



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DEL GEOGRAFÍA**

**EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD PARA
MAPAS DE COBERTURA FORESTAL Y USO DE
SUELO EN MÉXICO A DOS ESCALAS**

TESIS

para obtener el título de:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

VELA LÓPEZ MARÍA DEL CARMEN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. STEPHANE COUTURIER

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Junio 2016





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mi mamá, Ma. E. del Carmen López Sánchez: me has visto reír y llorar, triunfar y fallar; y sin condiciones me has apoyado, consentido y regañado. Con tu fuerza y amor me has dirigido por la vida. La única que me mantiene fuerte. Todos mis éxitos y lo que soy te lo debo a ti.

Gracias mamá, por todas tus enseñanzas, tanto morales como físicas, y por el inmenso e incondicional cariño que siempre nos has demostrado a mi hermano y a mí. Te amo.

AGRADECIMIENTOS

A Stephane Couturier, director de ésta tesis: gracias por el tiempo dedicado, el apoyo, los consejos y la confianza.

Al Dr. Jean François Mas Causel: gracias por la accesibilidad y el apoyo concedidos para la realización del presente trabajo.

A los miembros del sínodo: Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez, Mtro. José Mauricio Galeana Pizaña, Lic. Jaime Morales y la Mtra. Angélica Margarita Franco González. Gracias por los comentarios y observaciones realizados, los cuales sirvieron para enriquecer ésta tesis; gracias también por el tiempo y la cordialidad manifestados.

A la Facultad de Filosofía y Letras, por permitir recibir de ella mis estudios profesionales.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, mi segunda casa. Gracias por el apoyo brindado a través de sus múltiples instancias; por permitir formarme personal y académicamente.

ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	10
<i>CAPÍTULO I.</i>	14
<i>CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA E IMPLEMENTACIÓN EN LOS ESQUEMAS INTERNOS DE MITIGACIÓN FORESTAL Y DEFORESTACIÓN</i>	
1.1 Confiabilidad cartográfica	14
1.2 Uso de suelo y coberturas vegetales	18
1.3 Procesos de cambio de usos de suelo	21
1.4 Deforestación	24
1.5 El programa REDD+	27
1.6 La problemática de la estimación robusta de la deforestación	29
1.7 Confiabilidad cartográfica con lógica difusa	32
<i>CAPÍTULO II.</i>	36
<i>PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA DE USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN EN MÉXICO</i>	
2.1 Cartografía de uso de suelo y vegetación en México	36
2.2 Mapas de uso de suelo y vegetación derivados de las series III, IV y V de INEGI.	43
2.3 Mapas de deforestación Global Forest Cover Change de Hansen <i>et al.</i> , (2013).	48

<i>CAPÍTULO III.</i>	53
<i>METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE MAPAS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO SERIES III, IV y V DE INEGI Y PARA EL MAPA GLOBAL FOREST COVER CHANGE</i>	
3.1 Descripción metodológica	53
3.2 Procesamiento de los datos INEGI	58
3.2.1 Elaboración de los mapas de ganancia y pérdida forestal	58
3.3 Procesamiento de los datos Global Forest Cover Change	60
3.3.1 Elaboración de los mapas de pérdida forestal	60
3.4 Diseño de muestreo	61
3.4.1 Determinación del número de unidades principales	62
3.4.2 Estratificación del muestreo	65
3.4.3 Selección de los sitios de verificación	67
3.5 Diseño de la evaluación	69
3.5.1 Protocolo de interpretación	69
3.6 Análisis de los datos de confiabilidad	76
3.6.1 Análisis de los mapas de CVUS series IV y V de INEGI	76
3.6.2 Análisis del mapa Global Forest Cover Change	79

<i>CONCLUSIONES</i>	84
<i>ANEXOS</i>	89
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	93

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cambios en cobertura vegetal nacional entre 1985 y 2010	22
Cuadro 2. Tasas de deforestación reportadas para México	30
Cuadro 3. Principales características de las series de CVUS de INEGI	40
Cuadro 4. Información de uso de suelo y vegetación en México	41
Cuadro 5. Adecuaciones al sistema de clasificación de uso del suelo y vegetación	43
Cuadro 6. Reagrupación de las clases de CVUS serie IV de INEGI para la elaboración del mapa binario	59
Cuadro 7. Lista de imágenes Rapid Eye seleccionadas	63
Cuadro 8. Características y área de los diferentes estratos	66
Cuadro 9. Nomenclatura para definir porcentaje de cambio en la cobertura forestal	71
Cuadro 10. Matriz de cambio entre la primera observación y la segunda	72
Cuadro 11. Índice de confiabilidad por clase de cambio para mapas de CVUS de INEGI	76
Cuadro 12. Índice de confiabilidad por clase de cambio para el mapa Global Forest Cover Change	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea histórica del mecanismo REDD+	28
Figura 2. Diferencia clasificatoria en cambio de cobertura forestal entre lógica booleana y lógica difusa	35
Figura 3. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie III de INEGI	44
Figura 4. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV de INEGI	45
Figura 5. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie V de INEGI	46
Figura 6. Mapa de porcentaje de cobertura forestal del año 2000 en el territorio mexicano	52
Figura 7. Desarrollo metodológico para la evaluación de confiabilidad de cartografía de CVUS INEGI Y GFCC.	54
Figura 8. Ejemplo de los métodos de muestreo espacial	56
Figura 9. Ejemplo de una matriz de confusión con números	58
Figura 10. Imagen Rapid Eye	63
Figura 11. Mapa de la ubicación de imágenes Rapid Eye seleccionadas como unidades principales	64
Figura 12. Visualización de ambas áreas de interpretación concéntricas al sitio de verificación sobre una fusión pancromática/multiespectral de imagen SPOT	67
Figura 13. Porcentaje de cobertura del dosel	70
Figura 14. Ejemplo de un sitio de verificación (ID del sitio 966) al cual se aplicó el protocolo de interpretación para ambas escalas	72

Figura 15. Comparación entre los índices de confiabilidad por clase para INEGI	77
Figura 16. Comparación entre los índices de confiabilidad por clase para Global Forest Cover Change	80
Figura 17. Porcentaje de aciertos por estrato par ambos insumos	82

INTRODUCCIÓN

Más que una serie de fenómenos y accidentes geográficos, un mapa representa el conocimiento que se ha adquirido a través del tiempo. Sin la cartografía, la Tierra tal y como es descrita quedaría en una incertidumbre porque, precisamente, han sido los mapas los artífices de nuestra realidad, por ello destaca la función principal de los mapas: modelarnos la realidad.

A su vez, la cartografía constituye un insumo indispensable para la geografía y los actores sociales que buscan influir sobre su entorno, dado que ésta facilita la toma de decisiones en torno al territorio. Sin embargo, la mayoría de las veces se da por hecho que el contenido de la misma es certero, sin tomar a consideración que pudieron existir errores durante el proceso de su elaboración. Como respuesta a lo anterior, se destaca la importancia de la evaluación de confiabilidad de dichos productos, ya que con ello, se proporciona validez a los trabajos en cuyos insumos o resultados destaca la cartografía.

Para inferir la validez de un mapa, se implementa una serie de cálculos estadísticos aplicados al mismo, cuyo fin es darle cierto rango de confiabilidad a la información en él plasmada. Generalmente, dicho proceso estadístico es aplicado a mapas cuya temática principal se refiere a Cobertura Vegetal y Usos de Suelo (CVUS). Lambin *et al.*, (2006) definen a la cobertura vegetal como un medio en el cual se llevan a cabo un gran número de procesos biofísicos, definido por los atributos de la superficie de la tierra. A su vez, el autor resalta la importancia en la distinción del término uso de suelo, el cual define intrínsecamente relacionado a los arreglos y actividades que el ser humano desarrolla sobre la cobertura vegetal, por ejemplo, actividades agrícolas y ganaderas.

Entendiendo lo anterior, se deduce la afectación que provocan dichas actividades a la cobertura vegetal, que a su vez se ven potenciadas por la demanda de recursos.

Estas modificaciones se extienden a los sistemas ecológicos, en los cuales las dinámicas poblacionales de las especies se ven afectadas debido a la modificación de las coberturas originales.

La mayor parte de cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres se deben al proceso de deforestación o degradación forestal, siendo el caso más claro el cambio en el uso de terrenos en regiones tropicales, donde el incremento poblacional y los patrones de consumo global inducen dicho proceso, el cual genera importantes efectos negativos sobre los ecosistemas, relacionados principalmente con los regímenes de agua y suelo, así como con la biodiversidad y con el régimen climático, por mencionar las principales consecuencias.

Por ello, es necesaria la evaluación y monitoreo de los cambios sobre la cobertura vegetal, y una vía óptima para la evaluación de dichos cambios es una medición espacialmente explícita del cambio en la cobertura vegetal, mediante el cual es posible identificar causas y consecuencias de los procesos de degradación forestal y deforestación, así como establecer estrategias de planificación de uso de suelo.

Para ello es importante la aplicación de una evaluación cartográfica estadísticamente válida, enfatizándose dicha evaluación en países megadiversos con población rural relativamente numerosa, tal y como es el caso de México, país que no escapa a la dinámica económica actual, y que se ve reflejado en las altas tasas de consumo, incremento poblacional y demanda alimenticia, que ocasionan la deforestación en zonas de alta diversidad biológica.

A nivel nacional, diferentes instituciones, tales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), cada cual con sus respectivas dependencias, se han dado a la tarea de contabilizar y actualizar las tasas de deforestación.

Sin embargo son pocos los trabajos que avalen estadísticamente estos datos, lo que resulta relevante y en cierto grado preocupante, ya que numerosos

trabajos se basan en la información proporcionada por las instituciones antes mencionadas, sin conocer el grado de incertidumbre de dicho material.

Por lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se destaca el hecho de trabajar con imágenes de alta resolución para el proceso de validación de la información, ya que estos materiales minimizan el error por confusión entre clases temáticas.

Los productos a evaluar en el presente estudio son los mapas de cambio de Uso de Suelo y Vegetación derivados de las Series III, IV y V de INEGI, así como el mapa de deforestación Global Forest Cover Change de Hansen *et al.*, (2013). Ambas evaluaciones se basan en el marco de validación cartográfica propuesto por Stehman y Czaplewski (1998).

Para la presente evaluación, como menciona Couturier (2010), es preciso tomar en cuenta la gran serie de características del territorio mexicano, entre ellas la alta biodiversidad y dinamismo de paisaje, lo que a su vez implica un gran número de clases y la distribución fragmentada de coberturas. Lo anterior, con el fin de evitar resultados sesgados.

Dado que hasta ahora no existe una forma de obtener datos detallados y precisos vía satélite sobre el cambio de la cobertura forestal desde escalas locales a globales, y que a su vez sean de fácil acceso, la evaluación de la confiabilidad de los mapas así como de las bases digitales geográficas es un tema de creciente interés; no sólo por la necesidad de acotar el grado de incertidumbre que puede llegar a poseer un insumo al momento de la publicación de un estudio de investigación; sino también lo es y en gran medida, por el rápido desarrollo y aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Objetivos

I. General.

Evaluar la confiabilidad de mapas de cobertura vegetal en México a dos escalas.

II. Específicos.

-Evaluar estadísticamente los mapas de cambio de cobertura forestal derivados de las Series III, IV y V de INEGI.

-Evaluar estadísticamente el mapa de deforestación Global Forest Cover Change de Hansen *et al.*, (2013).

-Elaborar los insumos cartográficos básicos para estudiar el fenómeno de degradación/deforestación de manera anidada a dos escalas.

Hipótesis.

Aplicando la metodología realizada por Stehman y Czaplewski (1998) para llevar a cabo la evaluación de la confiabilidad cartográfica se dotará de validez estadística a los mapas de cambio de cobertura forestal nivel nacional basados en series INEGI III, IV y V, así como al producto Global Forest Cover Change de Hansen *et al.*, (2013) en México.

CAPÍTULO I

CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA E IMPLEMENTACIÓN EN LOS ESQUEMAS INTERNOS DE MITIGACIÓN FORESTAL Y DEFORESTACIÓN

1.1 Confiabilidad Cartográfica

Uno de los insumos más importantes para la toma de decisiones con relación al aprovechamiento y conservación de la naturaleza son los mapas. Sin embargo, en la mayoría de los casos se acepta la información proporcionada por éstos sin antes ser cuestionada.

Toda base de datos geográfica, presenta cierto grado de error, mismo que puede depender de diversas causas, y que de acuerdo con Longley *et al.*, (2001) va desde la concepción, medición, representación y análisis de los fenómenos geográficos. Generalmente se considera que existen dos tipos de error en los mapas: los errores temáticos, que se refieren a errores de atributo y los errores geométricos (de posición), que se relacionan con la delimitación de los polígonos o la ubicación de los pixeles (Chuvienco, 1995).

Por lo anterior, actualmente se tiene que recurrir a la rama del conocimiento de confiabilidad cartográfica, misma que contiene sus propias teorías y conceptos, pero perteneciente al área de la cartografía.

Se entiende como confiabilidad cartográfica al proceso de cálculos realizados con el fin de conferir validez estadística a un mapa. Dicho proceso generalmente es aplicado a cartografía de cobertura vegetal y uso de suelo, debido al creciente interés por cuantificar la perseverante afectación a la misma, y por ende al funcionamiento de ecosistemas con implicaciones directas sobre la biodiversidad, lo que contribuye al cambio climático tanto a escala local como regional, considerando además que dicha cartografía resulta ser un insumo relevante para la toma de decisiones relacionadas a la gestión ambiental en general.

El cálculo de la confiabilidad de un mapa se obtiene a partir de la comparación estadística de la información plasmada en dicho mapa con la información proveniente de un insumo de referencia, el cual se considera que representa “la realidad” y por lo mismo es considerado fiable, mismo que generalmente hace referencia a imágenes satelitales o fotografías aéreas, por su alta resolución espacial. En base a esto, Mas y Couturier (2011) mencionan que para el cálculo de la confiabilidad temática es necesario comparar la información del mapa con información de referencia considerada muy confiable, que generalmente debe estar basada en sitios de verificación. Con esto se logra que la comparación entre la información del mapa y la información de referencia permita el cálculo de la confiabilidad, además de conocer la proporción de confusiones que se alojan en el mapa.

Para que la evaluación del mapa pueda ser considerada estadísticamente rigurosa, debe estar basada en un diseño de muestreo probabilístico, asociado a todo el área del mapa (Stehman 2001), ya que, al incluir un diseño probabilístico, la evaluación adquiere peso científico. Existen ejemplos de diseños de muestreo sesgados que no se pueden considerar como estadísticamente robustos, debido a que la muestra no resulta ser representativa del conjunto del mapa.

El proceso de evaluación de la confiabilidad temática se divide en tres etapas, como mencionan Stehman y Czaplewski (1998):

- a) El diseño del muestreo, que consiste en la selección de las unidades de muestreo.
- b) La evaluación del sitio de verificación, que permite obtener la clase correspondiente a cada unidad de muestreo.
- c) El análisis de los datos, que consiste generalmente en la elaboración de una matriz de confusión y el cálculo de índices de confiabilidad.

Un concepto que destaca cuando se habla de confiabilidad cartográfica, es el de los conjuntos difusos, introducido por Zadeh en el año de 1965 a la disciplina de la ingeniería automática. La lógica difusa, como su nombre lo indica, es una lógica alternativa que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que califica, con la hipótesis de que en el mundo real existe mucho conocimiento no perfecto, es decir, conocimiento ambiguo o probabilístico por naturaleza. Por ello y dada su implementación en la aplicación de cálculos de confiabilidad cartográfica, más adelante se desarrollará dicho concepto.

Dentro de la metodología del presente trabajo se utilizará la lógica difusa como una estrategia para calificar los sitios de verificación, ya que ésta considerará las posibles ambigüedades que puede tener una categoría en el material de verificación, tomando en cuenta que un sitio puede pertenecer a dos clases o más.

Por ello, para llevar a cabo una evaluación con menor sesgo, Gopal y Woodcock (1994) utilizan la teoría de conjuntos difusos, implementando una escala lingüística basada en la comparación de las etiquetas del mapa evaluado con las valoraciones que da el experto con respecto a cada clase del sistema clasificatorio. En cada sitio de verificación, el experto asigna una calificación, cada expresión lingüística está asociada con un grado de pertenencia a una clase.

La información cuantitativa obtenida de dichos cálculos estadísticos, provee al usuario una estimación de su correspondencia con la realidad. Esta estimación, a su vez provee un porcentaje de error explícito, mismo que puede o no ser asumido por una instancia encargada de toma de decisiones, generalmente relacionadas a temáticas ambientales, al momento de emplear el mapa.

En la cartografía actual, proveniente de la clasificación de imágenes satelitales, suele atribuirse dicho porcentaje a la resolución de la imagen. Sin embargo, es bien sabido que este tipo de información indica una parte muy reducida de la confiabilidad temática de un mapa (Green y Hartley, 2000).

A partir del año 2000 se comienza a publicar a nivel mundial las primeras estimaciones estadísticamente válidas sobre la confiabilidad de cartografía regional de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo.

Por ejemplo, Wulder *et al.* (2007) publican la confiabilidad del mapa de la isla de Vancouver, Canadá para las clases generadas por el programa canadiense Earth Observation for Sustainable Development (EOSD), el cual presenta el mapa de uso de suelo para el área forestal de Canadá. El método implementado consistió en la toma de video aéreo para identificar la clase de cobertura modal mediante un kernel de 3 x 3 circundante a la muestra, para posteriormente realizar la elección de la ocupación primaria o secundaria del suelo en el video interpretado. Con este acuerdo de definición implementado, logran adaptarse tanto a la ambigüedad como a la incertidumbre posicional temática, lo que los conduce a obtener una confiabilidad del 86% para la clase coníferas, la cual representa el 71% de cobertura para la isla de Vancouver, con lo cual concluyen que la implementación de video aéreo resultó una fuente de datos útil y rentable para la validación del producto EOSD.

Es importante mencionar que el proceso de producción cartográfica con base en imágenes satelitales, desde la década de los años 90's ha ido mejorando hasta situarse actualmente como la base de dicho proceso, debido principalmente a su calidad sinóptica a escalas regionales. Sin embargo y a pesar de ello no queda exenta la posible confusión de clases temáticas dada la complejidad de condiciones que prevalecen en el territorio, particularmente el nacional, ya que al tratarse de una zona megadiversa, la cartografía de México se caracteriza por presentar un mayor número de clases de nivel taxonómico igual, a diferencia de cartografías evaluadas como la mencionada anteriormente.

Aunado a esto, se enfatiza que el índice de confiabilidad cartográfica se espera se sitúe por arriba del 60%, ya que es el promedio de los mapas evaluados a nivel regional en varias partes del mundo (Couturier, 2007).

1.2 Uso de suelo y coberturas vegetales.

La vegetación es la expresión evolutiva del agregado de especies vegetales en un lugar y en un tiempo determinado, y como tal es un elemento indicador del estado o condición que guardan los ecosistemas. Su expresión espacio-temporal es la cobertura vegetal, y es una de las más importantes manifestaciones espaciales de los paisajes naturales y culturales de un territorio (Lambin *et al.*, 2001).

El concepto de biodiversidad hace referencia a la variabilidad biológica que albergan ecosistemas tanto terrestres como acuáticos (Neyra y Durand, 1998). Entre el 30 y 35 por ciento del territorio nacional está cubierto por bosques y selvas, además de existir otros tipos de vegetación de amplia cobertura. Se considera que México es uno de los 12 países del mundo considerados como megadiversos, ya que en conjunto albergan entre el 60 y el 70% de la biodiversidad total del planeta (Mittermeier y Goettsch, 1992), siendo en las áreas tropicales y de bosque las zonas donde se encuentra la mayor proporción de diversidad genética en nuestro país.

Entre las causas que hacen de México un país de gran diversidad biológica están la topografía, la variedad de climas y una compleja historia tanto geológica, biológica como cultural, factores que han contribuido a formar un mosaico de condiciones ambientales y microambientales que promueven una gran variedad de hábitats y de formas de vida (Sarukhán, Soberón y Larson-Guerra, 1996).

En el 2013 la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) reporta que de la superficie total del territorio nacional, poco más de 138 millones de hectáreas están cubiertas por vegetación forestal (aproximadamente 71% de la superficie nacional), esta superficie forestal está distribuida de la siguiente forma: 19% corresponde a matorrales de zonas áridas, 11% a zonas semiáridas, 15% a selvas bajas, altas y medianas, 17% a bosques templados, 8% a otros tipos de vegetación forestal y tan solo 1% a bosques mesófilos de montaña y manglares (CONAFOR 2013). Finalmente cerca del 30% restante de la superficie nacional corresponde a un uso de suelo distinto al forestal, como pueden ser: agrícola, ganadero, áreas urbanas, entre otros.

