOR	LAIGE-ECOSUR	BFAST	Enfoque de muestreo	GFC
Deforestación bruta para todo el periodo (superficie mapeada-estimada) en hectáreas	13 708	8 868	10 361	15 838	9 507	15 821
Deforestación bruta para todo el periodo (superficie insesgada) en hectáreas	9 887	10 146	12 360	11 277	N/A	-
Deforestación bruta anualizada (superficie mapeada) en hectáreas	4 569	2 956	2 072	5 279	3 169	5 273
Deforestación bruta anualizada (superficie insesgada e intervalo de confianza) en hectáreas	3 295 ±1 024	3 382 ±887	2 472.09 ±338	3 759 ±1 066	3 169 ±628	-
Exactitud del usuario (%)	7.25	48.65	97	30.77	N/A	-

N/A: no aplica.

Superficies insesgadas y mapeadas de deforestación bruta anual 2010-2014 de diferentes métodos con niveles de incertidumbre asociados



Discusión y recomendaciones

Como se puede observar en los resultados, existe una amplia variabilidad en las estimaciones de las superficies mapeadas de deforestación e, incluso, en los patrones espaciales del cambio. En este último caso, la falta de concordancia entre los obtenidos con los mapas del INEGI y el resto de los métodos se debe, en apariencia, a su bajo nivel de detalle espacial lo cual confirma, en cierta medida, lo que se anunciaba de forma previa: la escala espacial gruesa puede ser una seria limitante para obtener estimadores precisos de deforestación.

Los cambios de uso del suelo con frecuencia se presentan en áreas pequeñas (alrededor de 1 ha), por lo que mapas como las series del INEGI (cuya superficie mínima cartografiada es de 50 ha) podrían subestimar o sobreestimar dichos cambios. Es necesario recalcar que estas cartas fueron elaboradas para representar el uso de suelo, por lo que su propósito no es detectar modificaciones.

Por otra parte, dentro de los métodos que presentan un patrón espacial de cambios similar,

también existen variaciones considerables en las estimaciones de la cantidad de bosque perdido; ejemplo de esto es el de BFAST, que calcula más del doble de lo obtenido con el de LAIGE-ECOSUR. Por lo anterior, cobra sentido y relevancia el criterio de exactitud temática pues, ante un escenario en el que se cuenta con dos estimaciones de un mismo fenómeno, es recomendable, entonces, elegir el método o la estimación con el menor nivel de error. La exactitud del usuario y del productor puede ser una medida adecuada de la confiabilidad de una clase en un determinado mapa. Valores altos indican resultados más confiables, o menor error.

Otro criterio importante por mencionar al elegir un método de estimación u otro es la definición del concepto de bosque. En el caso de los mapas de GFC, los cambios detectados corresponden a la pérdida de dosel en áreas que de inicio tenían una cobertura arbórea por lo menos de 30 % y esto no necesariamente puede considerarse como deforestación, sino una posible perturbación más relacionada con la degradación. Otro fenómeno que puede estar siendo detectado por los mapas de GFC es la pérdida de vegetación secundaria, si-

tuación muy común en el área de estudio, donde se practican métodos agrícolas de roza-tumba y quema; es por ello que, con frecuencia, las tasas de deforestación provenientes de este método son altas.

Por otra parte, el método basado en muestreo estadístico produce estimadores de la cantidad de deforestación cercanos a los que se obtienen con los de mapeo de menor error (SAMOF y LAIGE-ECOSUR), por lo que resulta una alternativa atractiva y confiable cuando se desean estimadores de la cantidad y no de la distribución espacial del proceso. Si bien no aplica el criterio de exactitud temática del usuario, cuenta con una incertidumbre asociada baja, lo cual, vuelve a este método una opción costo-eficiente para replicarlo a niveles tanto regionales como nacionales.

En perspectiva, los métodos del SAMOF y de LAIGE-ECOSUR resultan ser muy efectivos en cuanto a la precisión de los cálculos de deforestación, teniendo exactitudes del usuario de 48.65 y 97 %, respectivamente. Ambos involucran en su implementación la estimación de superficies insesgadas. Sin embargo, el costo de posprocesamiento es alto, ya que requiere tiempo y esfuerzos adicionales por parte de los intérpretes visuales que validan una a una las etiquetas de cambio asignadas de una muestra representativa para eliminar falsas modificaciones.

Se puede decir que la implementación tanto del SAMOF (cuyos productos se enfocan a la estimación de coberturas y sus cambios a niveles estatal y nacional), así como la iniciativa local por parte de LAIGE-ECOSUR parten de enfoques que generan información con una mayor fiabilidad, ya que incorporan a sus análisis una fase de posprocesamiento, la cual requiere del conocimiento de expertos locales y tiempo para asegurar niveles mayores de certidumbre y, si es posible, información auxiliar de campo (como fue en el caso de LAIGE-ECOSUR), lo cual implica una elevación en los costos de mapeo. Sin embargo, es una etapa necesaria para asegurar fiabilidad de los productos y eliminar los falsos cambios.

A nivel de recomendaciones, para aquellos usuarios que generan sus propias estimaciones de la deforestación, se sugiere que, además del procesamiento automatizado de imágenes para detección de cambios, se deberá incluir un proceso final de análisis, revisión y ajuste de los resultados denominado *fase de posprocesamiento*.

