



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**CONFIABILIDAD DEL MAPA DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL ESTIMADO POR  
MÚLTIPLES SENSORES: APLICACIÓN A LA ZONA NÚCLEO DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA DE LA  
MARIPOSA MONARCA EN EL PERIODO DE 2003-2011**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

**JUAN CARLOS MOLINA LÓPEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. STÉPHANE ANDRÉ COUTURIER**

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., OCTUBRE 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

Agradezco a los sinodales Mtro. José Manuel Espinoza, Mtro. Mauricio Galeana, Dra. Rocío Marisol Alanís y al Dr. Jean Francois Mas la revisión y comentarios emitidos que fueron fundamentales para mejorar y enriquecer la presente investigación.

De forma especial quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Stéphane Couturier, por el apoyo brindado desde mi ingreso a la maestría, la invitación a colaborar en su equipo de trabajo y sobre todo por la paciencia y el interés constante para concluir esta tesis.

Al CONACYT por la beca de manutención otorgada que posibilitó mis estudios de maestría.

Por último, quiero agradecer el apoyo recibido a través del proyecto PAPIIT IN302417 titulado "Seguridad alimentaria versus preservación ambiental: diseño de una plataforma cartográfica nacional para analizar su compatibilidad de forma multiescalar". Se agradece la DGAPA UNAM por fomentar la investigación científica.

## Índice

Introducción .....	1
Objetivos.....	4
<i>Objetivo general</i> .....	4
<i>Objetivos particulares</i> .....	4
Hipótesis.....	4
CAPÍTULO 1 .....	5
1.1. Percepción remota y SIG.....	5
1.2 Cartografía temática .....	7
1.3 Confiabilidad cartográfica.....	8
1.3.1 Lógica difusa.....	11
1.4 Cobertura Vegetal y Cambio en el Uso de Suelo .....	12
1.5 El escenario de CUSCV de México .....	15
1.6 El programa REDD+ en el contexto del cambio climático .....	21
1.7 Producción de cartografía de uso de suelo y vegetación de México.....	25
1.8 Conclusiones al capítulo.....	30
CAPÍTULO 2.....	32
2.1 Generalidades del área de estudio .....	33
2.2 Antecedentes .....	37
2.3 Materiales.....	42
2.3.1 Mapa de cambio del proyecto Global Forest Cover Change (GFCC) .....	42
2.3.2 Molina, 2017.....	45
2.3.3 Imágenes ASTER.....	46
2.3.4 Imágenes RAPIDEYE.....	47
2.3.5 Mosaico Ortorectificado de López.....	49
2.4 Aspectos metodológicos .....	51
2.4.1 Diseño de la muestra.....	51
2.4.2 Evaluación de los sitios de verificación .....	53
2.4.3 Análisis de los datos .....	53
2.3.4 Estimación del área y la incertidumbre .....	56
CAPÍTULO 3.....	58
3.1 Mapa de cambio del proyecto Global Forest Cover Change (GFCC) .....	58
3.1.1 Corrección de las superficies derivadas del mapa de GFCC.....	64

3.2	Mapa de cambio Molina, 2017 .....	65
3.2.1	Corrección de las superficies derivadas del mapa de Molina, 2017 .....	71
	Discusión .....	71
	CONCLUSIONES .....	74
	Bibliografía .....	77