Si bien el territorio nacional se encuentra cubierto por comunidades vegetales naturales, a su vez en él se llevan a cabo una serie de actividades antrópicas como lo son la agricultura y la ganadería. Dependiendo de la actividad o aprovechamiento que se le da a la cobertura vegetal en un área determinada, se le atribuye un *uso de suelo*, cabe mencionar a continuación la explicación de las definiciones correspondientes a dichos términos.

Es importante definir a que se refiere al hablar de cobertura terrestre, ya que podría llegar a confundirse con la definición de uso suelo, por ello, Lambin *et al.*, (2006) realizan una importante distinción en cuanto a estas definiciones, pues proponen a la cobertura terrestre como el medio en el que se llevan a cabo un gran número de procesos biofísicos, a su vez definida por los atributos de la superficie de la tierra incluyendo las características bióticas y edáficas. Por ende, se puede entender al cambio de cobertura terrestre como la sustitución de una cobertura por otro tipo de cobertura, es decir el cambio en la clasificación del suelo. El término cobertura implica el porcentaje que ésta abarca en un área, en contraste con la *cubierta*, el cual es un concepto puramente cualitativo.

Además de estas distinciones, el autor hace énfasis en el término *uso de suelo*, el cual encuentra intrínsecamente relacionado con los arreglos y actividades que el ser humano desarrolla sobre la cobertura terrestre, por ejemplo, actividades de tipo agrícola y ganadera, así como los asentamientos urbanos. El siguiente es un ejemplo de las definiciones anteriores y su relación:

Pastizal es un término que hace referencia a la cobertura terrestre, mientras que *área de pastoreo* se refiere al uso que se da a esta cobertura.

La cobertura vegetal, que hace referencia a los atributos biofísicos de la superficie terrestre, en conjunto con los usos de suelo que representan el propósito con el cual se aprovechan dichos atributos, determina el funcionamiento de los ecosistemas terrestres.

A su vez, la cobertura vegetal puede identificarse de dos formas según se haya efectuado algún cambio en ésta o no. Si como se menciona, en lugares

donde no ha habido modificación o esta ha sido ligera y el suelo continúa cubierto por vegetación natural, es considerada como *primaria*. Si al contrario, la vegetación ha sido removida parcial o totalmente, y sólo se llega a recuperar un porcentaje en el sitio, se le considera vegetación *secundaria*, misma que puede ser estructuralmente diferente a la original.

En la actualidad los sistemas de cultivo y ganaderos ocupan alrededor de una cuarta parte de la superficie terrestre, transformación que ha sido impulsada por la población, en gran parte, para resolver el enorme aumento de la demanda de alimentos, agua, fibras y combustibles (Reid *et al.*, 2005).

Generalmente, se comienza con la construcción de carreteras para abrir paso a los bosques con el objetivo de ser talados en la búsqueda por explotar los recursos maderables de la zona, posteriormente llegan agricultores y comienzan a producir sus cultivos en áreas taladas. Años después, dado que el suelo no puede soportar los métodos intensivos de cultivo, y aunado a otros factores tales como la inseguridad, migración y presencia de programas asistencialistas, los agricultores abandonan dichas áreas dejando crecer la hierba. Es en ese momento, llegan los productores de ganado aprovechando que se requiere de poca o nula inversión para comenzar a criar ganado en tierras abandonadas.

Las modificaciones a la cobertura vegetal han existido desde la fundación de las primeras civilizaciones, sin embargo la tendencia de dichas modificaciones va de manera acelerada y en aumento en los últimos años, propensión que se ve fuertemente influenciada por los estilos de vida y patrones de consumo implementados por los seres humanos en las últimas décadas. A su vez, el interés en el monitoreo del estado que guardan dichas coberturas también ha visto una progresiva tendencia, hecho que se ve reflejado en la implementación de programas y reuniones a nivel internacional, algunas de las cuales México ha sido partícipe.

1.3 Procesos de cambio de usos de suelo

Desde el siglo XVIII, pero más intensamente en los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas del mundo más rápida y extensamente que en ningún otro periodo comparable de la historia (Mas *et al.*, 2009). Entre las consecuencias más obvias destaca la pérdida del potencial de uso de los múltiples bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas para el bienestar humano, el calentamiento global, la alteración de ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la introducción de especies exóticas, el exterminio de especies nativas y la pérdida de hábitat en general (Velázquez *et al.*, 2002), destacando que dicha pérdida se ve acentuada en áreas forestales tropicales.

Dado que México cuenta con una gran riqueza de recursos naturales y diversidad genética, es considerado un país megadiverso por ser poseedor del 12% de la biota mundial. Las cubiertas vegetales como bosques y selvas brindan un gran número de servicios ambientales, tales como la producción de oxígeno, captura de CO₂ y drenaje a acuíferos subterráneos, por mencionar los principales. Además de constituir una fuente de materia prima tanto para comunidades rurales como para un amplio número de empresas e industrias forestales.

Sin embargo, México no escapa a la dinámica económica actual, y en la búsqueda por satisfacer las demandas provenientes del incremento poblacional con sus altas tasas de consumo y demanda alimenticia, provoca la deforestación en las zonas de alta diversidad biológica, lo que trae consigo consecuencias nocivas en la modificación del paisaje, manifestadas en cambios en la cobertura terrestre.

Por ejemplo, se estima que nuestro territorio ha perdido la mayor parte de la cobertura original de bosques y selvas, entre ellas, la selva alta que actualmente ocupa sólo el 10% de la superficie original (Rzedowski, 1978). Dichos cambios de

uso sobre la cobertura vegetal son tan agudos, que cuando se suman a nivel global sus implicaciones afectan el funcionamiento general del Sistema Tierra.

Entre las principales consecuencias se puede citar la contribución al cambio climático tanto local, como regional, la afectación a los sistemas bióticos globales y la extinción de miles de especies cada año. El daño ambiental que se produce es en gran medida irreversible, y es probable que sus implicaciones se vean reflejadas en todo el mundo por varias generaciones.

Se estima que el 82% de las 155 mil hectáreas deforestadas cada año en el territorio mexicano son consecuencia del cambio de uso de suelo, ya sea para uso agropecuario, de turismo, industrial o por crecimiento urbano (CONAFOR, 2013). En el periodo entre 1985 y 2010, el territorio nacional presentó grandes cambios en la cobertura de diferentes tipos de vegetación, todos ellos a través de la deforestación. En el cuadro 1, presentado a continuación, se ilustran los principales cambios por tipo de vegetación:

Cuadro 1. Cambios en la cobertura vegetal nacional entre 1985 y 2010.

Cobertura vegetal	Cambio porcentual 2010 respecto a 1985	Superficie que cambió de 1985 a 2010 (km²)
Bosque de coníferas	- 13.06	- 12,356.23
Bosque de coníferas latifoliadas	- 0.13	- 161.56
Matorral	- 9.12	- 49,605.18
Otros	- 9.65	- 4,675.17
Pastizal	- 4.12	-7,582.61
Selva alta	- 27.92	- 1,223.46
Selva mediana	- 5.90	- 6,708.27
Selva baja	- 15.64	- 35,257.13
Total	-8.47	- 126,602.53

Fuente: CONAFOR, 2013

La evolución perceptible y generalizable de la vegetación o los usos antrópicos por medio de un intervalo de tiempo en determinada porción de terreno se identifica como el Análisis del Cambio en la Cobertura y Uso del Suelo (ACCUS).

El ACCUS resulta ser una herramienta de gran calidad y relevancia al momento de caracterizar una región, además de ser un elemento básico del diagnóstico para el ordenamiento territorial. Por ello, en la actualidad el ACCUS se considera el procedimiento más confiable para medir la deforestación, la alteración y la transformación de los usos del suelo y su dinámica a través del tiempo (Mas *et al.*, 2003).

Lambin *et al.*, (2001) mencionan que este tipo de estudios, sobre el cambio en la cobertura y uso del suelo proporcionan las bases para comprender las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada.

Hoy en día, se tiene evidencia de la importancia de conocer como la cobertura vegetal se ha visto modificada a través del tiempo, con el fin de hacer evaluaciones de los cambios que se pueden esperar y el impacto de los mismos al funcionamiento general de los ecosistemas. Al mismo tiempo, se espera contar con bases de datos cada vez más robustas, que nos ayuden no solo a inferir tendencias, sino también a controlar y/o revertir pérdidas de un patrimonio insustituible.

Quedando de manifiesto que los cambios sobre la cobertura vegetal son dinámicos, no existe duda sobre la importancia de conocer la cartografía referente al tema en el territorio mexicano así como los usos que se le dan a la misma. Aunado a esto, destaca la imperante necesidad de conocer la exactitud de los datos plasmados en dicho material, ya que se posiciona como un insumo indispensable en la toma de decisiones para la mayoría de instituciones y dependencias relacionadas directa o indirectamente con el tema en cuestión. Además de constituirse como herramienta base para la gestión ambiental y la implementación de políticas y/o programas de monitoreo forestal, por ejemplo los

implementados por CONAFOR, bajo su programa de Pago por Servicios Ambientales, con los cuales se busca generar opciones de desarrollo para las comunidades locales, mediante la protección de los recursos vegetales del territorio nacional.

1.4 Deforestación.

Como menciona CONAFOR, el proceso de deforestación se define como un cambio drástico del uso del suelo, en el cual se pierde toda la cobertura forestal y pasa a otros usos de suelo. Durante la deforestación el carbono almacenado en los bosques se libera a la atmósfera a través de la quema y descomposición de la biomasa, lo que provoca al mismo tiempo la erosión del suelo; mientras que en el proceso de degradación de un bosque no se pierde toda la cobertura forestal. Es decir, la degradación se refiere a los cambios que afectan negativamente a la estructura de la cobertura o funcionamiento de la misma y por lo tanto, reducen su capacidad para suministrar productos o servicios. Indirectamente la degradación puede llevar a un proceso de deforestación o de pérdida de la cobertura forestal (CONAFOR, 2013).

La deforestación siendo una de las formas más comunes de cambio de cobertura vegetal, sitúa a México dentro del grupo de países con las tasas más altas de deforestación, debido, como se mencionó anteriormente, al cambio de áreas forestales por zonas agrícolas y ganaderas. Una parte considerable y cada vez mayor de las tierras agrícolas deforestadas se dedica a la expansión de la producción ganadera, a través de agricultura intensiva y en gran escala de cultivos forrajeros. Esta tendencia obedece sobre todo al gran incremento de la demanda de productos pecuarios, resultado del aumento poblacional.

Las altas tasas de deforestación dentro de un país, están generalmente relacionadas con el patrón de consumo global, el crecimiento demográfico y la pobreza. En el último caso, la degradación de los bosques y selvas podrían constituirse como una expresión del colapso de los pocos recursos a los que tiene acceso dicha sección de la población.

Algunas de las causas directas de la deforestación pueden incluir la transformación de selvas en terrenos agrícolas y ganaderos, el amplio mercado de tala comercial, la recolección intensiva de leña como combustible, así como la agricultura itinerante de roza, tumba y quema.

Datos reportados por la FAO¹, indican que en América Central y América Latina la expansión de pastizales para la actividad ganadera ha sido una de las mayores causas de deforestación. Entre 1994 y 2004, la superficie predestinada al cultivo de la soya en América Latina se duplicó, esto debido al incremento de la demanda de alimentos para animales, lo que inherentemente está correlacionado a la demanda de carne para consumo humano.

Sin embargo, asumiendo el papel preponderante que toma el crecimiento de la población y/o la pobreza, no se puede asumir una simplificación de las fuerzas que ejercen sobre un proceso tan complejo como la deforestación.

Los resultados de algunas encuestas sobre el tema de la deforestación apoyan la idea de que el crecimiento demográfico no es el único y muchas veces ni siquiera la principal causa subyacente del cambio de la cubierta forestal (Lambin, *et al.*, 2001). Generalmente, la deforestación en los trópicos se asocia a la existencia de grandes extensiones forestales, pobladas mínimamente por habitantes nativos (comunidades indígenas), los cuales no tienen poder de influencia sobre las fuerzas exógenas que actúan sobre ellos.

Por lo anterior, es importante tener en cuenta los factores indirectos que explican por qué se ha favorecido la expansión agrícola y ganadera, ya que en lugar de promover una silvicultura sustentable, el Gobierno tiende a favorecer proyectos en los cuales se le da un uso exhaustivo a los suelos, por lo que se termina degradando a pasos agigantados.

Como ejemplo podemos mencionar el programa de colonización en México, cuya base fue el reparto de tierras que se hizo de 1958 a 1964

¹Datos publicados por la Subdirección de Información Ganadera y de Análisis y Política del Sector (AGAL) de la Dirección de Producción y Sanidad Animal, FAO.

(aproximadamente), como respuesta a las demandas de los campesinos sin tierras, lo que implicó abrir la selva tropical húmeda a la colonización agrícola.

Como otro factor indirecto detrás de la deforestación se encuentran los proyectos de construcción de carreteras en zonas con bosques y selvas. Dichas carreteras permiten el libre acceso a extensiones forestales por parte de los taladores ilegales, quienes extraen los árboles más preciados, según el mercado maderable internacional. Consecuentemente a lo anterior, es probable que un bosque talado sea desmontado para uso agrícola o ganadero.

Es importante también resaltar el papel que han jugado las políticas centralizadas y unilaterales que no incluyen la participación campesina, siendo ellos los propietarios de cerca del 80% de los bosques y selvas del país.

En respuesta al deterioro ambiental, se han adoptado políticas de conservación a nivel mundial que promueven, entre otras medidas, la creación de nuevas Áreas Naturales Protegidas (ANP). Sin embargo, en países como México con particulares excepciones y debido a su ubicación geográfica (es decir, en zonas tropicales), la creación de ANP hasta ahora no parece asegurar la permanencia del capital forestal. En relación a esto, se tiene ejemplos donde las demandas socio-económicas que se nutren directamente del manejo de los recursos forestales, las ANP han propiciado conflictos con secuelas sociales y ambientales drásticas (Velázquez *et al.*, 2005), lo que plantea la necesidad de desarrollar esquemas de manejo forestal sustentable consecuente con las tareas de conservación.

En respuesta a ello, la CONAFOR realiza un esfuerzo destacable mediante la implementación del Programa de Pago por Servicios Ambientales, en el cual se ha constatado la eficacia de su ejecución en áreas de particular interés, tales como los bosques tropicales situados al sureste de la República Mexicana².

La conservación y manejo sustentable de los bosques del planeta, así como su restauración resultan impostergables, ya que, como se mencionó en párrafos

² Como ejemplo de ello se recomienda consultar el trabajo de Carabias *et al.*, (2010).

anteriores, la pérdida de los mismos tiene grandes implicaciones en el cambio climático, tanto a escala local, como global.

La acción de mitigación contra este fenómeno resulta indispensable y debe ser concertada internacionalmente, ya que para enfrentar dicho problema, ningún país podrá resolverlo aisladamente.

Es por ello que México se suma a dichas acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, mediante su participación en el programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD+).

1.5 El programa REDD+

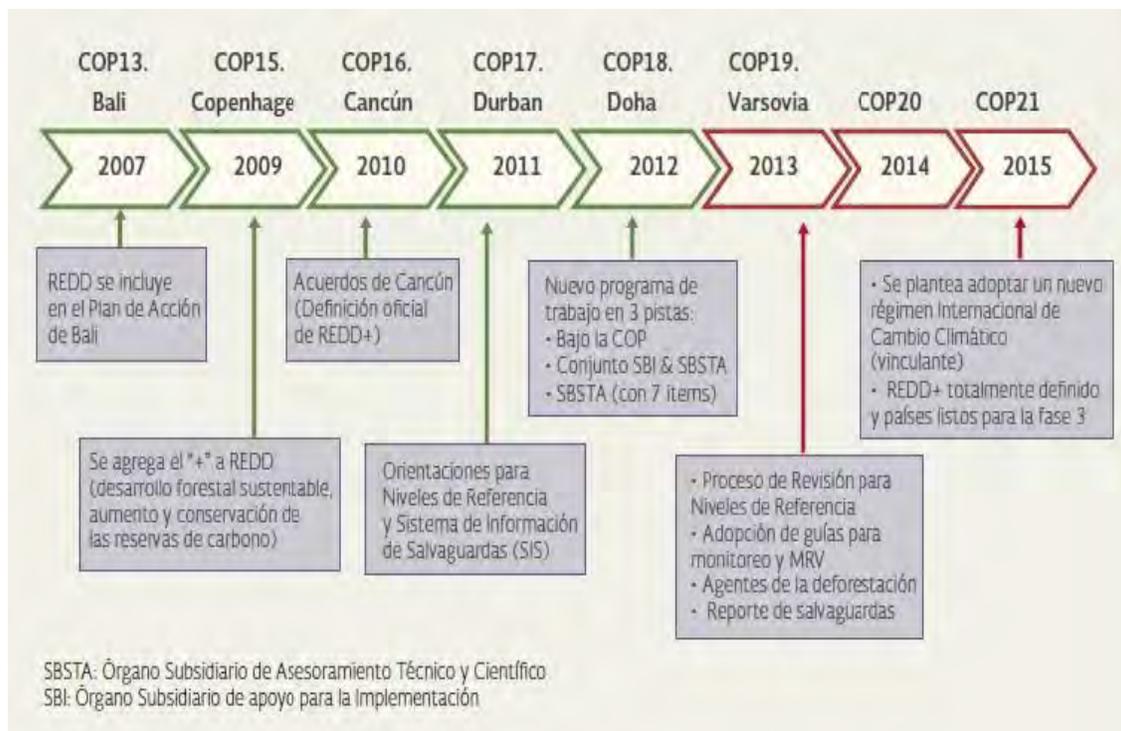
En el año 1992, durante la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, Brasil, se presentó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), misma que tiene como objetivo “lograr la estabilización de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático” (CONAFOR 2013). Es decir, lograr que las emisiones de GEI no sean de peligro para el ambiente y los seres vivos.

Dentro de la CMNUCC se encuentra la Conferencia de las Partes (COP)³; y no fue hasta la novena edición de ésta (COP 9), celebrada en Milán, en donde se trataron por primera vez temas concernientes al sector forestal, ya que adoptaron diversas decisiones sobre las actividades de reforestación y forestación, siendo ésta la única iniciativa en torno a mitigar el cambio climático que está directamente relacionada con bosques.

Sin embargo, hasta la COP 13⁴ se adoptó un plan global a largo plazo para llegar a la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD). En marzo del 2009 se reconoció la función de los bosques en la conservación y las reservas de carbono agregando un signo “+” a REDD. En la figura 1 se observa el avance de REDD+ en la CMNUCC.

³La COP es una asociación de todos los países miembros, cuya función es la toma de decisiones a implementar por la convención. Ésta se reúne todos los años desde 1995.

⁴Realizada en Bali, en el 2007.



Fuente: CONAFOR, 2013.

Fig. 1 Línea histórica del mecanismo REDD+

REDD+ se refiere al mecanismo que integra actividades que reducen la deforestación y degradación de un área, región o país con el cálculo de las reducciones de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Dicho mecanismo se presenta como un componente de financiamiento de mitigación para los países menos industrializados que cuenten con macizos forestales.

En la COP 16, celebrada en Cancún en el 2010 se establecieron criterios mínimos para seguir en el proceso de construcción de REDD+, mismos que son presentados por CONAFOR (2013) y enlistados a continuación:

- Un plan de acción o estrategia nacional. Se refiere a una estrategia que sirva de guía para la implementación de REDD+ a nivel nacional.
- Niveles nacionales de referencia de emisiones forestales o niveles nacionales de referencia forestal. Se refiere al estatus actual del balance de emisiones.

- Sistemas nacionales de Monitoreo, Reporte y Verificación (sistema MRV) robustos y transparentes para reportar emisiones y absorciones de carbono asociadas a los bosques. Se refiere a un sistema donde se lleve la contabilización de las emisiones y absorciones de carbono y que sirva para reportar a la CMNUCC.
- Un sistema para informar cómo se están cumpliendo las salvaguardas en el diseño de la estrategia nacional. Se refiere a la inclusión y respeto de las comunidades locales y los pueblos indígenas, así como la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios que proveen.

REDD+ reconoce la importancia de los bosques en la mitigación del cambio climático, así como la biodiversidad albergada en ellos y la función que poseen como sustento de vida de muchas comunidades y pueblos indígenas, por lo que debe ser integrado en procesos de gobernanza forestal con el fin de asegurar los derechos de dichas comunidades (CONAFOR, 2013).