Otra buena práctica para el monitoreo de la deforestación es incluir dentro del proceso de producción de mapas la estimación de parámetros de exactitud (Strahler *et al.*, 2006). Para implementar el análisis de exactitud temática a los mapas generados, es necesario llevar a cabo un diseño de muestreo donde se determinan las clases a evaluar, el método y el tamaño de muestras. Es deseable involucrar campañas intensivas de validación en campo; sin embargo, debido a que las verificaciones en el terreno suelen ser costosas, estas se pueden sustituir por un método más costo-eficiente, como es el caso del análisis y fotointerpretación de las muestras sobre imágenes de alta resolución, lo que facilita la generación de información de referencia con una mayor fiabilidad. Tener un análisis de este tipo ayudará a los usuarios finales a conocer sus alcances y limitaciones, además de conocer qué tan cercanas a la realidad son las estadísticas de deforestación reportadas.

Por último, se recomienda seguir invirtiendo en el fortalecimiento de las capacidades de monitoreo del país, ya que, evidentemente, las metodologías SAMOF y LAIGE-ECOSUR demuestran ser más eficientes y robustas para calcular deforestación, comparadas con métodos o fuentes internacionales. De esta manera, será posible escalar este tipo de análisis del nivel local o regional al nacional, disminuir los tiempos de procesamiento y mejorar la exactitud de los resultados, utilizando la mejor información disponible como las imágenes satelitales de alta resolución, la experiencia de especialistas locales, además de los datos de campo para la calibración o validación final de los mapas. Esto, se verá reflejado en estimaciones más precisas y mejores de la deforestación, poniendo a México a la vanguardia a nivel internacional en materia de su monitoreo.

Fuentes

- Averchenkova A. & S. Guzman Luna. *Mexico's General Law on Climate Change: Key achievements and challenges ahead*. London, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, 2018.
- Argotty, F., E. Fung, P. Imbach, C. Medellín, O. Carrillo, E. Larios, G. Islas, D. Lopez & M. Muñoz. *Estado del monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe: tipos de iniciativas y uso de tecnologías. Nota técnica núm. IDB-TN-01690*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)-Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2019, 82 p.
- Breiman, L. "Random forests", en: *Machine Learning*. 45(1), 2001, pp. 5-32.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). *Nivel de Referencia de Emisiones Forestales de México (2007-2016)*. En rev. 2020 (DE) https://redd.unfccc.int/files/nref_2007-2016_mexico.pdf
- _____. *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe 2004-2009*. Zapopan, México, 2012.
- Covalada, S., S. Aguilar, A. Ranero, I. Marín & F. Paz. *Diagnóstico sobre determinantes de deforestación en Chiapas*. México, Alianza México para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (Alianza México-REDD+)-Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), 2014.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). *Directrices voluntarias sobre monitoreo forestal nacional*. Roma, Italia, 2017, 90 p.
- Gebhardt, S., T. Wehrmann, M. A. Muñoz-Ruiz, P. Maeda, J. Bishop, M. Schramm, R. Kopeinig, O. Cartus, J. Kellendorfer, R. Ressler, M. Schmidt & L. A. Santos. "MAD-MEX: automatic wall-to-wall land cover monitoring for the Mexican REDD-MRV program using all Landsat data", en: *Remote Sensing*. 6(5), 2014, pp. 3923-3943.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau & R. Moore. "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone", en: *Remote Sensing of Environment*. 202, 2017, pp. 18-27.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Serie VI. (Capa Unión). Escala 1: 250 000*. México, INEGI, 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Suiza (IPCC). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Kanagawa, Japan, IGES, 2006.
- "Ley Nacional de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) 2003", en: *Diario Oficial de la Federación*. Última reforma publicada el 24 de enero de 2017 (DE) <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/mex36056.pdf>
- Nielsen, A., K. Conradsen & J. Simpson. "Multivariate alteration detection (MAD) and maf postprocessing in multispectral bitemporal image data: New approaches to changedetection studies", en: *Remote Sensing of the Environment*. 64(1), 1998.
- Olofsson, P., G. M. Foody, S. V. Stehman & C. E. Woodcock. "Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation", en: *Remote Sensing of Environment*. 129, 2013, pp. 122-131.
- Olofsson, P., G. M. Foody, M. Herold, S. V. Stehman, C. E. Woodcock & M. A. Wulder. "Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change", en: *Remote Sensing of Environment*. 148, 2014, pp. 42-57.
- Pedregosa, F., G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, P. Perrot & J. Vanderplas. "Scikit-learn: Machine learning in Python", en: *Journal of Machine Learning Research*. 12, octubre de 2011, pp. 2825-2830.
- R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, 2020 (DE) URL <https://www.R-project.org/>
- Romijn, E., C. B. Lantican, M. Herold, E. Lindquist, R. Ochieng, A. Wijaya, D. Murdiryaso & L. Verchot. "Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries", en: *Forest Ecology and Management*. 352, 2015, pp. 109-123.
- Schrödle, B. & L. Held. "Spatio-temporal disease mapping using INLA", en: *Environmetrics*. 22 (6), 2011, pp. 725-734.
- Sepal-FAO. *System for earth observations, data access, processing & analysis for land monitoring*. 2018 (DE) <https://sepal.io/>, consultado en marzo de 2018.
- Strahler, A. H., L. Boschetti, G. M. Foody, M. A. Friedl, M. C. Hansen, M. Herold & C. E. Woodcock. "Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps", en: *European Communities, Luxembourg*. 51(4), 2006.
- Verbesselt, J., R. Hyndman, G. Newnham & D. Culvenor. "Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series", en: *Remote Sensing of Environment*. 114(1), 2010, pp. 106-115.