## Índice de figuras

FIGURA 1.1 PRINCIPIOS Y ELEMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	6
FIGURA 1.2 CATEGORIZACIÓN DE LA LÓGICA EMPLEADA EN BOSQUE DE PINO Y ENCINO.....	12
FIGURA 1.3 DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN MÉXICO.....	16
FIGURA 1.4 VEGETACIÓN EN MÉXICO.....	17
FIGURA 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS CARTAS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN, SERIE I A VI.....	27
FIGURA 2.1 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	32
FIGURA 2.2. ZONA DE ESTUDIO.....	34
FIGURA 2.3 MAPA GFCC.....	44
FIGURA 2.4 1FIGURA 2.2 SATÉLITE ASTER.....	46
FIGURA 2.5 1IMÁGENES ASTER.....	47
FIGURA 2.6 1 RAPIDEYE.....	48
FIGURA 2.7 1 IMAGEN RAPIDEYE.....	49
FIGURA 2.8 1 MOSAICO ORTORECTIFICADO DE LA RBMM, LÓPEZ.....	50
FIGURA 2.9 TIPOS DE MUESTREO.....	52
FIGURA 3.1 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ACIERTO PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC.....	58
FIGURA 3.2 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ERROR PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DE GFCC.....	58
FIGURA 3.3 MAPA DE CAMBIO Y MUESTREO ESTRATIFICADO DEL CFCC.....	58
FIGURA 3.4 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ACIERTO PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO.....	67
FIGURA 3.5 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ERROR PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA, 2017.....	68
FIGURA 3.6 MAPA DE CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL DE MOLINA, 2017 Y MUESTREO ALEATORIO ESTRATIFICADO PARA SU EVALUACIÓN.....	70

## Índice de cuadros y gráficos

CUADRO 1.1 SUPERFICIE DEFORESTADA Y TASA DE DEFORESTACIÓN ENTRE 1990-2020 .....	18
CUADRO 1.2 FUENTES QUE DOCUMENTAN LA TASA DE DEFORESTACIÓN A NIVEL NACIONAL .....	18
CUADRO 2. 1 PUBLICACIONES INDEXADAS SOBRE CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA A NIVEL INTERNACIONAL .....	38
CUADRO 2.2 PUBLICACIONES INDEXADAS SOBRE CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA A NIVEL INTERNACIONAL.....	38
CUADRO 2.3 ARTÍCULOS NACIONALES PUBLICADOS EN REVISTAS INDEXADAS.....	39
CUADRO 2.4 CAPÍTULOS DE LIBROS PUBLICADOS .....	40
CUADRO 2.5 TESIS PUBLICADAS.....	41
CUADRO 2.6 NOMENCLATURA PARA DEFINIR EL PORCENTAJE DE CAMBIO .....	54
CUADRO 2.7 NOMENCLATURA PARA DEFINIR EL PORCENTAJE DE CAMBIO .....	54
CUADRO 3.1 MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC.....	58
CUADRO 3.2.MATRIZ DE CONFUSIÓN CORREGIDA MEDIANTE EL MÉTODO DE CARD PARA EL MAPA DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL .....	58
CUADRO 3.3 ÍNDICES DE FIABILIDAD Y MEDIOS INTERVALOS DE CONFIANZA POR CLASE PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC.....	58
CUADRO 3.4 ESTIMACIÓN DE LAS SUPERFICIES, INTERVALOS DE CONFIANZA PROPORCIONES DE ÁREA DE LAS CLASES DESPUÉS DE LAS CORRECCIONES EN LOS ERRORES DE CLASIFICACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC .....	65
CUADRO 3.5 MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA (2017) ..	69
CUADRO 3.6 MATRIZ DE CONFUSIÓN CORREGIDA MEDIANTE EL MÉTODO DE CARD PARA EL MAPA DE CAMBIO FORESTAL DE <i>MOLINA, 2017</i> .....	69
CUADRO 3.7 ÍNDICES DE FIABILIDAD Y MEDIOS INTERVALOS DE CONFIANZA POR CLASE PARA EL MAPA DE CAMBIO DE <i>MOLINA, 2017</i> .....	71
CUADRO 3.8 ESTIMACIÓN DE LAS SUPERFICIES, INTERVALOS DE CONFIANZA Y PROPORCIONES DE ÁREA DE LAS CLASES DESPUÉS DE LAS CORRECCIONES EN LOS ERRORES DE CLASIFICACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DE <i>MOLINA, 2017</i> . 71	
Gráfico 1.1 Deforestación (pérdida de superficie anual promedio en miles de ha)	20
GRÁFICO 1.2 PROPORCIÓN DE SUPERFICIE DE VEGETACIÓN PRIMARIA, SECUNDARIA, INDUCIDA Y USO DE SUELO.....	28