1.6 La problemática de la estimación robusta de la deforestación.

Las políticas internacionales y convenciones mencionadas anteriormente son reflejo de la gran importancia que tienen las zonas forestales no solo a nivel nacional, sino también internacional. Al mismo tiempo queda de manifiesto su fragilidad así como las crecientes amenazas a las que se ven relacionadas. En México, siendo la principal de ellas la deforestación, sin dejar de lado que la degradación también está presente en gran parte del territorio nacional.

La cuantificación o medición de la deforestación ha resultado ser muy compleja ya que las estimaciones realizadas hasta la fecha están influenciadas por múltiples conceptos, diversos objetivos y metodologías que no permiten su comparación, lo cual ha dado paso a variadas cifras cuyo rango de estimaciones es muy amplio y va desde 75 mil a casi 2 millones de hectáreas de pérdida de recurso forestal por año (Lund *et al.*, 2002).

Parte de esta dificultad para estimar las tasas de deforestación provienen de las características físicas del país, que atribuyen limitantes desde el punto de vista metodológico y técnico, aunadas a la compleja dinámica de cambio de la vegetación, en donde la tasa de recuperación es similar a la de destrucción en otras zonas en el mismo lapso de tiempo. Si a esto le sumamos la regeneración natural y la reforestación, confluye en el impedimento de lograr una estimación estática de una misma área en tiempos diferentes. El cuadro 2 presenta las tasas de deforestación reportadas para México, del año 1988 al 2010.

Cuadro 2. Tasas de deforestación reportadas para México.

Fuentes académicas	Tasa (miles ha/año)
Repetto (1988)	460
Masera et al. (1992)	668
Velázquez et al. (2002)	550
Myers (1989)	700
Castillo et al. (1989)	746
Toledo (1989)	1500
Grainger (1984)	1600
Sánchez et al. (2008)	484
Fuentes oficiales	
	Tasa (miles ha/año)
CONAFOR (2004)	260
SEMARNAT (2006)	365
SARAH (1994)	370
FAO (1997)	508
FAO (1988)	615
FAO (1995)	678
FAO (Torres R., 2004)	776
CONAFOR (2010) ⁵	1000

Fuente: Modificado de Velázquez *et al.*, 2005.

⁵ FAO. 2010. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Informe principal (FRA 2010). Roma

Es importante recordar que toda base de datos geográfica presenta un grado de incertidumbre que depende principalmente, de la calidad de los insumos y de la metodología adoptada para su elaboración. Aunado a esto, se resalta el hecho de que sólo el estudio realizado por Velázquez *et al.*, (2002) fue sometido a un mecanismo de evaluación de la calidad de la información, observando dicho fenómeno a nivel nacional, obtendremos estimaciones poco confiables e imprecisas.

En cuanto a las discrepancias entre las tasas reportadas por las entidades académicas y gubernamentales mencionadas en el cuadro anterior, se puede inferir que éstas se deben a la diferencia de escalas, leyendas e insumos, intrínsecamente relacionado a, como se mencionó antes, la falta de evaluación de la calidad de sus datos.

Es importante atender el tema, debido a que al presentarse tasas de deforestación contradictorias, estas repercuten en la credibilidad de las distintas fuentes, lo que fuerza la debilidad institucional en la regulación del cálculo de dichas tasas (Couturier *et al.*, 2012).

En la evaluación de la confiabilidad cartográfica, un problema crucial es la conciliación de los requisitos estadísticos, que permiten una evaluación objetiva y científicamente defendible con las consideraciones logísticas que toman en cuenta los problemas de costo y de acceso para recolectar la información de los sitios de verificación.

Existen diferentes mecanismos que permiten aminorar los problemas prácticos relacionados con el número y la selección de los sitios de verificación sin perder rigor estadístico. (Mas *et al.*, 2003). Por ejemplo, la estratificación del muestreo, que consiste en repartir los esfuerzos de muestreo con base en estratos geográficos. Realizar la estratificación con base en las categorías del mapa permitirá garantizar que no se sobre muestreen las categorías con mayor extensión a expensas de las de menor superficie (Card, 1982).

Debido a que actualmente los insumos comúnmente utilizados para la cartografía son las imágenes de percepción remota, que por la naturaleza misma del objeto de estudio, es decir la vegetación, la cual presenta una distribución a veces difusa, es difícil obtener una representación cartográfica totalmente libre de error.

Es por ello que crece la necesidad de no solo cuantificar porcentualmente, como se ha venido haciendo comúnmente, la extensión del recurso forestal en nuestro país, sino también de someter a una evaluación estadística los datos reportados por dependencias encargadas de dar a conocer el estado actual de los mismos, comúnmente plasmados en cartografía, para así contar con bases de datos con cobertura nacional compatibles en sus categorías y de alta calidad geográfica.

Por lo anterior, y tomando en cuenta que la minoría de los estudios muestran una tendencia por someter a evaluación la calidad de su información, el propósito de esta tesis es la contribución a la construcción de cartografía nacional estadísticamente confiable, mediante la implementación de esquemas metodológicos para cartografía nacional.

1.7 Confiabilidad cartográfica con lógica difusa.

El ingeniero iraní Lotfy A. Zadeh, fue el primero en investigar la lógica difusa al examinar lo que después él llamaría *principio de incompatibilidad*: “conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye, hasta el umbral más allá del cual la precisión y el significado son características excluyentes”.

Gracias al planteamiento antes mencionado, presentó a la lógica difusa como una lógica alternativa a la clásica, la cual pretende agregar un grado de vaguedad a las cosas que evalúa, es decir, admite representar el conocimiento común que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo, para así definir evaluaciones

convencionales. Contrario a la lógica clásica o booleana, que trabaja con información que es considerada precisa y que surge de la necesidad del ser humano por clasificar objetos y conceptos. Recientemente la cantidad de aplicaciones de la lógica difusa han crecido considerablemente, alcanzando así la evaluación de cartografía temática.

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge de la existencia de conceptos sin límites claros, por ello, en el universo de los conjuntos difusos un elemento puede tomar valores de pertenencia en un intervalo entre 0 y 1.

En 1994 Gopal y Woodcock, fueron pioneros al implementar la teoría de los conjuntos difusos en las bases de datos para la evaluación de los mapas de cobertura terrestre. En su trabajo introdujeron un sistema de calificación basado en una escala lingüística, apoyada en la premisa de que comúnmente se usa una construcción lingüística para describir la exactitud de un mapa. Dicha escala está compuesta por cinco niveles, enumerados a continuación:

- I. Absolutamente equivocado
- II. Comprensible pero equivocado
- III. Razonable o aceptable
- IV. Buena respuesta
- V. Absolutamente correcto

Usando esta escala lingüística los autores desarrollan métodos basados en funciones difusas, que proveen más información acerca de la exactitud del mapa que una propia matriz de confusión⁶.

Posteriormente, dicha escala se traduce a una escala numérica, cuyos valores serán analizados en la matriz de confusión final. Para implementar la teoría de los conjuntos difusos en el proceso de evaluación cartográfica, se asigna una etiqueta a cada sitio de verificación, considerando así las ambigüedades que

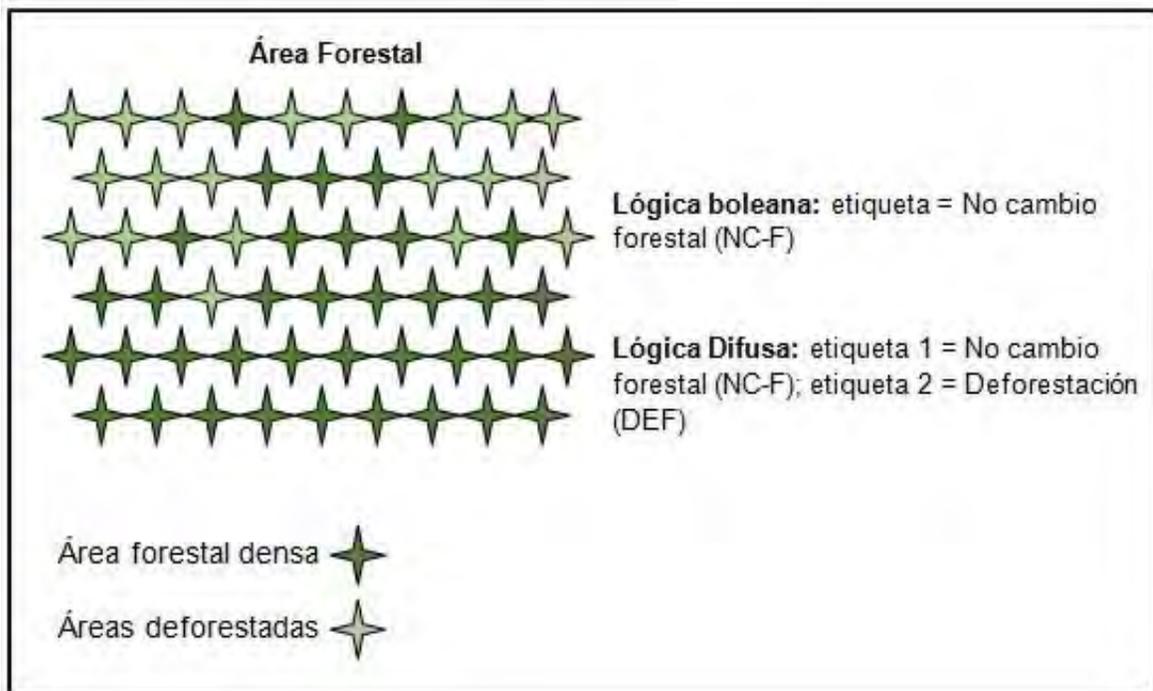
⁶ Se toma como punto de comparación a la matriz de confusión ya que es el resultado derivado de los cálculos en la evaluación de la confiabilidad cartográfica.

podiera llegar a tener el sitio; ya que, podría por ejemplo, situarse en una zona de transición entre dos tipos de vegetación, o encontrarse en una zona altamente fragmentada, como resultado de un proceso de degradación forestal. Lo anterior nos conllevaría a una estimación errónea de la confiabilidad del mapa, por ello es recomendable asignar dos etiquetas, considerando así el razonamiento del intérprete que con frecuencia actúa con este tipo de información.

En el presente trabajo se aplicará la lógica difusa para asignar un posible segundo proceso de cambio llevado a cabo sobre la cobertura vegetal. Por ejemplo, al interpretar un sitio de verificación cubierto casi en su totalidad por bosque denso se califica al sitio como forestal. Sin embargo, en la información de referencia encontramos pequeñas áreas con procesos de deforestación, que sobrepasan por muy poco, el límite donde se considera deforestación⁷ (supongamos que dicha suma arroja un 50% de cobertura perdida entre la fecha inicial y la final, en donde la cobertura forestal ya tiene una densidad arbórea menor al 10%). Por ello, bajo un enfoque de lógica difusa, se le asigna una segunda etiqueta, con la clase de deforestación.

La figura 2 representa un ejemplo en la clasificación de uno de los sitios de verificación y las etiquetas que se le asignarían a éste de implementar o no un enfoque difuso.

⁷ Según la FAO, para considerar una zona como no bosque se debe presentar menos del 10% de densidad arbórea.



Elaboración propia

Fig. 2 Diferencia clasificatoria en cambio de cobertura forestal entre lógica booleana y lógica difusa

CAPÍTULO II

PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA DE USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN EN MÉXICO

2.1 Cartografía de usos de suelo y vegetación en México

Como se documentó en el capítulo anterior, es un hecho que en las últimas décadas la cobertura forestal a nivel global se ha visto reducida, tendencia que sigue en un constante aumento, principalmente debido a la actividad del hombre sobre los ecosistemas.

Pero ¿de qué magnitud es el daño realizado a estos? ¿Cuáles son las actividades que más daño han ejercido sobre la cobertura forestal? Debido a que son cuestiones relevantes, y en la búsqueda por indicar los tipos de vegetación y el estado de los mismos así como su dinámica de uso, diferentes instituciones se han dado a la tarea de elaborar la cartografía de cobertura vegetal para el territorio mexicano, tendencia que va en constante ascenso debido a la acelerada influencia de las actividades humanas sobre los ecosistemas.

A mediados de 1950, se inician los trabajos relevantes en relación al estudio de la vegetación del país, destacando entre ellos la elaboración de mapas de varios estados, como resultado de la producción del Inventario Nacional Forestal, el cual nace como un proyecto enfocado a las masas forestales y no forestales de los bosques templados. A la fecha se han llevado a cabo cinco inventarios forestales de cobertura nacional, presentados por CONAFOR:

- Primer Inventario Nacional Forestal 1961-1985
- Inventario Nacional Forestal de Gran Visión 1991
- Inventario Nacional Forestal Periódico 1994
- Inventario Forestal Nacional 2000
- Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009

El primer Inventario Forestal (1961-1985) tuvo como objetivos la localización y cuantificación de las diferentes zonas forestales así como obtener información dasométrica y evaluar daños a los bosques y selvas. Lo anterior para delimitar las zonas comerciales o potencialmente comerciales desde el punto de vista maderable.

Posteriormente, de 1991 a 1992 se lleva a cabo el Inventario Nacional Forestal de Gran Visión, con el objetivo de obtener una actualización rápida de la delimitación de los recursos forestales del país. El Inventario Nacional Forestal Periódico fue el siguiente en realizarse y entre sus principales objetivos destacan: la actualización de información estadística y cartográfica de la superficie forestal por tipos de vegetación, formaciones y clases de uso; determinar la posibilidad de producción de madera sostenible, así como clasificar y delimitar las zonas de conservación, restauración y producción, en los terrenos forestales, de acuerdo a las características y funciones de los recursos silvícolas (SEMARNAT, 2012).

Continuando con los objetivos planteados por la FAO, la cual insta a reportar la evaluación de los recursos forestales del territorio nacional de manera quinquenal y decenal, se procede a la elaboración del Inventario Forestal Nacional 2000, cuya elaboración fue encomendada a la Universidad Nacional Autónoma de México, y entre sus principales objetivos destacan: estimar los recursos forestales del país de forma estadística con indicadores sobre la precisión y exactitud obtenidos; determinar las características cualitativas y cuantitativas de los recursos forestales, como apoyo a la política forestal nacional y sentar las bases para establecer un sistema continuo de evaluación y monitoreo de los ecosistemas forestales (SEMARNAT, 2012).

Actualmente CONAFOR, mediante el Inventario Nacional Forestal y de Suelos, está llevando a cabo el levantamiento en campo del segundo ciclo de inventario 2009-2014, contando a la fecha con tres años de remuestreo (2009, 2010 y 2011).

Cabe destacar que los Inventarios Forestales antes mencionados utilizan como insumo base las Cartas de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, congruentes a las fechas respectivas a cada proyecto. Además CONAFOR cuenta con información cartográfica de trabajos desarrollados en la institución, mismos que sirven de apoyo en el diseño de dichos inventarios.

Paralelamente a la elaboración del primer inventario, el 1 de octubre de 1968, la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP), con el fin de analizar el inventario de los recursos naturales del país y representarlos cartográficamente, inicia la elaboración de la serie de la carta topográfica en escala 1:50 000, única en su género en esa época. Dos años después de haberse creado la CETENAP, cambia de nombre por el de Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). Dicha comisión continúa con la labor de producción cartográfica topográfica y temática, destacando la elaboración de material cartográfico especializado en temas sobre recursos naturales, como: la carta de uso potencial de agricultura y la carta de uso potencial forestal en escala 1: 250 000 (INEGI, 2000).

La cartografía 1:50 000 de Uso de suelo se elaboró como una sola serie, sin embargo es posible observar una evolución en su marco conceptual, constituida por tres versiones: la primera en 1975, la segunda alrededor de 1978 y la tercera publicada hasta 1981. Esta última posee particular importancia, ya que representa el origen de la base conceptual de la actual cartografía de Uso de Suelo y Vegetación (CVUS) a escala 1:250 000, la cual está constituida a la fecha por cinco series.

Los productos cartográficos referidos a CVUS tienen el objetivo principal de indicar la vegetación natural e inducida a lo largo del territorio mexicano, así como el aprovechamiento que se les da a las mismas.

Para el año de 1980 el INEGI comienza un proceso de modernización de la información, mediante el cual presenta sus datos en el Sistema Nacional de Información Geográfica (SNIG).

Dado que la cobertura vegetal se encuentra en constante modificación, como método de evaluación de la misma y para hacer un uso más eficiente de los recursos naturales, el INEGI se da a la tarea de realizar para los años 1968 a 1986, con referencia de tiempo para los años setenta y editada con información procedente de fotografías aéreas, la primera Serie a escala 1:250 000, en la cual se clasifica la vegetación y usos agropecuarios, basada en los tipos de vegetación propuestos para México por Miranda y Hernández (1963) y Rzedowsky (1978).

Posteriormente se continúa con la generación de sus cuatro series cartográficas consecutivas, con el objetivo de mantener actualizada la cartografía y así contar con información reciente tanto de las condiciones de la vegetación como de la dinámica agrícola, representando el origen de la base conceptual de la actual cartografía de CVUS a escala 1:250,000. Dichas series consecutivas son: Serie II, editada con información de 1993 (basada en compuestos con imágenes LANDSAT TM de 1993); Serie III, publicada en el año 2002; la Serie IV, publicada en el año 2007; y por último la Serie V publicada en el año 2011.

En el caso de la cartografía referente a uso de suelo y vegetación, es para el año 1999 cuando esta es convertida a formato digital (ver cuadro 3). Entre los objetivos que destacan de la elaboración de dicha cartografía, podemos citar los siguientes (INEGI, 2015):

- Indicar la distribución de los tipos de vegetación natural e inducida en México.
- Identificar características relevantes de la vegetación arbórea de nuestro país (altura y cobertura).
- Conocer la localización de las áreas agrícolas, así como los tipos de cultivos que se desarrollan en esas áreas por su permanencia en el terreno.

- Proporcionar información ecológica-geográfica para la enseñanza e investigación sobre los recursos naturales.
- Apoyar la generación de estadísticas que permitan cuantificar el estado que guarda la cobertura vegetal y el uso del suelo en México.
- Servir de marco general para el establecimiento de políticas a nivel nacional y/o regional.

Cuadro 3. Principales características de las series de CVUS de INEGI.

	Serie I	Serie II	Serie III	Serie IV	Serie V
Fecha de referencia editorial.	80's	90's	2002-2005	2007-2010	2011-2014
Fecha de datos en campo	(1986) 1971-1986	1993-1998	2002-2003	2007-2008	2012-2013
Escala de resolución	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000
	Grano de emulsión/escala de vuelo	Pixel de 50 m de origen, interpretación sobre imagen impresa escala 1:250,000	Pixel de 27.5 m	Pixel de 10 m	Pixel de 27.5 m
Datos	Fotografías aéreas	Espacio mapas impresos	LANDSAT TM (30m)	SPOT 5 (10m)	LANDSAT TM (30 m)
Metodología	Tecnología analógica	Tecnología analógica	Tecnología digital	Tecnología digital	Tecnología digital
Información	Análogica	5 capas	14 capas	13 capas	14 capas

Fuente: INEGI, 2013.

Cabe destacar que, para la elaboración de dicha cartografía, INEGI ha utilizado los insumos y métodos de análisis más avanzados en su momento, y que gracias a la automatización y actualización de los datos, en sus versiones más recientes es posible implementarlas en un Sistema de Información Geográfica, lo que la convierte en un insumo importante para el apoyo de políticas de planeación regional.

Originalmente, la cartografía de Uso del Suelo y Vegetación tuvo un formato analógico a escala 1:50 000, pero por la necesidad de disponer de un marco que permitiera conocer el estado de la vegetación en la totalidad del territorio nacional fue cambiada a 1:250 000, escala que conserva un grado de detalle aceptable para las características de nuestro país y a partir del año 2000 fue convertida a formato digital (INEGI 2009). La disponibilidad de información de Uso del Suelo y Vegetación para México se presenta a continuación en el cuadro 4:

Cuadro 4. Información de uso de suelo y vegetación en México

Escala	1:50 000	1:250 000	1:250 000	1:1 000 000	1:1 000 000
Tema	Cartografía impresa	Conjuntos de datos individuales	Conjunto Nacional	Conjuntos de datos individuales	000 Conjunto Nacional
Uso de Suelo y Vegetación.	Serie única 806 cartas	Series I, II, III, IV y V. 144 conjuntos de datos	Series I, II, III, IV y V. Un conjunto nacional	Series I y II 12 conjuntos de datos	Series I y II Un conjunto nacional

Fuente: INEGI 2014

Las fechas de referencia para cada serie son:

- Serie I: 1976
- Serie II: 1993
- Serie III: 2002
- Serie IV: 2007
- Serie V: 2011

Dado que el cubrimiento de la información generada por INEGI abarca diferentes periodos de tiempo, permite la realización de estudios multi-temporales en función del nivel de uso de suelo y vegetación, y cuyo fin es cuantificar los cambios existentes en la cobertura vegetal entre estos periodos.

Con excepción de la Serie I, que fue elaborada de manera analógica, la información de las otras series está generada a partir de datos estructurados en formato vectorial y codificados de acuerdo con la Tabla de Atributos que relaciona cada uno de ellos con la caracterización que se ha hecho en el Diccionario de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, presentado en 1997, de los diferentes objetos geográficos contenidos.

La información digital ofrece grandes ventajas en comparación con la analógica, ya que puede ser adecuada y modificada según las necesidades de los usuarios, todo esto mediante la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

El siguiente apartado está enfocado a las series cartográficas de cobertura vegetal y uso de suelo III, IV y V de INEGI, dado que son los insumos básicos para el presente trabajo.

2.2 Mapas de uso de suelo y vegetación derivados de las series III, IV y V de INEGI.

El desarrollo de la serie III de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo implicó un rediseño conceptual, a partir de las necesidades de los diferentes usuarios de la información que, a su vez implicó una adecuación y complementación del sistema de clasificación que se había aplicado en las dos primeras series de este tema, con el objeto de que pudiera ser utilizada por otros usuarios de las diferentes instancias de gobierno para realizar diversas actividades relacionadas con la generación de información de recursos naturales como es el caso del Inventario Nacional Forestal (INEGI, 2009).

Elaborada entre los años 2002 – 2005, la serie III de INEGI, con una escala 1:250 000 se obtuvo mediante la interpretación de imágenes LANDSAT ETM correspondientes a los años 2002-2003. El cuadro 5 refleja las principales adecuaciones al sistema de clasificación:

Cuadro 5. Adecuaciones al sistema de clasificación de uso de suelo y vegetación

Serie II y III	Serie III
Tipos de comunidades vegetales clasificadas bajo el mismo concepto	Tipos de comunidades vegetales que se basan en afinidades ecológicas florísticas y fisionómicas
Clasificación de selvas y bosques bajo criterios florísticos, de altura y caducidad del follaje	Separación de bosques y selvas además de los antiguos criterios, en base en su altura y cobertura arbórea
Falta de consistencia en los criterios que definen al matorral subtropical y a la selva baja caducifolia	De acuerdo a la afinidad florística y el componente climático, se adecuó del concepto de matorral subtropical.
El pastizal cultivado se incluye en la entidad pastizal y el bosque cultivado en la entidad bosque	Se le asigna una entidad específica a los pastizales cultivados y bosques cultivados, incluyéndose en agricultura
Criterios generalizados para la clasificación de los mezquitales	Se efectúa una reclasificación de los mezquitales de acuerdo a criterios climáticos

Fuente: INEGI, 2009.

El siguiente mapa (Fig. 3) fue elaborado en base a esta cartografía y muestra los tipos de vegetación y su distribución en el territorio mexicano.

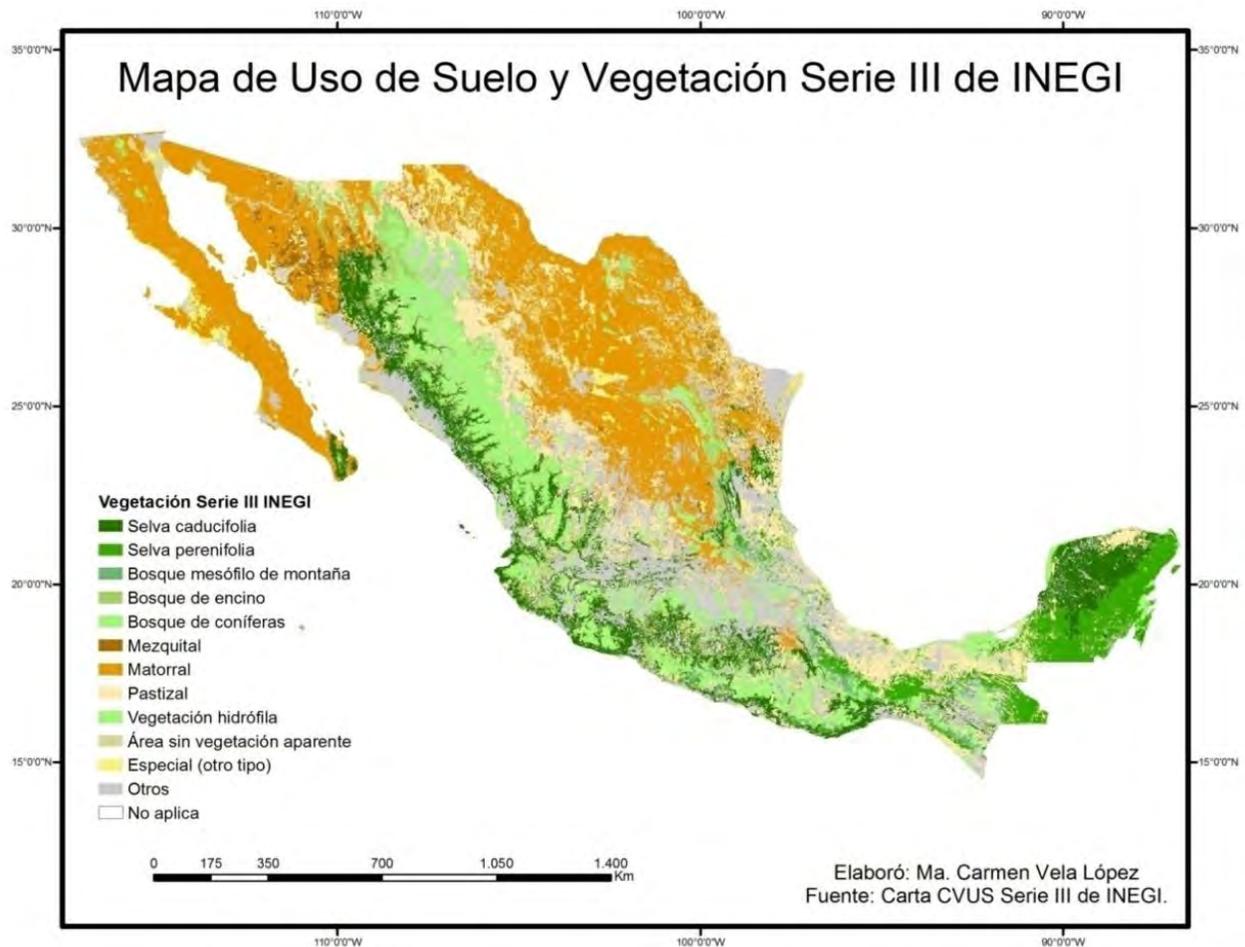


Fig. 3. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie III de INEGI.

La serie IV INEGI está realizada a una escala de 1:250 000 mediante la interpretación manual con medios digitales de imágenes multispectrales SPOT del año 2007, las cuales fueron ortorrectificadas. Dicho material consta de 148 conjuntos de datos digitales⁸ y un continuo nacional en formato *shapefile* y cuyo datum de referencia es ITRF92. El siguiente mapa (Fig. 4) fue elaborado en base a dicha cartografía.

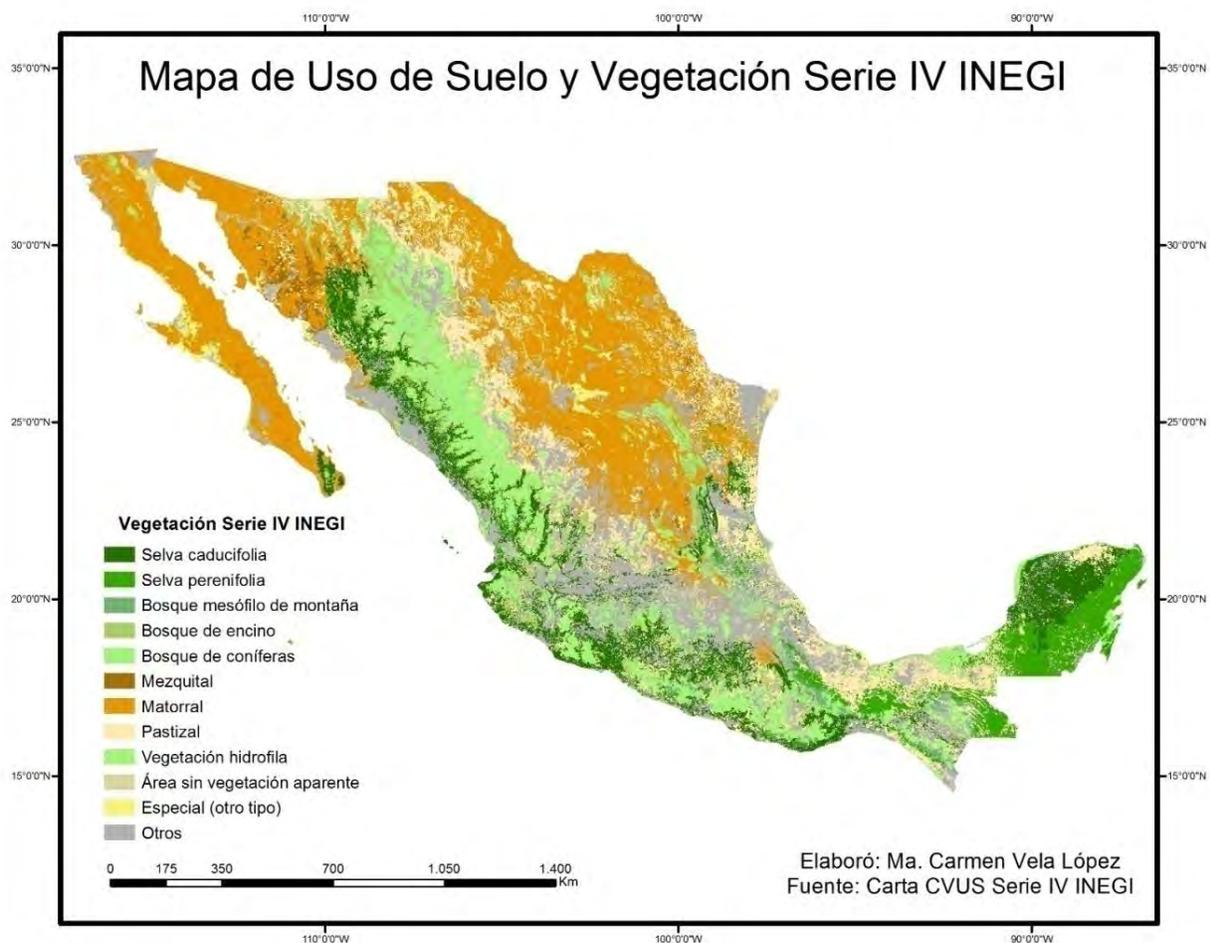


Fig. 4 Mapa de Uso de Suelo y Vegetación serie IV de INEGI

⁸ INEGI establece el concepto *conjunto de datos* en 1999, al cual define como: la información que corresponde a la extensión equivalente a una hoja impresa en las escalas 1:50 000, 1:250 000, 1:1000 000 y 1:4000 000.

Por último, la serie V INEGI fue realizada también a una escala de 1:250 000 mediante la interpretación de imágenes LANDSAT TM5 multiespectrales del año 2011.

El mapa presentado a continuación (Fig. 5) se elaboró en base a la información proveniente de dicha serie.

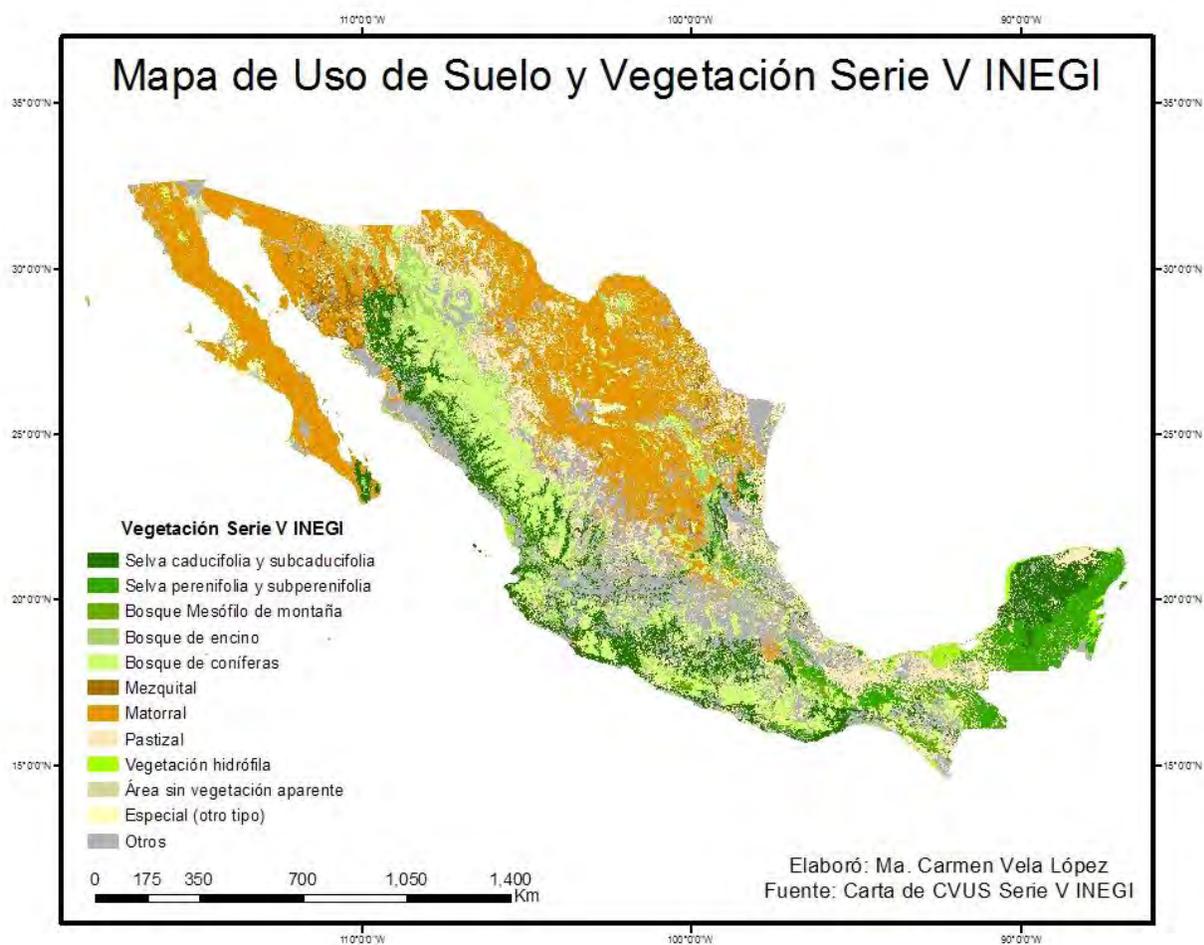


Fig 5. Mapa de Uso de suelo y Vegetación serie V de INEGI.

Es importante mencionar que posteriormente, para las tres series cartográficas en cuestión, como parte de la validación de los datos y una vez realizada la interpretación preliminar, se procede a la planeación de la verificación, para la cual se establecen los puntos a revisar en campo, los cuales pueden ser de tres tipos:

- Verificación: sitios con el objetivo de documentar cambio en la cobertura vegetal.
- Observación: sitios observados para confirmar una situación detectada en análisis preliminar.
- Monitoreo: sitios que corresponden a Áreas Naturales Protegidas, zonas de protección ecológica y áreas de vegetación remanente que ameritan una visita en cada actualización de la información con el objetivo de dar seguimiento a su comportamiento.

Para todas las series de cartografía de cobertura vegetal y uso de suelo de INEGI el proceso metodológico es similar, tomando en cuenta el uso de los nuevos insumos digitales.

La cartografía de uso de suelo y vegetación contiene basta información tanto del tipo de vegetación como del uso de la misma. Debido a que se trata de una escala a nivel nacional, y en la búsqueda por simplificar y ordenar tal información, dicha cartografía correspondiente a las series III, IV y V de INEGI se divide en tres grandes grupos, a continuación mencionados:

- Información ecológica florística y fisonómica: este grupo hace referencia a las comunidades vegetales agrupadas por afinidades fisonómicas. Los diferentes ecosistemas vegetales son agrupados de acuerdo al sistema de clasificación de INEGI, el cual está basado en los trabajos de Faustino Miranda y E. Hernández (1963) y Jerzy Rzedowski (1978).
- Información agrícola, pecuaria y forestal: conformado por zonas de actividades agropecuarias y zonas de plantaciones dedicadas a la explotación comercial, es

decir sistemas majados por el hombre. En este grupo se incluyen los siguientes conceptos:

- Agrícola: áreas de producción de cultivos para su utilización por el ser humano.
 - Pecuario: áreas dedicadas a la explotación ganadera de forma intensiva.
 - Forestal: se refiere a la utilización de especies forestales cultivadas o bien manejadas para la obtención de diferentes productos.
- Información complementaria: este grupo incluye elementos que no forman parte de la cobertura vegetal ni de las áreas manejadas pero que incide en su distribución nacional, se consideran las siguientes:

- Cuerpos de agua
- Área desprovista de vegetación
- Asentamientos humanos
- Zonas urbanas
- País extranjero
- Nomadismo agrícola

2.3 Mapas de deforestación del producto Global Forest Cover Change

El patrón de referencia para la información de recursos forestales a escala mundial era el Forest Resource Assessment (FRA) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (UNFAO por sus siglas en inglés), inicialmente producido a intervalos decenales, y que actualmente se realiza cada cinco años⁹. La evaluación se basa en dos fuentes de datos principales: los Informes Nacionales preparados por los Corresponsales Nacionales y estudios de percepción remota que se llevan a cabo por la FAO.

Sin embargo, existen varias limitaciones en los datos reportados por el FRA, mismas que disminuyen su utilidad para las evaluaciones de cambio global. Algunas de dichas limitaciones son la inconsistencia de métodos entre países y la

⁹ Datos publicados por el FRA – FAO en: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/past-assessments/es/>

definición empleada de *bosque*, la cual se basa en el uso de suelo, en lugar de la cobertura de suelo, dejando lugar a dudas sobre la existencia de una cobertura arbórea (Hansen *et al.*, 2013).

Por lo anterior, y debido a la impostergable necesidad de describir y clasificar la cobertura terrestre con alta precisión así como contar con un trabajo homogéneo en cuanto a definiciones y metodología se refiere, y en la búsqueda por la estandarización y compatibilización entre juegos de datos para facilitar la posibilidad de mapear, evaluar y monitorear grandes áreas de forma consistente, se publica en el año 2013 el Global Forest Cover Change Dataset (GFCC) de Hansen *et al.*, encargado de reportar el estado de los bosques a nivel global.

Dicho trabajo incluye la cobertura del territorio mundial, exceptuando la Antártida y algunas islas del Ártico, por un total de 128 MKm², o el equivalente a 143,000 millones de píxeles 30 metros de resolución espacial del sensor Landsat (Hansen *et al.*, 2013), y en el cual se revela el porcentaje de cobertura, ganancia y pérdida forestal¹⁰ a escala global para el periodo comprendido entre 2000 y 2012.

Entre las principales mejoras que plantea Global Forest Cover Change al conocimiento del estado de la cobertura forestal mundial, destacan las siguientes (Hansen *et al.*, 2013):

- Ser espacialmente explícito
- Cuantificación de la pérdida y ganancia bruta
- Suministra información de pérdidas anuales y tendencias en la cuantificación de la pérdida de bosques
- Se deriva a través de un enfoque consistente internamente, lo que permite eximir de la ambigüedad de diferentes definiciones, métodos y entradas de datos.

¹⁰ Conjunto de datos disponibles para descarga en:
http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.2.html

Como en todo trabajo que estudie el proceso de deforestación, se debe manifestar explícitamente las definiciones utilizadas para aplicar los criterios de pérdida forestal y, si el estudio lo contempla, también de reforestación. Conforme a ello, el autor hace las siguientes definiciones en relación a la dinámica del cambio de uso de suelo:

La pérdida forestal se define como la perturbación, sustitución o eliminación completa del dosel de la cubierta arbórea en la escala de píxeles Landsat.

La ganancia forestal, inversamente a la pérdida, se define como la creación de dosel arbóreo a partir de un estado no forestal.

El análisis global de datos Landsat se realizó mediante la implementación de Google Earth Engine¹¹, el cual contiene una serie casi completa de imágenes de la constelación de satélites Landsat 4, 5, 7 y 8, descargadas del portal digital de la USGS¹². Para dicho estudio se llevó a cabo el análisis de 654,178 imágenes Landsat 7 ETM, obtenidas durante la temporada de crecimiento fenológico, ya que dichos datos son más apropiados para el mapeo de cobertura terrestre, en comparación con imágenes obtenidas durante periodos estacionales latentes, debido a las posibles confusiones que pueden existir entre las clases al momento de realizar interpretación visual.