## **Introducción**

La cartografía como ciencia y arte de la representación gráfica de la realidad espacial es una de las mayores aportaciones y quizás el mayor simbolismo de la geografía. Existen numerosas aplicaciones y contribuciones hechas a partir de la cartografía. Su utilidad e importancia es incuestionable, desde la localización hasta la capacidad de construir sistemas sofisticados para el análisis espacial y la toma de decisiones. Sin embargo, es hasta hace relativamente poco tiempo que el debate se orientó a considerar la calidad de la información con la que los mapas son elaborados, es así que surge el concepto de confiabilidad cartográfica y que es el objeto de la presente investigación.

El tema de la confiabilidad cartográfica no se estudia de forma aislada y el interés sobre este, surgió enfocado al monitoreo de la biosfera debido a la importancia que tiene conocer las condiciones de cambio a las que se enfrenta el uso de suelo y la cobertura vegetal y que toman como insumo las imágenes satelitales.

La cartografía sometida a esta evaluación es la de cambio de uso de suelo y vegetación, la pertinencia de evaluar dicha temática se deriva a partir de la problemática global de pérdida de cobertura vegetal, haciendo especial énfasis a los bosques templados, los cuales representan un ecosistema relevante como proveedor significativo de servicios ambientales para el planeta; como regulador del clima, sostén de la vida silvestre, sumidero de carbono y reductor de la erosión del suelo (FAO, 2010). Además, constituyen un elemento importante en la sociedad y la economía de los países (FAO, 2004).

No obstante, a nivel mundial el escenario forestal refiere una tendencia de pérdida de cobertura que se ha mantenido desde la década de los noventa (ONU, 2018), siendo la franja intertropical la que presenta la mayor pérdida de superficie.

El escenario en México no es del todo distinto, pues se registró una alta tasa de deforestación de bosques templados y tropicales, entre el periodo de 2001 a 2017 se perdieron 3.2 millones de hectáreas de bosque equivalente al 6% del territorio nacional (Forbes, 2017).

En este contexto han sido impulsadas acciones institucionales a nivel global y nacional orientadas a mitigar y en algunos casos revertir el daño generado a las cubiertas forestales. La principal herramienta para cuantificar dichos cambios se basa en el monitoreo de la biosfera mediante cartografía de cobertura vegetal. Es por ello que es fundamental evaluar

estadísticamente dichos documentos cartográficos, pues este proceso dará certeza de la información sobre el cambio de cobertura que se obtiene.

La cartografía de cambio de la cobertura del suelo y cobertura vegetal es fundamental para la planeación ambiental en toma de decisiones, ya que constituye una herramienta importante de monitoreo de la biosfera debido a su característica de generar modelos cuantitativos e integrar los resultados con otro tipo de información geográfica, este tipo de cartografía es la que registra el mayor número de evaluaciones. Dado que las coberturas vegetales presentan cambios principalmente hacia coberturas vegetales de menor densidad es importante analizarlos y por ello se deben tener en cuenta parámetros técnicos y metodológicos que pueden influir en la precisión de un mapa de cambio de coberturas.

Por lo anterior, es indispensable aplicar una metodología de validación estadística rigurosa a la cartografía, que permita identificar y cuantificar los sesgos que pueda tener el documento con respecto a la realidad y así identificar su grado de confiabilidad, en pocas palabras la evaluación de la confiabilidad cartográfica permite cuantificar los errores existentes en un mapa con respecto de la realidad y especialmente permite evaluar la confiabilidad a través de una robusta estimación de áreas de cambio.