Los pasos de pre-procesamiento automatizado para las imágenes se enlistan a continuación:

- Remuestreo de la imagen
- Conversión de valores digitales crudos a valores de reflectancia.
- Detección de nubes, sombras, agua y la evaluación de la calidad de la imagen obtenida.

¹¹ Plataforma *en la nube* para el análisis de datos de observación de la Tierra que combina un catálogo público de datos con un centro de cómputo a gran escala optimizado para el procesamiento paralelo de datos geoespaciales.

¹² El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), es una organización científica que proporciona información imparcial sobre la salud de nuestros ecosistemas y medio ambiente.

- Normalización de la imagen.

Cabe aclarar que todas las etapas de pre-procesamiento de imágenes se ensayaron a escalas nacionales a nivel global.

Es importante mencionar que aún hoy en día no existe información espacial y temporalmente detallada sobre el cambio forestal a escala global, y que los esfuerzos anteriores basaron sus muestreos y emplearon datos de una mayor resolución espacial.

Por lo mencionado anteriormente, se resalta la relevancia del estudio llevado a cabo en la Universidad de Maryland, EE.UU., y por ende, la relevancia por la cual sus datos son tomados como insumo de evaluación en el presente trabajo, con el fin de proporcionar datos validados estadísticamente para la República Mexicana. La siguiente figura (Fig. 6) muestra el mapa de cobertura forestal para el año 2000, realizado con los datos reportados para el territorio mexicano, por Hansen *et al.*, 2013.

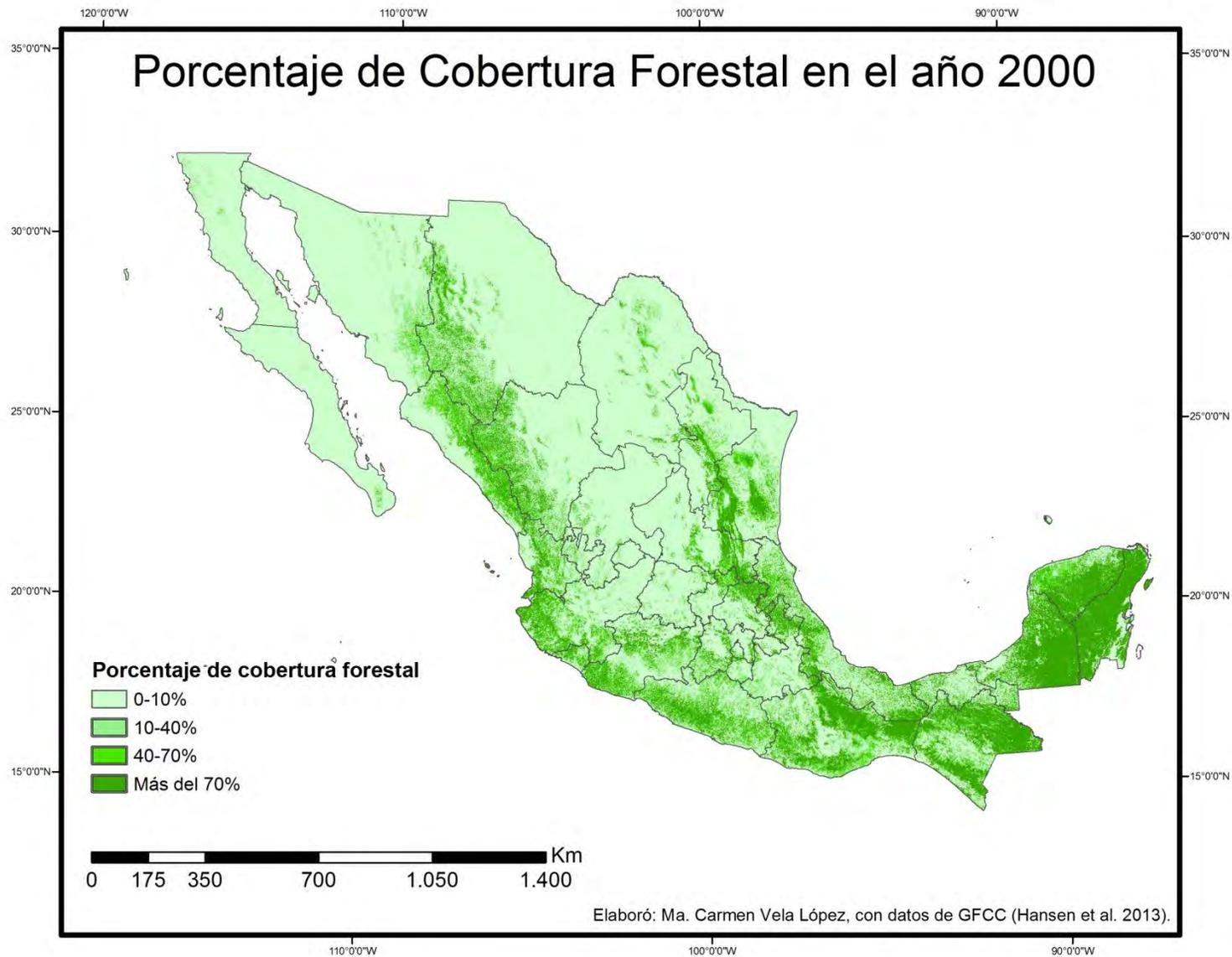


Fig. 6 Mapa de porcentaje de cobertura forestal para el año 2000 en el territorio mexicano.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE MAPAS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO SERIES III, IV y V DE INEGI Y PARA EL MAPA GLOBAL FOREST COVER CHANGE

Como mencionan Mas *et al.* (2009), al igual que en la mayor parte del mundo, aún no existe en México la cultura de someter las bases de datos cartográficas a una evaluación rigurosa de su fiabilidad, lo cual abre la puerta a cuestionamientos y polémicas acerca de la calidad de los datos derivados de las mismas (superficies y tasas de cambio).

En este capítulo se llevará a cabo el cálculo de la confiabilidad cartográfica para mapas de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, en la búsqueda por enfatizar la importancia de dichos mapas relacionados a procesos de cambio de uso de suelo, refiriéndose principalmente al de deforestación.

3.1 Descripción metodológica

La metodología a desarrollar es la planteada por Stehman y Czaplewski (1998), quienes proponen tres etapas para el cálculo de la confiabilidad de mapas temáticos; mismos que se han convertido en un procedimiento a seguir para la evaluación de cartografía (ver figura 7). Las etapas son descritas a continuación.

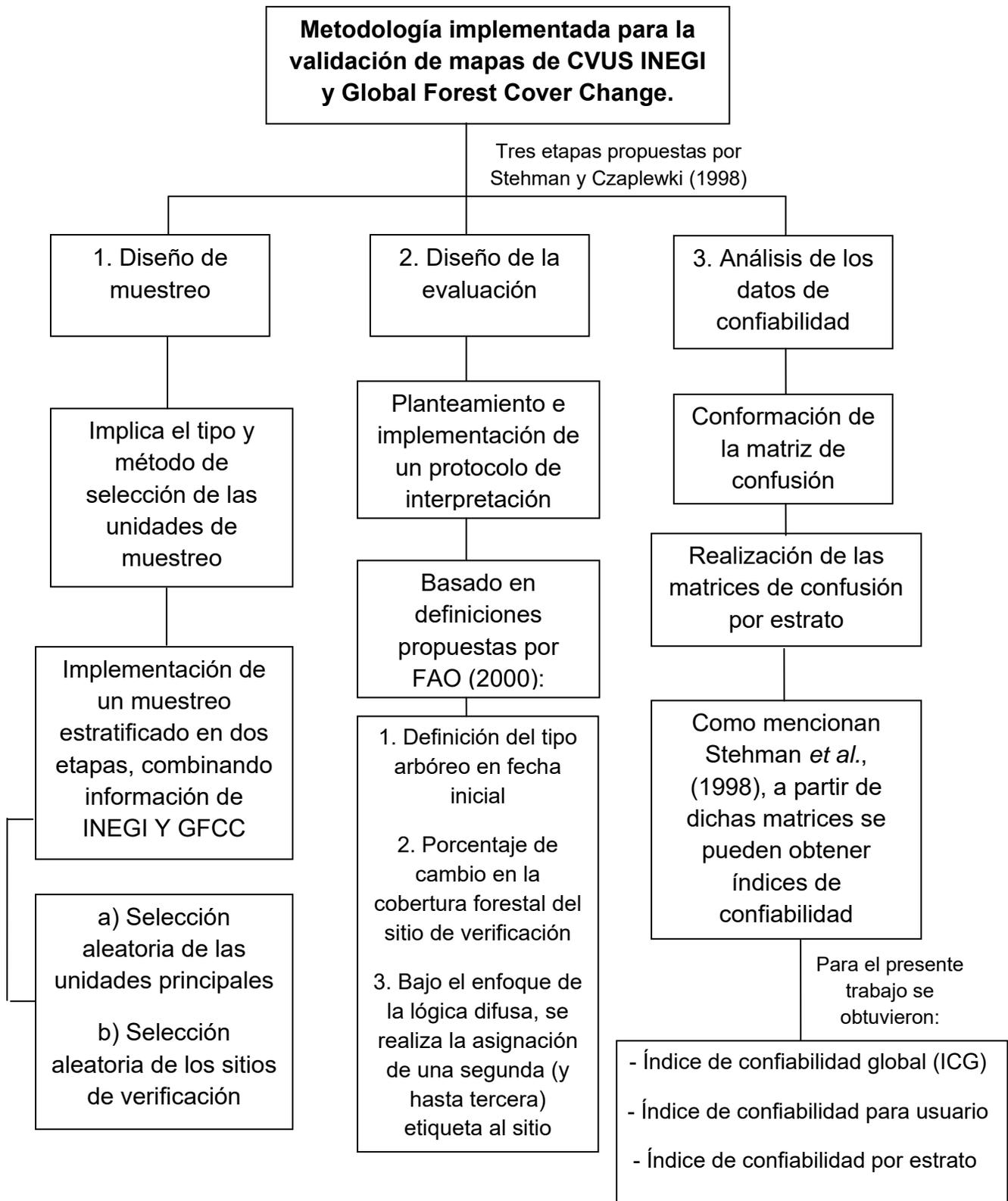


Fig. 7 Desarrollo metodológico para la evaluación de confiabilidad de cartografía de CVUS INEGI y GFCC.

1. Diseño de muestreo. El diseño y desarrollo de la evaluación supone la columna vertebral del proceso de verificación. Incluye la determinación del tipo de unidades de muestreo¹³, del método de selección de las mismas, así como del número de unidades de muestreo necesarias. Dicho diseño hace referencia al método a seguir bajo el cual las unidades son seleccionadas; esta unidad permite relacionar la localización de la información del mapa y del terreno. Sirve para seleccionar una pequeña muestra del área cartografiada, de tal forma que sea representativa de la totalidad del mapa. Su elección depende en mucho de los objetivos de la evaluación, del proceso de mapeo, de la estructura del paisaje y de las categorías que más le interesan al usuario (Mas *et al.*, 2003).

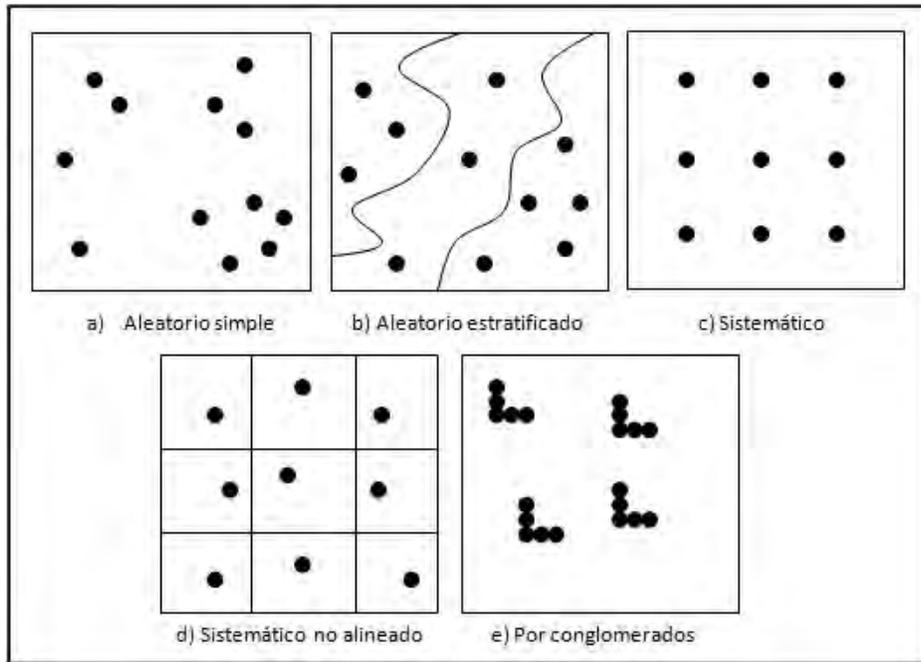
Existen diferentes métodos de muestreo, y es importante seleccionar el que más se adecúe al objetivo del mapa y tomando en cuenta las particularidades del territorio a muestrear. A continuación se mencionan los tipos de muestreo (Chuvienco, 1995):

- Aleatorio simple: todo punto del territorio se selecciona con la misma probabilidad de inclusión.
- Aleatorio estratificado: se divide a la población con base en una variable auxiliar (altitud, región ecológica, entre otros)
- Sistemático: la muestra se distribuye en intervalos regulares a partir de un punto seleccionado aleatoriamente.
- Sistemático no alineado: la muestra se distribuye de manera regular, pero con cierto grado de libertad.
- Por conglomerados: se selecciona un sitio aleatorio y se toman varias muestras vecinas.
- Por conglomerados en dos etapas: es una extensión del tipo de muestreo anterior. La primera etapa se refiere a la selección aleatoria de

¹³ La unidad de muestreo puede ser un punto, un pixel, un grupo de pixeles, un polígono del mapa o una unidad de superficie con formas predeterminadas, por ejemplo un cuadro o un círculo de una hectárea.

conglomerados; en la segunda etapa se realiza una muestra aleatoria de cada uno de los elementos de cada conglomerado.

La siguiente figura (Fig. 8) presenta los métodos de muestreo espacial.



Fuente: Chuvieco, 1995.

Fig. 8 Ejemplo de los métodos de muestreo espacial.

2. Diseño de evaluación. Este paso consiste en la caracterización de un sitio de verificación, para después asociarlo a una o varias clases del mapa a evaluar. Esta evaluación conlleva, usualmente a asociar el sitio de verificación a una sola categoría de la leyenda del mapa. Sin embargo, como mencionan Hord y Brooner (1976), nunca es conveniente limitarse a una clase única para caracterizar el sitio de verificación, porque este ejercicio puede ser muy subjetivo, ya que dicho sitio puede encontrarse en una zona de transición entre dos tipos de vegetación, o en una zona fragmentada donde se pueden encontrar varias clases, por ello se

recomienda asignar una segunda etiqueta, dado que de lo contrario se podría subestimar la confiabilidad del mapa.

El asignar dos etiquetas a un mismo sitio de verificación es lo que se conoce como "enfoque difuso" (fuzzy). En este enfoque, la inclusión de un elemento a una determinada clase se expresa a través de un grado de pertenencia, que a su vez se representa como una variable que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1, para así expresar la pertenencia parcial a diferentes conjuntos.

3. El análisis de los datos de confiabilidad. A partir de la realización del muestreo puede construirse una lista de puntos, para los cuales se tiene su cobertura real y la estimación deducida. Con estos datos se conforma una matriz, generalmente denominada de confusión, dado que recoge los conflictos que se presentan entre categorías, es decir permite confrontar la información de los sitios de verificación con aquella de la base cartográfica que se pretende evaluar.

En dicha matriz, las filas representan las clases de referencia, mientras que las columnas representan las clases del mapa. De esta manera, la diagonal de la matriz constituirá las coincidencias entre el mapa y los datos de referencia (ejemplo, ver Fig. 9). En cambio, los elementos ubicados fuera de la diagonal principal, indican los errores de asignación (marginales), ya sea porque perteneciendo a una misma clase han sido asignados a categorías distintas (error de omisión), o porque han sido clasificados en una categoría, cuando en realidad pertenecen a otra (error de comisión). La proporción de los puntos correctamente asignados expresa la confiabilidad del mapa.

El interés de las tablas de confusión radica en el hecho de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías. De este modo, no solo conocemos el total de puntos clasificados correctamente, sino también la confiabilidad para cada una de las clases y las principales confusiones entre ellas.

Sitios \ Mapa	A	B	C
A	8	1	0
B	1	7	0
C	1	2	10
Suma	10	10	10

Fuente: Mas *et al.*, 2011.

Fig. 9 Ejemplo de una matriz de confusión con números

3.2 Procesamiento de los datos INEGI.

3.2.1 Elaboración de los mapas de ganancia y pérdida forestal

Debido a los cambios de cobertura forestal y su contribución al cambio climático, mencionado en capítulos anteriores, resulta necesario mantener actualizada la cartografía referente a CVUS, ya que a partir de ésta se infieren tasas de cambio forestal, las cuales es importante mantener monitoreadas. Los mapas de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, como mencionan Strahler *et al.* (2006), son resultado del cruce de información de dos mapas de la misma zona pero con temporalidad diferente.

Para el presente trabajo, los mapas de CVUS de INEGI (serie III, IV y V) fueron transformadas de formato vectorial a formato raster, agrupando las categorías de cobertura del suelo para generar un mapa binario en donde las clases forestales (incluyendo matorrales¹⁴), se convierten a un valor único de uno (bosque) y las clases no forestales se convierten a un valor único de cero (no bosque)¹⁵. Se utilizó un tamaño de celda de 100 x 100 m² utilizando la categoría dominante que cubre la superficie correspondiente al pixel.

¹⁴Las clases originales de INEGI fueron reclasificadas con base en el sistema clasificatorio del IPCC 2003, en el cual se consideran como tierras forestales a los matorrales.

¹⁵Ver cuadro 6, pág. 59

Cuadro 6. Reagrupación de las clases de CVUS serie IV de INGI para la elaboración del mapa binario

Clases Propuestas por INEGI serie IV	Clases de referencia
<p>Bosque de ayarin, bosque de cedro, bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de mezquite, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de táscate, bosque inducido, bosque mesófilo de montaña, selva alta perennifolia, selva alta subperennifolia, selva baja, caducifolia, selva baja espinosa caducifolia, selva baja espinosa subperennifolia, selva baja perennifolia, selva baja sebcaducifolia, selva de galería, selva mediana caducifolia, selva mediana caducifolia, selva mediana perennifolia, selva mediana subcaducifolia, mezquital desértico, mezquital tropical.</p>	<p>Bosque</p>
<p>Matorral crasicaule, matorral de coníferas, matorral desértico mecrófilo, matorral desértico rosetófilo, matorral espinoso tamaulipeco, matorral rosetófilo costero, matorral sarcocrasicaule, matorral sarcocaule, matorral submontano, matorral subtropical.</p>	<p>Matorral</p>
<p>Sin vegetación aparente, tular, vegetación de desiertos arenosos, vegetación de dunas costeras, vegetación de galería, vegetación de petén, vegetación gipsófila, vegetación halófila, vegetación halófila hidrófila, vegetación halófila xerófila, sabanoide, sabana, pradera de alta montaña, popal, pastizal natural, pastizal inducido, pastizal halófilo, pastizal gipsófilo, palmar natural, palmar inducido, no aplicable, chaparral, manglar</p>	<p>No bosque</p>

Fuente: elaboración propia con información del mapa de CVUS serie V de INEGI.

Los tipos de vegetación que quedaron fuera de las clases Bosque y Matorral (es decir, tipos de vegetación que constituyen la categoría No bosque), fueron ubicados en ella debido a la implementación de la definición propuesta por la FAO (2000), bajo la cual se define *bosque* de la siguiente manera:

Tierra que se extiende por más de 0.5 hectáreas dotada de árboles de una altura superior a 5 metros, una cubierta de dosel superior al 10 por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ. No incluye la tierra sometida a un uso predominantemente agrícola o urbano.

3.3 Procesamiento de los datos Global Forest Cover Change.

3.3.1 Elaboración de los mapas de pérdida forestal.

Adicionalmente y para darle tratamiento a los datos del GFCC, en base en el mapa de porcentaje de cobertura forestal de Hansen *et al.* (2013), (*Tree cover*) se seleccionaron los píxeles con un porcentaje mayor a 10% de cobertura forestal para reclasificarlos como bosque¹⁶, eliminando los píxeles que reportan pérdida para el año 2001.

Utilizando la capa¹⁷ de pérdida (*Loss*) y la capa del año de la pérdida (*Loss year*), se seleccionaron las áreas de pérdida de los años 2008 a 2011 (equivalentes al periodo transcurrido entre las series IV y V del INEGI), para generar un mapa binario con valor uno para pérdida, y cero para las demás celdas.

¹⁶ Se emplean las categorías de FAO (<http://www.fao.org/docrep/007/ae217e/ae217e00.HTM>), las cuales están basadas en la cubierta forestal del sitio.

¹⁷ El término *capa* hace referencia al modo en que se organiza la información geográfica en temas de datos individuales, mismos que describen la distribución de un fenómeno, mediante la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

3.4 Diseño de muestreo

Al igual que en otras aplicaciones, en este caso el muestro espacial sirve para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de tal forma que sea representativa del conjunto. Debido a la conformación y ubicación del territorio mexicano, la cartografía a evaluar presenta características que deben ser tomadas en cuenta, particularmente la clase de interés, es decir, las áreas donde se observan cambios en la cobertura vegetal.

Dichas clases generalmente cubren un área pequeña en comparación con las áreas de permanencia forestal, por lo cual se implementó un diseño de muestreo estratificado en dos etapas con el fin de concentrar los esfuerzos del muestreo en las áreas donde se produce dicho cambio.

En el presente trabajo se utilizó un diseño de muestreo que combina la información de INEGI y la del Global Forest Cover Change para estratificar el muestreo, el cual se realiza en las siguientes dos etapas:

1. La selección aleatoria de las unidades principales, correspondientes a imágenes Rapid Eye¹⁸.
2. La selección aleatoria de sitios de verificación dentro de las unidades principales.

Para llevar a cabo una evaluación efectiva a la totalidad del territorio nacional, y en la búsqueda por contrarrestar la diversidad taxonómica del país, se realizó una simplificación de la leyenda de INEGI para las series III, IV y V de CVUS, en clases de referencia.

¹⁸ Son imágenes obtenidas de la constelación de cinco satélites idénticos, propiedad de la empresa alemana Rapid Eye AG. Dichas imágenes cuentan con una resolución espacial de 5 metros y una resolución temporal de 24 horas.

3.4.1 Determinación del número de unidades principales.

Como se mencionó, dichas unidades corresponden a áreas cubiertas por imágenes Rapid Eye (25 km x 25 km). Para la determinación del número de unidades principales que permite al muestreo ser una representación satisfactoria del conjunto del territorio nacional, se emplea la ecuación 1:

$$B = z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (1)$$

En donde B es el intervalo de confianza; p la fiabilidad y n el número de unidades de muestreo.

Se mide para un número n de unidades principales la proporción de las diferentes categorías de uso del suelo y vegetación del mapa de INEGI serie IV en el muestreo. Esta operación se realizó asignando un valor de n variando entre 5 y 250 (con incrementos de 5). Para cada valor de n se compara la proporción en el muestreo con la proporción para todo el territorio nacional. Dicha comparación es realizada a través del cálculo de la suma del valor absoluto de las diferencias de proporciones para cada categoría, que representa por lo tanto, un error de representatividad de la muestra. Este error tiende a disminuir cuando n aumenta.

Tomando en cuenta un número de unidades principales que cubren todo el territorio nacional, es decir $n = N$, el error es nulo ya que toda la población (el territorio nacional) está incluido en la muestra, y por lo tanto la evaluación es más precisa (Mas *et al.*, 2011). En el presente trabajo, se buscó el valor de n más pequeño, para obtener un error no significativo.

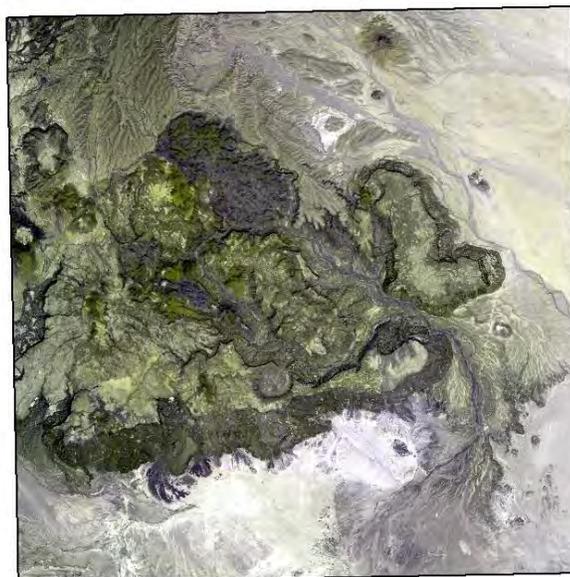
En base a lo anterior, se obtuvo que a partir de 40 unidades principales el muestreo está lo suficientemente bien repartido en las diferentes regiones del territorio nacional, para brindar una representación aceptable de los diferentes tipos de uso del suelo y de vegetación. De la misma forma, el tamaño de unidades mínimo necesario para tener una representatividad espacial aceptable de los

diferentes tipos de cambio de cubierta y uso del suelo se sitúa entre 40 y 50 unidades. Se realizó por lo tanto, la selección de 50 imágenes Rapid Eye como unidades principales, a través de un muestreo aleatorio simple. En el cuadro 7 se presenta la clave de las cincuenta imágenes Rapid Eye que fueron seleccionadas de manera simple aleatoria, mientras que la Fig. 10 es un ejemplo de este tipo de imágenes.

Cuadro 7. Lista de imágenes Rapid Eye seleccionadas.

Escenas Rapid Eye				
1153825	1347820	1352107	1447610	1450515
1153925	1348214	1352118	1447711	1450805
1251504	1350026	1352326	1447719	1451210
1251724	1350122	1352704	1448614	1452106
1252711	1350216	1352804	1449003	1546508
1252821	1350223	1352902	1449008	1546608
1252822	1350316	1446326	1450206	1546922
1252919	1350408	1446815	1450412	1547926
1252926	1351624	1446915	1450510	1648503
1253015	1351806	1447315	1450514	1648508

Fig. 10 Imagen Rapid Eye



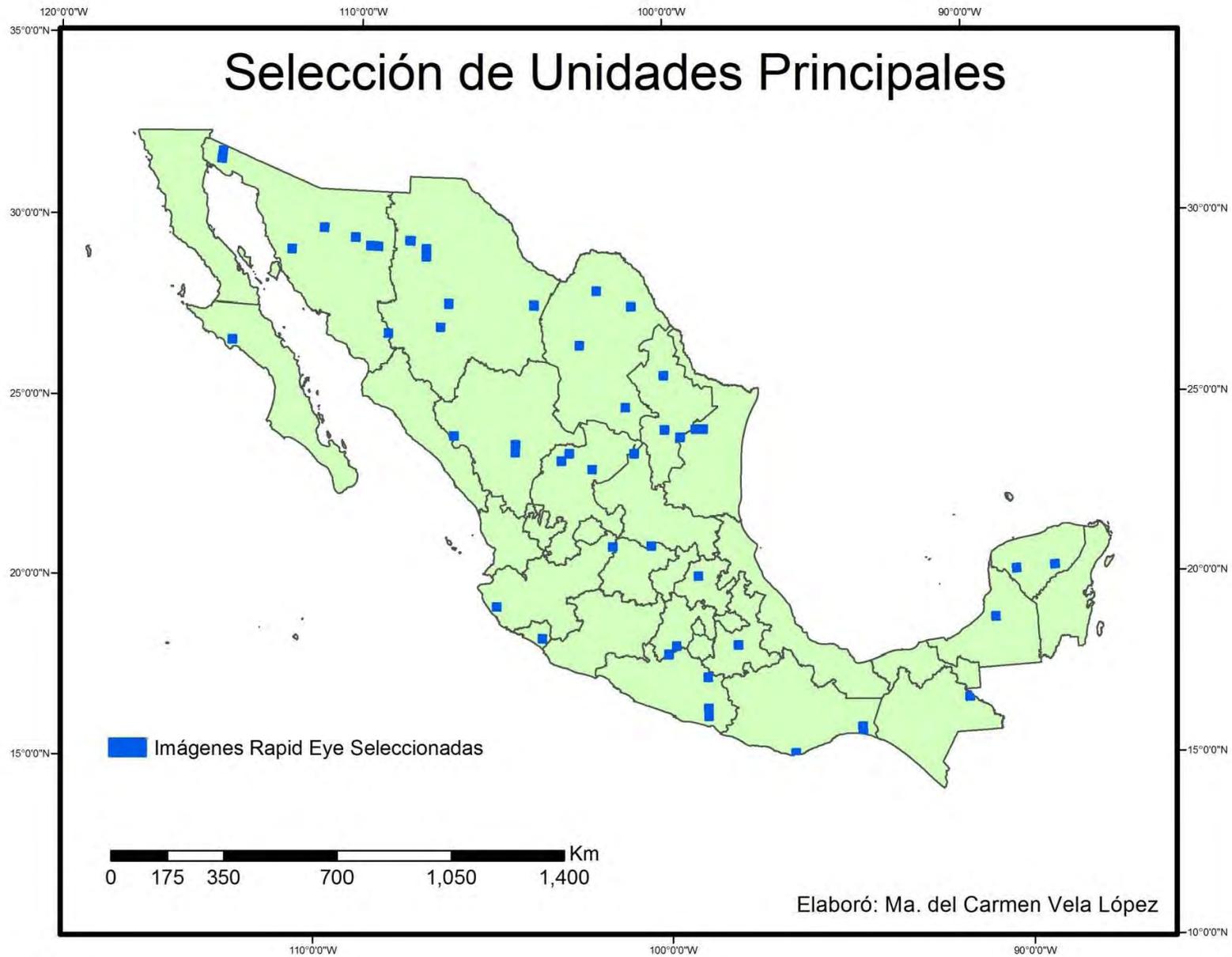


Fig. 11 Mapa de la ubicación de imágenes Rapid Eye seleccionadas como unidades principales

3.4.2 Estratificación del muestreo

Para esta etapa, se realizó un mapa combinando la categoría simplificada de INEGI¹⁹, los cambios según INEGI y los cambios de acuerdo con Global Forest Cover Change. Los sitios son seleccionados dentro de las unidades principales con base en un muestreo estratificado basado en la información arrojada por un mapa denominado “de cambio”, tomando en cuenta la siguiente información:

1. Para INEGI: Bosque sin cambio, matorral sin cambio, deforestación de bosque, deforestación de matorral, reforestación, otros.
2. Para Global Forest Cover Change: Bosque sin cambio, deforestación, no bosque no cambio.

Resultado la combinación de las clases mencionadas anteriormente se obtiene las siguientes clases de cambio para ambos insumos:

1. Para INEGI: Deforestación, reforestación, bosque sin cambio
2. Para GFCC: Deforestación, bosque sin cambio, no forestal sin cambio.

La combinación de ambas fuentes de información conduce a un mapa con 18 categorías combinadas. La estratificación se realizó con base en estas 18 categorías.

Posteriormente se asignaron 50 sitios aleatorios para cada estrato, a excepción de algunas categorías muy reducidas y de menor interés. Debido a que se conoce el área de cada estrato, es posible conocer la probabilidad de inclusión en el muestreo. La premisa de la estratificación basada en un mapa que combina los cambios de dos diferentes fuentes de información es que la estratificación nos ayuda a obtener sitios de verificación mejor ubicados, evitando así, eventuales errores de omisión. El cuadro siete muestra las áreas correspondientes a las diferentes combinaciones basados en datos de INEGI y del GFCC, lo que sirvió para estratificar el muestreo.

¹⁹ Ver cuadro 6, pág. 59

Cuadro 8. Características y área de los diferentes estratos²⁰

Código	INEGI inicial	Cambio INEGI	Cambio GFCC	Km²
100	No bosque	Sin cambio	No bosque	477,191
101	No bosque	Sin cambio	Bosque sin cambio	208,903
102	No bosque	Sin Cambio	Deforestación	20,765
120	No bosque	Reforestación	No bosque	3,912
121	No bosque	Reforestación	Bosque sin cambio	5,181
122	No bosque	Reforestación	Deforestación	620
200	Bosque	Sin cambio	No bosque	103,613
201	Bosque	Sin cambio	Bosque sin cambio	537,924
202	Bosque	Sin cambio	Deforestación	26,495
210	Bosque	Deforestación	No bosque	2,344
211	Bosque	Deforestación	Bosque sin cambio	6,061
212	Bosque	Deforestación	Deforestación	1,887
300	Matorral	Sin cambio	No bosque	465,434
301	Matorral	Sin cambio	Bosque sin cambio	51,017
302	Matorral	Sin cambio	Deforestación	1,811
310	Matorral	Deforestación	No bosque	6,206
311	Matorral	Deforestación	Bosque sin cambio	386
312	Matorral	Deforestación	Deforestación	194

²⁰Algunas combinaciones entre los dos mapas tienen un área muy reducida, (menos del 0.1% del territorio) son denominadas *clases escasas*.

3.4.3 Selección de los sitios de verificación

De acuerdo a Stehman y Wickham (2011), el tamaño del sitio de verificación tendría que ser equivalente a la unidad mínima cartografiable (UMC)²¹ de los insumos bajo evaluación. En base a esta recomendación, y debido a que las dos bases de datos evaluadas poseen escala y/o resolución muy diferentes, para evaluar cada sitio de verificación se realizaron dos áreas de interpretación concéntrica, la primera de ellas de 10,000 m² (círculo de 56.42 m de radio) y la segunda de 250,000 m² (círculo de 282.1 m de radio), para así adaptar el área de interpretación visual a las escalas de los datos provenientes de ambos insumos (GFCC e INEGI).



Fig. 12 Visualización de ambas áreas de interpretación concéntricas al sitio de verificación (ID del sitio 592), sobre una fusión pancromática/multiespectral de imagen SPOT.

²¹ La unidad mínima cartografiable (UMC) es la unidad más pequeña de superficie que puede ser delimitada en un mapa.

En este, como en otros muestreos el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad o de confianza que se busque otorgar a la estimación. Como se trata de medir una variable binaria (acierto/error), normalmente se emplea la fórmula 2 (tomada de Chuvieco, 1995):

$$n = \frac{z^2 p q}{E^2} \quad (2)$$

Donde z es la abscisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad, p indica el porcentaje de aciertos estimados, q el de errores ($q = 1 - p$) y E el nivel permitido de error. Según Chuvieco (1995) el valor de p y q puede ser estimado a partir de datos auxiliares, o simplemente igualarse a 0.5.

Resultado de la aplicación de lo descrito anteriormente, se obtiene la selección de 50 sitios de verificación para cada estrato, exceptuando algunos estratos cuya área era muy limitada²²:

- Código 122: 30 sitios - Código 210: 20 sitios - Código 212: 20 sitios
- Código 302: 30 sitios - Código 311: 10 sitios - Código 312: 10 sitios

El total suma 780 sitios de verificación, seleccionados mediante un muestreo aleatorio estratificado.

²² Ver cuadro 8, página 66

3.5 Diseño de la evaluación

3.5.1 Protocolo de interpretación

El protocolo de interpretación se llevó a cabo mediante la interpretación visual de dos imágenes, la primera correspondiente a la temporada uno (2007) y la segunda a la temporada dos (2012)²³, logrando inferir los cambios en el sitio de verificación tomando en cuenta las dos áreas de entorno diferente.

Las imágenes implementadas son:

- SPOT (fusión pancromática/multiespectral) para el año 2007.
- Rapid Eye (fusión pancromática/multiespectral) para el año 2012.

Es importante mencionar que la evaluación de la cobertura forestal del sitio se realiza en las dos fechas para inferir el cambio, empleando las categorías de la FAO²⁴, las cuales están basadas en la cobertura vegetal del sitio.

Referente a esto, FAO (2000) hace distinción entre lo que define como bosque cerrado y bosque abierto, haciendo las siguientes definiciones:

Se considera bosque cerrado a las formaciones donde los árboles de distintas alturas y el sotobosque abarcan más del 40 por ciento del terreno y no cuentan con una capa continua y densa de pasto.

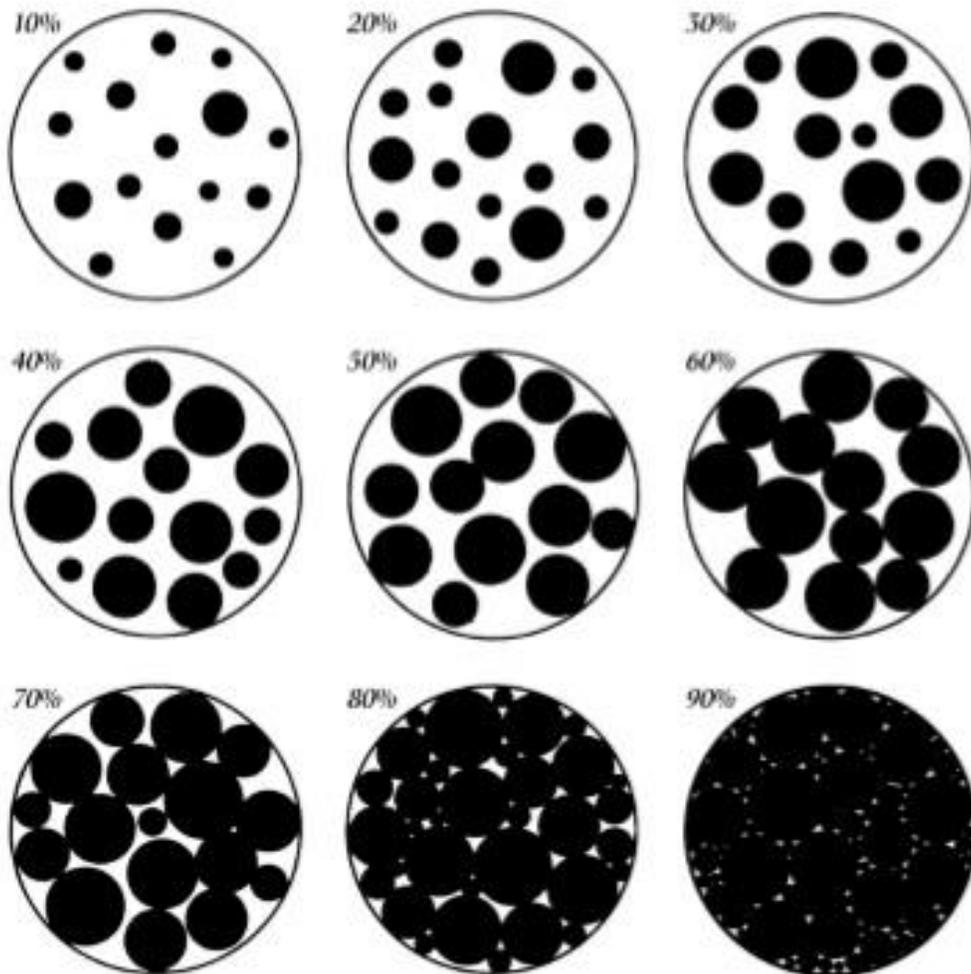
El bosque abierto está conformado por formaciones con una distribución discontinua de árboles, pero con una cobertura de copa de al menos 10 por ciento y menos del 40 por ciento. Generalmente existe una cubierta continua de pasto.

²³ En algunos sitios de verificación, donde factores atmosféricos (nubosidad) interfirieron en la captura eficiente de la imagen, se implementaron imágenes de la base Google Earth Pro.

²⁴ Las categorías pueden consultarse en: <http://www.fao.org/docrep/007/ae217e/ae217e00.HTM>

Seguendo el protocolo de interpretación y basado en las definiciones antes mencionadas se comienza por definir el tipo arbóreo en la fecha inicial del sitio de verificación y el porcentaje de cobertura del mismo, implementando la siguiente nomenclatura:

Tipo arbóreo fecha inicial	Porcentaje de cobertura
Bosque, Matorral, No bosque (F, M, NF)	0-10, 10-40, 40-70, +70



Fuente: Cornell Lab of Ornithology. Birds in forestedLandscapes.

Fig. 13 Porcentaje de cobertura del dosel

Posteriormente se define el porcentaje de cambio en la cobertura forestal del sitio de verificación, se le atribuye una clase de cambio y mediante una escala cualitativa, se le asigna una categoría de confianza a la interpretación visual, implementando la siguiente nomenclatura (Cuadro 9):

Cuadro 9. Nomenclatura para definir porcentaje de cambio en la cobertura forestal

Porcentaje de cambio de cobertura	Clase de cambio	Confianza de la interpretación
-80, -60, -50, -30, -20, 0 +20, +30, +50, +60, +80	No bosque no cambio, Bosque no cambio, Deforestación, Reforestación (NC-NF, NC-F, DEF, REF).	Muy alta, Alta, Regular, Baja (MA, A, R, B).

Según el cuadro anterior, se entiende que si el cambio en la cobertura forestal es negativo hubo pérdida forestal, es decir se infiere un patrón de deforestación; por lo contrario, si el cambio en la cobertura forestal es positivo hubo ganancia forestal, es decir ocurrió un patrón de reforestación en el sitio.

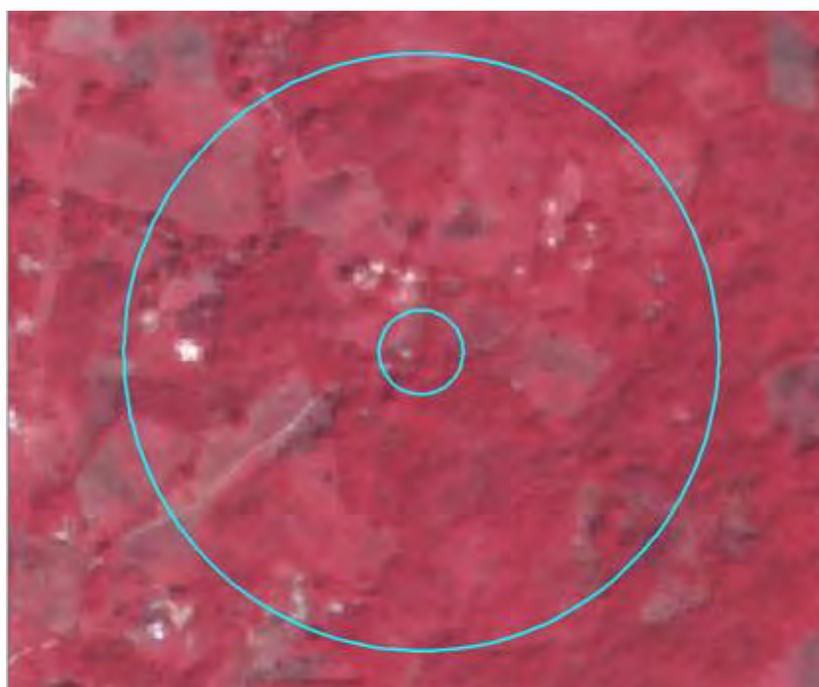
Por último y bajo el enfoque de lógica difusa, se le asigna al sitio una segunda, y en casos muy inciertos hasta una tercera etiqueta de clase de cambio al sitio, al igual que sus respectivas categorías de confianza en la interpretación visual. Dichas clases de cambio y categorías son las mismas mencionadas en el cuadro anterior.

Ejemplificando lo anterior se construyó la siguiente matriz de cambio (Cuadro 10) entre la primera observación (2007) en filas y la segunda (2012) en columnas.

Cuadro 10. Matriz de cambio entre la primera observación y la segunda.

	0-10	10-40	40-70	+70
0-10	NC-NF	REF	REF	REF
10-40	DEF	NC-F	NC-F	NC-F
40-70	DEF	NC-F	NC-F	NC-F
+70	DEF	NC-F	NC-F	NC-F

A continuación (Fig. 14) se presenta el ejemplo de uno de los sitios de verificación, con las clases y porcentajes de cambio asignados siguiendo el protocolo de interpretación.



tip_arb_in	porcob_in	por_camb	clas_camb	Conf_int	clas_camb2
F	40-70	-20	DEF	A	

tip_arb_in	clas_camb	Conf_int	clas_camb2	Conf_int2
F	NC-F	R	DEF	R

Fig. 14 Ejemplo de un sitio de verificación (ID del sitio 966) al cual se aplicó el protocolo de interpretación para ambas escalas.

Los datos arrojados durante el proceso de diseño de la evaluación son conformados en una matriz de confusión, en la cual se confronta la información de los mapas de GFC e INEGI con la de los sitios de verificación. Ordenada por filas y columnas, como toda matriz, en líneas encontraremos las clases de referencias y en las columnas las clases del mapa. La diagonal que se forma indicará los sitios donde existe acuerdo entre las clases de referencia y las clases del mapa, es decir los aciertos en la evaluación.

Stehman *et al.* (1998) mencionan que a partir de la matriz de confusión se pueden deducir índices de confiabilidad. Para el presente trabajo, los índices calculados fueron el índice de confiabilidad global (ICG), índice de confiabilidad para usuario y el índice de confiabilidad por estrato.

Los índices antes mencionados son calculados tanto para el productor del mapa como para el usuario del mismo.

Se realizaron matrices de confusión por estrato, es decir se obtuvieron 12 matrices (exceptuando las seis correspondientes a las clases escasas). Mas y Couturier (2011) han divulgado las fórmulas estadísticas necesarias para el cálculo de los índices:

La confiabilidad global \hat{O} es la proporción de área correctamente clasificada y se calcula sumando los elementos de la diagonal de la matriz ajustada (ecuación 3).

$$\hat{O} = \sum_{K=1}^q \hat{p}_{kk} \quad (3)$$

Donde q es el número de categorías y P_{kk} es el valor de la celda en la diagonal, es decir, donde la clase de los sitios de validación se cruza con su clase

de referencia y q el número de categorías. Chuvieco (1995) menciona que este valor puede ocultar importantes diferencias entre categorías y por ello, un análisis más riguroso debe aplicarse. Respondiendo a esto, se calcularon los índices de confiabilidad para cada estrato.

Existen dos posibles fuentes de error, el primero de ellos hace referencia a los marginales en las filas, que indican el número de sitios de verificación, que perteneciendo a un determinado estrato, no fueron incluidos en ella, este tipo de error se llama de omisión. De igual forma, las celdas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión, es decir, sitios de verificación que se incluyeron en una categoría perteneciendo realmente a otra (Chuvieco, 1995).

La confiabilidad del usuario \hat{U}_i y la del productor \hat{P}_j son respectivamente calculadas utilizando las ecuaciones 4 y 5. La confiabilidad del productor, está relacionada a los errores de omisión, mientras que la confiabilidad del usuario se relaciona con errores de comisión.

$$\hat{U}_i = \frac{\hat{p}_{ii}}{\hat{p}_{i+}} \quad (4)$$

$$\hat{P}_j = \frac{\hat{p}_{jj}}{\hat{p}_{+j}} \quad (5)$$

Cada uno de los índices tiene una probabilidad de acierto, las cifras que permiten conocer dicha probabilidad en una estimación son los intervalos de confianza.

El cálculo de dichos intervalos depende del tipo de muestreo, en el caso que nos ocupa tratándose de un muestreo estratificado los intervalos de confianza de

las estimaciones de la fiabilidad global, tanto del productor como del usuario son calculados en base a las ecuaciones 6 a 8 (Card, 1982).

$$HCI_{\hat{\theta}} = z \sqrt{\sum_{i=1}^q \frac{\hat{p}_{ii}(\pi_i - \hat{p}_{ii})}{n_{i+}}} \quad (6)$$

Donde $HCI_{\hat{\theta}}$ es el medio intervalo de confianza de la confiabilidad global y z corresponde al número de desviación estándar en una distribución normal (para un nivel de confianza del 95%, $z = 1.96$).

$$HCI_{\hat{\theta}_i} = z \sqrt{\frac{\hat{p}_{ii}(\pi_i - \hat{p}_{ii})}{\pi_i^2 n_{i+}}} \quad (7)$$

Donde $HCI_{\hat{\theta}_i}$ es el medio intervalo de confianza del usuario para la categoría i , y z corresponde al número de desviación estándar en una distribución normal.

$$HCI_{\hat{p}_j} = z \sqrt{\hat{p}_{jj} \hat{p}_{+j}^{-4} \left[\hat{p}_{jj} \left(\sum_{i \neq j}^q \hat{p}_{ij}(\pi_i - \hat{p}_{ij})/n_{i+} \right) + (\pi_j - \hat{p}_{jj})(\hat{p}_{+j} - \hat{p}_{jj})^2/n_{j+} \right]} \quad (8)$$

Donde $HCI_{\hat{p}_j}$ es el medio intervalo de confianza de la confiabilidad de producto para la categoría j , π_i es el total del área para la clase, π_j es el total de área válida según el material de referencia. La j e i hacen referencia a filas y columnas, respectivamente.

A continuación se procede con el análisis de las matrices de confusión, con sus respectivos índices y medios intervalos de confianza.

3.6 Análisis de los datos de confiabilidad

Además de la obtención de matrices de confusión por estrato²⁵, se obtiene la confiabilidad por categoría para usuario y la confiabilidad global, cada uno con su respectiva desviación estándar.

3.6.1 Análisis de los mapas de CVUS series IV y V de INEGI

Resultado de la aplicación de la metodología antes descrita, se obtuvo la confiabilidad global del mapa de cambio de CVUS series IV y V de INEGI, la cual indica que:

- El mapa de cambio derivado de las series de CVUS IV y V de INEGI es consistente en un 84%, con una desviación estándar de 0.02.

A continuación se presenta el índice de confiabilidad para el usuario por clase de cambio:

Cuadro 11. Índice de confiabilidad por clase de cambio series IV y V INEGI

Clase	Confiabilidad para Usuario	Des. Estándar para Usuario
No bosque no cambio	0.70	0.04
Bosque no cambio	0.93	0.02
Deforestación	0.11	0.02
Reforestación	0.0	0.0

²⁵ Las matrices de confusión por estrato para cada insumo pueden ser consultadas en “Anexos”.

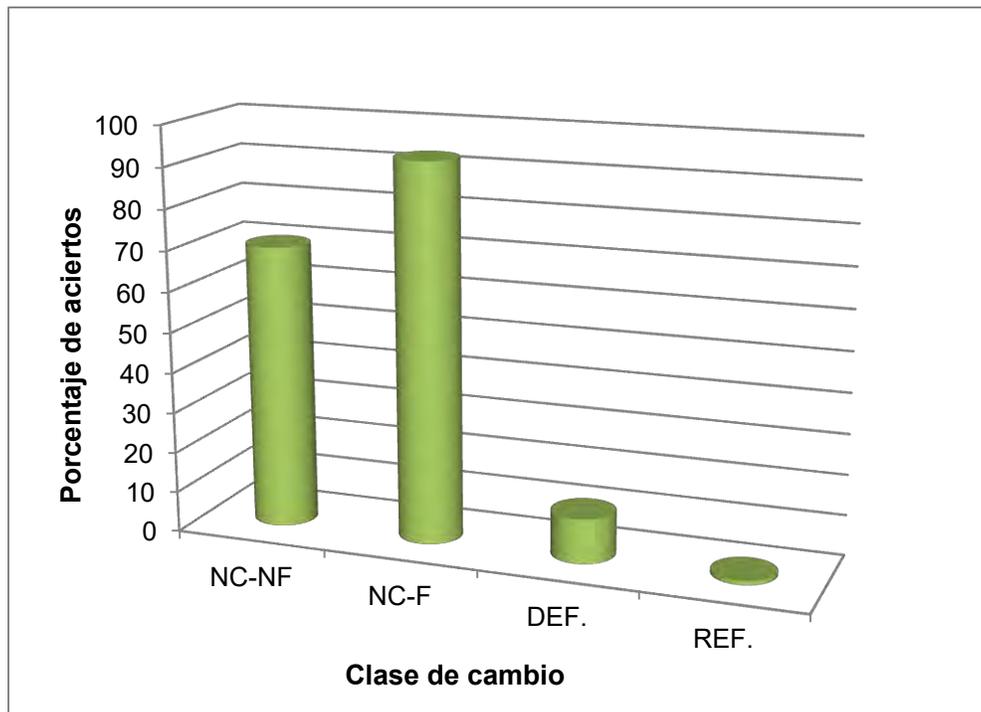


Fig. 15 Comparación entre los índices de confiabilidad por clase para INEGI.

Según los resultados obtenidos de la evaluación de la confiabilidad para los mapas de CVUS series III, IV y V INEGI, se puede observar (Fig.15), que en las clases que se mantienen *estables* (no bosque no cambio y bosque no cambio) el porcentaje de confiabilidad es alto, sin embargo lo contrario ocurre en las clases restantes, es decir aquellas en las cuales se observan procesos de ganancia o pérdida forestal (deforestación y reforestación).

Esto se debe a la naturaleza dinámica de dichos procesos, la cual es dinámica, que generalmente corresponde a un ciclo, el cual puede llevar varios años en completarse. Existe, por lo tanto cierto grado de dificultad, implementando el protocolo de interpretación, para asignar una sola etiqueta de alta confianza de uno de los procesos en cuestión. La aplicación de la lógica difusa en esta interpretación permite mitigar un patrón erróneo de no cambio en una zona

determinada, lo que resulta de gran importancia, ya que pudiera ser el primer paso para un análisis más detallado en un determinado momento, bajo la lógica de gestión ambiental o pago por servicios ambientales, permitiendo ubicar áreas de perturbación en la cobertura vegetal, que no fueron detectadas en el mapeo del INEGI.

Aunado a esto, los procesos de pérdida y ganancia forestal poseen *per se* una tendencia activa, la cual se encuentra intrínsecamente relacionada a las actividades antrópicas. Por ejemplo la agricultura, puede iniciarse con un proceso de deforestación, acto seguido se le da uso al suelo por tiempo determinado y al quedar infértil debido a la implementación de monocultivos o la escasa rotación de cultivos, se abandonan esas áreas. Posteriormente, uno de dos posibles casos pueden ocurrir en las áreas abandonadas: la ocupación para la ganadería o la reforestación.

Dicho proceso, puede llevar un par de años en desarrollarse, y al realizarse el análisis de los cambios en escalas de tiempo tan amplias, se pierde dicha información, por lo que se podría inferir la estabilidad de un área al comparar las fechas inicial y final sin observar el proceso que se desarrolla a lo largo del periodo de estudio. Es por esto que resulta de gran importancia el análisis a escalas de tiempo *cortas*, procurando poder seguir la tendencia del área, en la búsqueda por no perder información de relevancia para el análisis.

La baja confiabilidad de la clase de reforestación podría deberse a la dificultad de inferir dicho proceso, ya que aún con la implementación de imágenes de alta resolución, el periodo de tres años queda muy corto para constatar una reforestación. Resulta de gran importancia la experiencia del intérprete, ya que únicamente con ella se logrará entender la realidad del sitio de verificación, con el uso del enfoque de lógica difusa, el detalle de la estimación se puede reflejar mediante la asignación de segundas etiquetas, lo que permite lograr una interpretación satisfactoria de los sitios verificados.

3.6.2 Análisis del mapa Global Forest Cover Change

Se calculó la confiabilidad del usuario para cada categoría de cambio, así como la confiabilidad global, ésta última indica que:

- El mapa de cambio derivado del Global Forest Cover Change es consistente en un 61%, con una desviación estándar de 0.03

A continuación se presenta la confiabilidad por categoría para el usuario.

Cuadro 12. Índice de confiabilidad por clase de cambio para el mapa Global Forest Cover Change

Clase	Confiabilidad de Usuario	Des. Estándar para Usuario
No forestal no cambio	0.47	0.03
Forestal no cambio	0.82	0.04
Deforestación	0.10	0.03

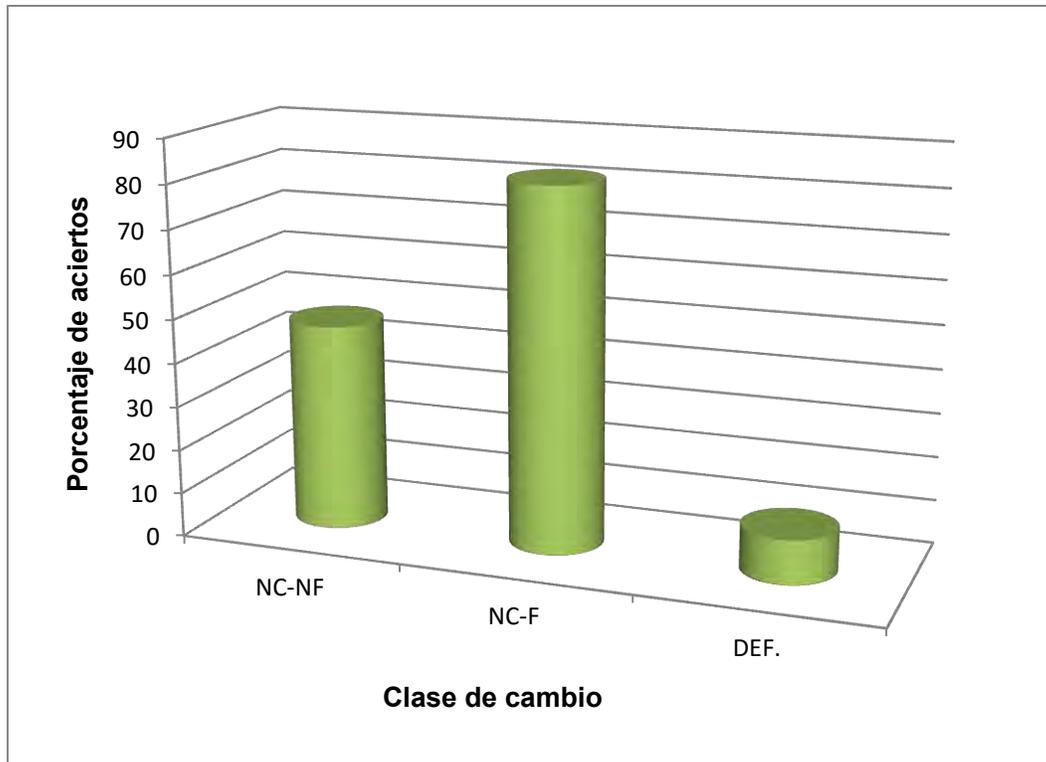


Fig. 16 Comparación entre los índices de confiabilidad por clase para Global Forest Cover Change

Con los resultados obtenidos de la evaluación de los datos del GFCC, es posible observar (Fig. 16), que la categoría que posee la mayor confiabilidad es la referente a permanencia de bosque (bosque no cambio), lo que resulta congruente ya que con mayor certidumbre, mediante el protocolo de interpretación, es posible asignar etiquetas con alta confianza en áreas donde no se observaron cambios, en comparación con sitios en los cuales la cobertura vegetal muestra un patrón dinámico. Recapitulando que dichos sitios se ven generalmente influenciados por procesos antrópicos.

Es notable la alta confiabilidad del insumo evaluado en la categoría de cobertura forestal no cambio (NC-F). Indica que el trabajo llevado a cabo por la Universidad de Maryland para cuantificar y localizar la cobertura forestal a nivel global, resulta bastante satisfactorio.

En todo caso, el porcentaje de confiabilidad que reportó el estudio, resulta muy interesante, tomando en cuenta que no existen trabajos que evalúen estadísticamente productos referentes a procesos de degradación - deforestación a esta escala.

Además de lo anterior, recordaremos que la escala del insumo de percepción remota siendo de 30 metros, resulta la validación con alta confianza de los cambios en un sitio de 10,000 m² (disco centrado en el punto de verificación) basándose en las definiciones propuestas por la FAO, de deforestación.

Bajo el enfoque de la lógica difusa se logra dar cuenta de una posible permanencia o un posible en el sitio, lo que ofrece un valor agregado para la toma de decisiones respecto de la incertidumbre que caracteriza el fenómeno de deforestación.

Por último, es importante recordar que debido a las características del Global Forest Cover Change *dataset*, no existe la información sobre reforestación por lapsos temporales, por lo que no se pudo evaluar el fenómeno “reforestación”.

La siguiente grafica (Fig. 17) muestra por estrato la cantidad de sitios que presentan consistencia con la información verificada.

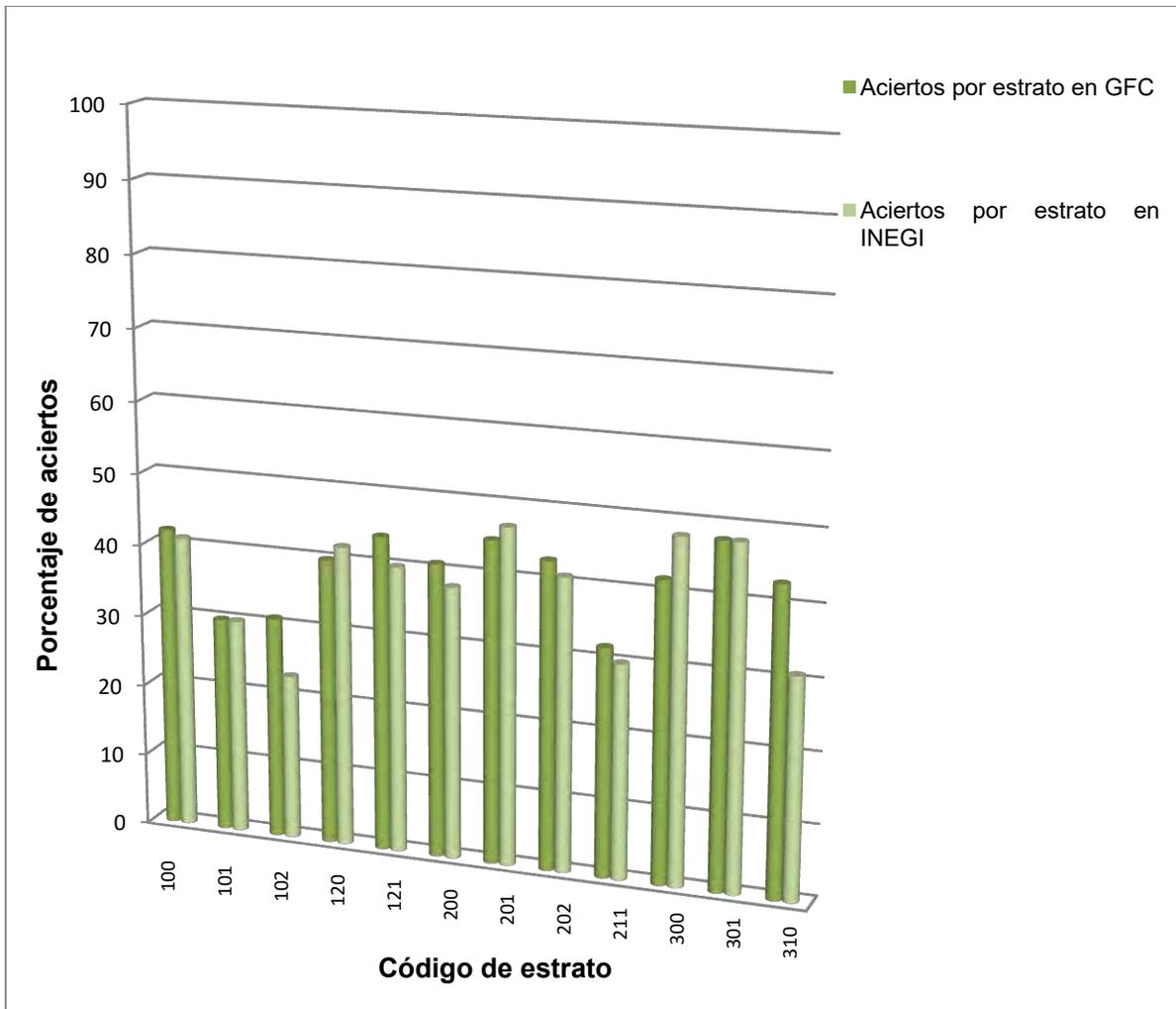


Fig. 17 Porcentaje de aciertos por estrato para ambos insumos.

Los estratos con mayor número de aciertos son los códigos 100, 120, 121, 200, 201, 202, 300 y 301 (Fig. 17), lo que corrobora el mayor acierto de los estratos donde no hubo cambio aparente. Así, ambos insumos presentan una estimación satisfactoria de la gran mayoría de la cobertura forestal del territorio nacional, que no cambió entre 2007 y 2012, puesto que existe congruencia entre ésta y el material de verificación.

En contraste, las clases de cambio se caracterizan por ser fragmentadas y de poca extensión. En general se trata de pequeñas áreas de bosque en proceso de expansión (reforestación) o contracción (deforestación).

Los resultados indican que éstas áreas fueron mal detectadas, lo que significa que tanto la información de las series de CVUS de INEGI, como la información del GFCC presentan grandes limitaciones, a sus respectivas escalas, para reflejar espacialmente un cambio en cobertura forestal (sólo 10% de aciertos para la clase deforestación en ambos casos).

CONCLUSIONES

Los bosques juegan un papel importante en la regulación del clima, principalmente por la capacidad que poseen de fijar y absorber el CO₂, mediante la fotosíntesis y almacenarlo en sus tejidos durante largos periodos de tiempo. Debido a ello y a la creciente presión en las últimas décadas bajo la cual se han visto sometidos, diferentes instituciones se dan a la tarea de monitorear así como de evaluar el estado de la cobertura vegetal en general y particularmente de la cobertura forestal a nivel nacional, ya que datos reportados por la FAO indican que el 31% de la superficie terrestre en el mundo son bosques.

México, constituido como uno de los 12 países megadiversos debiera considerar la importancia que representan las cifras reportadas por las instituciones nacionales, sin embargo, aun cuando se posee una noción de la relevancia que tienen los bosques en relación no solo con sus funciones dentro de los ecosistemas, sino también como poseedores de los mayores porcentajes de biodiversidad mundial, sin mencionar los servicios que brindan al ser humano en general, aún hoy en día no se logra tomar como parte estructural del reporte de los datos a la evaluación cartográfica estadísticamente robusta de los mismos, considerando que dicha evaluación permite presentar un índice de confiabilidad global, el cual manifiesta la correspondencia con la realidad de un determinado producto cartográfico.

Aunado a esto, en todo trabajo en el cual se estime la confiabilidad de un mapa, es importante presentar el porcentaje de confiabilidad por clase, ya que de este modo, tanto usuario como productor, al consultar los datos reportados pueden determinar qué clases aportan los mayores porcentajes de congruencia con la realidad a la confiabilidad global, ya que de lo contrario se puede sobreestimar o al contrario subestimar, los datos reportados en una clase

particular del mapa, o bien, en el conjunto del mapa, puesto que se infiere que dicho porcentaje de confiabilidad es igual en toda el área del mapa.

Además de lo anterior, es importante que se presenten las matrices de confusión obtenidas como resultado del proceso de validación, reforzando de este modo la credibilidad de los datos reportados en el estudio.

Sumado a lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se destaca la implementación de la lógica difusa, puesto que aportó grandes ventajas al realizar el proceso de verificación, debido a la tolerancia clasificatoria que permite *per se*, lo que concatena la inferencia de posibles cambios observables en la cobertura vegetal, facilitando la localización de áreas, en el peor de los escenarios, susceptibles a procesos de pérdida forestal (deforestación y/o degradación), o al contrario, áreas de ganancia forestal, es decir reforestación.

Se destaca el trabajo llevado por Hansen *et al.*, en la Universidad de Maryland, EE.UU, ya que, según los datos obtenidos en el presente trabajo, cuenta con una aproximación satisfactoria a la realidad. Entre las fortalezas del producto GFCC están la estandarización de metodología y definiciones implementadas, a lo ancho del planeta. Con ella se evita dificultades comparativas entre los países, uno de los problemas más recurrentes en cuanto a la estimación de coberturas terrestres y sus procesos.

Si bien ambos insumos evaluados en el presente trabajo manifestaron altos porcentajes de confiabilidad en las clases estables, no ocurrió lo mismo con las clases dinámicas, lo que podría indicar que aún se encuentran carencias al tratar de cuantificar procesos como la deforestación, lo cual puede deberse a diversos factores, por mencionar algunos, a la resolución espacial y temporal de los insumos, debido a la naturaleza *per se* del proceso de deforestación, el cual toma varios años llevarse a cabo. Por ello, al realizar una posible actualización de los datos publicados en el 2013, podría considerarse el hecho de tomar como

insumos imágenes de mayor resolución, aunque, en contra, se considera el hecho de que el procesamiento y análisis de la información se tornarían complejos.

Se observó que en zonas de alta nubosidad, como el caso del sureste de la República Mexicana, se dificulta con cierto grado el protocolo de interpretación, debido a que algunos de los sitios se encontraban cubiertos por nubes, lo que impedía la interpretación, sin embargo se lograron con apoyo de imágenes disponibles en la plataforma Google Earth Pro.

A pesar de este tipo de dificultades, se destaca el hecho de que el presente trabajo constituye uno de los primeros acercamientos a la validación de mapas de cobertura vegetal a nivel nacional. Se espera se tome como referencia para la validación cartográfica oficial nacional, con el fin de fomentar el conocimiento y la unificación de metodologías de producción cartográfica en las diferentes instituciones nacionales encargadas de ello. También asimilar metodologías de validación estadísticamente robusta, tiene el efecto de una mayor robustez en los programas de monitoreo y conservación a nivel nacional.

Resultado de la metodología implementada en el presente trabajo, se destaca la funcionalidad de la misma, y se recalca la relevancia de llevarla a cabo rigurosamente, con el fin de presentar datos confiables y no sesgados, evitando así, que carezcan de validez estadística, logrando que avalen el proceso de validación realizado. De acuerdo esto, dicho proceso permitió corroborar la hipótesis presentada al inicio del trabajo, puesto que no sólo se logró conferir validez estadística a ambos insumos, si no también, dicho porcentaje superó el esperado, que si recapitulamos, era del 60% y que, de acuerdo a Couturier (2007), es el promedio de los mapas evaluados a nivel regional en varias partes del mundo.

Dentro de las posibles mejoras que podrían plantearse a la presente investigación, se propone considerar a futuro la implementación de imágenes provenientes de sensores con capacidades específicas, como el caso de

imágenes Radar. Lo anterior en el sentido de buscar aminorar la incertidumbre de clasificación, principalmente en áreas donde las condiciones atmosféricas dificultan la validación visual, por ejemplo al sureste de la República Mexicana.

En relación a lo mencionado en el párrafo anterior, el presente trabajo podría permitir la realización a *posteriori* de evaluaciones estadísticas cartográficas a menores escalas, dentro del República Mexicana, puesto que presenta las áreas del territorio nacional donde se observan los mayores cambios, tanto negativos, como positivos, sobre la cobertura vegetal.

Otro punto importante en la evaluación cartográfica es la implementación y manejo correcto de definiciones, recomendando el uso de las mismas propuestas por instituciones oficiales, por ejemplo FAO, ya que de este modo las discrepancias entre datos reportados disminuyen.

Bajo este enfoque, se sugiere a las dependencias oficiales encargadas de monitorear y reportar el estado que guarda la cobertura vegetal en el territorio mexicano, adaptar un marco metodológico para la evaluación de la confiabilidad cartográfica. En efecto surge la necesidad en tiempos de cambios ambientales acelerados a nivel global, de contar con estimaciones estadísticamente válidas que reporten el estado que guarda la cobertura y el porcentaje de afectación a la misma, en la búsqueda por mejorar políticas y programas de conservación ambiental.

Dentro de la disciplina geográfica, destaca la relevancia de su participación en la producción de información referente a cobertura vegetal, puesto que la formación de la misma permite una visión holística del tema, es decir considerar los diferentes factores que facilitan y modifican la presencia, formación y desarrollo de la cobertura vegetal, así como las necesarias consecuentes evaluaciones, con el fin de mantener actualizada la información pertinente al tema.

Lo anterior no supone la ausencia en la realización de dicha cartografía de otros expertos en el tema, pues se reconoce la importancia de llevar a cabo un análisis multidisciplinar.

Por último, es importante mencionar que metodologías como la implementada en el presente trabajo, debe ser conocida y efectuada por la comunidad geográfica nacional, puesto que la elaboración y manipulación de material cartográfico constituye una herramienta fundamental dentro del quehacer geográfico.

ANEXOS

Debido a que se conoce la cantidad de sitios de verificación asignados a cada estrato por línea de matriz es posible agrupar las sub-matrices resultantes en una misma por tipo de cambio²⁶, diferenciadas entre bosque (matrices a, a₁, a₂ y a₃) y matorral (matrices b y b₁). A continuación se presentan tales matrices.

1. Matrices de confusión por clase de cambio para datos de INEGI.

Estratos 100, 120 y 200

	NC-NF	NC-F	DEF	REF
NC-NF	41	8	0	0
NC-F	12	38	0	0
DEF	0	0	0	0
REF	8	42	0	0

(a)

Estratos 300 y 310

	NC-NF	NC-F	DEF	REF
NC-NF	0	0	0	0
NC-F	2	48	0	0
DEF	31	18	1	0
REF	0	0	0	0

(b)

Estratos 101, 121, 201 y 211

	NC-NF	NC-F	DEF	REF
NC-NF	20	30	0	0
NC-F	2	47	0	0
DEF	8	30	9	0
REF	9	40	1	0

(a₁)

²⁶ En el proceso de agrupación de matrices se excluyeron las correspondientes a la clases escasas (ver Cuadro 8, pág. 66)

Estrato 301

	NC-NF	NC-F	DEF	REF
NC-NF	0	0	0	0
NC-F	2	48	0	0
DEF	0	0	0	0
REF	0	0	0	0

(b₁)

Estratos 102 y 202

	NC-NF	NC-F	DEF	REF
NC-NF	23	21	4	0
NC-F	4	41	2	0
DEF	0	0	0	0
REF	0	0	0	0

(a₂)

2. Matrices de confusión por clase de cambio para datos de GFC.

Estratos 100, 101 y 102

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	42	8	0
NC-F	19	30	1
DEF	31	13	5

(a)

Estratos 120 y 121

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	8	40	2
NC-F	6	44	0
DEF	0	0	0

(a₁)

Estratos 200, 201 y 202

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	9	41	0
NC-F	4	45	1
DEF	2	43	4

(a₂)

Estrato 211

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	0	0	0
NC-F	13	32	2
DEF	0	0	0

(a₃)

Estratos 300 y 301

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	8	42	0
NC-F	2	48	0
DEF	0	0	0

(b)

Estrato 310

	NC-NF	NC-F	DEF
NC-NF	37	11	2
NC-F	0	0	0
DEF	0	0	0

(b₁)

BIBLIOGRAFÍA

- Bocco G., M. Mendoza y O. Maser. (2001). *La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: una propuesta metodológica para los estudios de deforestación*. Investigaciones Geográficas N° 44. Págs. 18-38.
- Carabias J., P. Meli, G. Hernández y E. Provencio. (2010). *Evaluación de áreas prioritarias con mayor biodiversidad y potencial almacenamiento y captura de carbono, mediante la reconversión productiva en Marqués de Comillas, Chiapas, y la disminución de la deforestación a nivel local*. Informe Final de Proyecto, Facultad de Ciencias – UNAM, INE, México.
- Card D.H. (1982). *Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy*. Photogrammetric engineering and remote sensing. N° 48. Pages. 431-439.
- Chuvieco E. (1995). *Fundamentos de teledetección*. Ediciones RIALP S.A. Madrid.
- CONAFOR (2013). *Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica*. SEMARNAT. México.
- CONAFOR (2015). *Protocolo: Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México*. FAO-UNDP. Jalisco, México.
- Couturier S. (2007). *Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y usos del suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite*, tesis de doctorado, UNAM-Université Paul Sabatier de Toulouse, Francia - México.
- Couturier S. et al. (2009). *¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico*. Investigación Ambiental. Vol. 1. N° 1. Págs. 6-16.
- Couturier S. (2010). *A fuzzy-based method for the regional validation of global maps: the case of MODIS derived phenological classes in a mega diverse zone*. In: International Journal of remote sensing. N° 31. Pages. 5797-5811.
- Couturier S. (2011). *Evaluación de la cobertura vegetal en México: aciertos y sesgos del mapa derivado de MODIS*. En Mas, J.F. (coord) Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. México. INE-SEMARNAT.
- Couturier S. et al. (2012). *Measuring tropical deforestation with error margins: a method for REDD monitoring in south-eastern México*. In: Tropical Forests. Chap. 14, pages 269-293.

- FAO. (2010). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Informe principal (FRA 2010)*. Roma.
- Gopal, S., & Woodcock, C. (1994). *Theory and methods for accuracy assessment of thematic maps using fuzzy sets*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. EE.UU. N° 60 (2).
- Green D. R. & W. Hartley. 2000. *Integrating photo-interpretation and GIS for vegetation mapping: some issues of error*. Eds. R. Alexander y A. C. Millington. Vegetation Mapping from Patch to Planet. John Wiley and Sons, Nueva York. Pages 103-134.
- Hansen M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. (2013). *High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change*, Science 342 (15 Noviembre). Pages 850-853.
- Hord & Brooner (1976). *Land use map accuracy criteria*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Volume. 42.
- INEGI (2000). *Información Geográfica, hacia el tercer milenio*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- INEGI (2009). *Guía para la interpretación de cartografía de uso de suelo y vegetación: escala 1:250 000: serie III*. México.
- INEGI (2012). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie IV*. México.
- INEGI (2013). *Sistema de cuentas nacionales de México. Cuentas económicas y ecológicas de México 2003-2011, año base 2008*. México.
- INEGI (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie V*. México.
- Lambin E. F. et al. (2001). *The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths*. Global Environmental Change 11. Pages 261–269.
- Lambin E. F., Geist H., & Rindfuss R. R. (2006). *Introduction: local processes with global impacts*. Land-use and land-cover change. Pages 1-8. Springer Berlin Heidelberg.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2001). *Geographic information system and Science*. England: John Wiley & Sons, Ltd.

- Lund, H.G., Torres V., Turner A. y L. Wood. (2002). *Análisis crítico de los estimados disponibles de deforestación*. USAID. SEMARNAT. México.
- Mas J.F., Reyes-Días Gallegos José, Pérez Vega Azucena. (2003). *Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Núm. 51. Págs. 53-72. México.
- Mas J.F., Velázquez A., Couturier S. (2009). *La evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana*. Investigación Ambiental. Págs. 23-39. México.
- Mas J.F., y Couturier, S. (2011). *Evaluación de bases de datos cartográficas. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. CIGA, IG. México, DF. Págs. 675-703.
- Miranda, F., y Hernández, X. (1963). *Fisiografía y vegetación. Las zonas áridas del centro y noreste de México*. Ed. IMRNR. México, DF. Págs.1-27.
- Mittermeier R. y C. Goettsch. (1992). *La importancia de la diversidad biológica de México*. En: Sarukhán, J. y R. Dirzo (comps.). México ante los retos de la biodiversidad. Conabio. México.
- Neyra-González, L., & Durand-Smith, L. (1998). *Biodiversidad* En: Conabio. La diversidad biológica de México: Estudio de País, 62-64.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R. & Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Institute for Global Environmental Strategies.
- Reid W. V., H. A. Money, A. Cropper, D. Capistrano, S. R. Carpenter, K. Chopra, P. Dasgupta, T. Dietz, A. K. Duraiappah, R. Hassan, R. Karperson, R. Leemans, R. M. May, T. (A. J.) McMichael, P. Pingali, C. Samper, R. Scholes, R. T. Watson, A. H. Zakri, Z. Shidong, N. J. Ash, E. Bennett, P. Kummar, M. J. Lee, C. Raudsepp-Hearne, H. Simons, J. Thonell y M. B. Zurek. (2005). *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio: Informe de Síntesis*. Washington, EE.UU.
- Rzedowski J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa. México, D.F.

- Sarukhán J., J. Soberón y J. Larson-Guerra. (1996). *Biological Conservations in a High Beta-diversity Country*. In: Di Castri, F. y T. Younès (eds.). Biodiversity Science and Development: Towards a New Partnership. CAB International.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, *La Gestión Ambiental en México*, México, 2000.
- SEMARNAT (2012). *Inventario nacional forestal y de suelos*. Informe 2004-2009. México.
- Stehman S.V. & Czaplewski, R. L. (1998). *Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles*. Remote Sensing of Environment, 64(3). Pages 331-344.
- Stehman S.V. (2001). *Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67. Pages 727-734.
- Stehman, S. V., & Wickham, J. D. (2011). *Pixels, blocks of pixels, and polygons: Choosing a spatial unit for thematic accuracy assessment*. Remote Sensing of Environment. N° 115 (12). Pages 3044-3055.
- Strahler H.A., et al. (2006). *Global land cover validation: recomendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps*. Luxemburg: office for official publications of the European communities.
- Velázquez A., J.F., Mas, J.L. Palacio, J.R. Díaz, R. Mayorga, C. Alcántara, R. Castro y T. Fernández. (2002). *Análisis de Cambio de uso de suelo*. Informe técnico. Convenio INE-Instituto de Geografía, UNAM.
- Velázquez A., E. Durán, J.F. Mas, D. Bray & G. Bocco. (2005). *Situación actual y prospectiva del cambio de la cubierta vegetal y usos del suelo en México*. En: Más allá de las Metas de Desarrollo del Milenio. CONAPO. Pp. 391-416. ISBN. 970-628-845-7
- Velázquez A., et al. (2005). *La dinámica de la cubierta forestal de México*. Revista Mexicana de Física.
- Wulder M. A., White, J. C., Magnussen, S., & McDonald, S. (2007). *Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video*. RemoteSensing of Environment, 106 (4). Pages 480-491.