Esta investigación tiene como uno de sus principales objetivos visibilizar la importancia de evaluar la confiabilidad de la cartografía de Cambio de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal (CUSCV) para lograr la estimación robusta de las áreas de CUSCV y su comparación con estimaciones realizadas con otros métodos cartográficos. En este sentido la propuesta que se presenta parte de la evaluación de dos mapas generados con diferentes metodologías e insumos y escalas, pero con la misma temporalidad y temática, el Cambio de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal. De esta manera, logramos comparar los resultados cuantitativos de cambios de cobertura entre los dos mapas. La validación de los sitios de muestreo se realizó de manera visual mediante imágenes de mayor precisión que las usadas para la confección del mapa evaluado.

En esta investigación se analizan dos mapas de CUSCV, uno elaborado previamente y uno generado a la par de esta investigación por el mismo autor. El primer mapa analizado es el mapa de deforestación *Global Forest Cover Change* de Hansen (2013) a una resolución espacial de 30 metros que comprende el periodo 2003-2012, en segundo lugar, el propuesto por el autor de la presente investigación Molina (2017)<sup>1</sup>, en una escala 1:10 000, analizando el periodo de 2003-

---

<sup>1</sup> El mapa de Molina, 2017 aún no ha sido publicado

2011, en los dos casos la zona de estudio corresponde a la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. Como se ve, estos estudios se traslapan en temporalidad, lo que permite generar un análisis comparativo de la cartografía y con ello dar cuenta de procesos nuevos y consistentes en el espacio.

La estructura de la tesis consta de tres capítulos, en el primero se presenta el marco de referencia que da soporte a la investigación, orientado a los aspectos teóricos y antecedentes que van desde ciertas generalidades de los Sistemas de Información Geográfica y la Percepción Remota hasta el tema central de esta investigación: la confiabilidad cartográfica y el contexto en el que surge el interés por medir y validar la deforestación a nivel mundial y nacional.

El segundo capítulo, materiales y métodos presenta por una parte las generalidades del área de estudio, donde se da cuenta de la problemática de deforestación en la zona, enseguida se presenta un apartado de antecedentes que concentra una revisión bibliométrica de la producción existente en torno al tema de estudio y que sirve de contexto para rescatar la relevancia de esta investigación. En los siguientes dos apartados se detallan las características de los insumos empleados y el método seguido para la evaluación de la confiabilidad cartográfica y estimación de áreas, aquí se exponen las etapas que conforman la metodología además de los antecedentes de algunos de los trabajos desarrollados y se aborda también la relevancia de su aplicación.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de la investigación, es decir se expone la confiabilidad y la estimación robusta de áreas de deforestación de los dos mapas analizados a partir de la aplicación de la metodología para la evaluación de la confiabilidad, se pone especial énfasis en la aportación que hace esta tesis a través del mapa generado.

El último apartado de esta tesis profundiza en la discusión de los resultados presentados en el capítulo anterior, exponiendo una crítica a los principales hallazgos y particularidades encontradas en esta investigación.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

- Evaluar la fiabilidad de las cartografías de cambios en la cobertura forestal en la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca generadas en el periodo de 2003 a 2012.

### ***Objetivos particulares***

- Discutir la importancia de la evaluación de la confiabilidad cartográfica en la toma de decisiones.
- Aplicar la metodología de la evaluación de CUSCV.
- Estimar las áreas de CUSCV y en particular de deforestación.
- Generar las matrices de error, así como los índices de fiabilidad asociados (global y del usuario del mapa).
- Identificar las aportaciones y limitaciones que ofrecen los esfuerzos de monitoreo de CUSCV generados con distinto método y a diferente escala.
- Impulsar a la evaluación de la fiabilidad cartográfica como método necesario en el monitoreo espacio-temporal de CUSCV.
- Difundir la importancia de la validación cartográfica para el análisis de CUSCV.

## **Hipótesis**

Mediante la evaluación de la confiabilidad de la cartografía de CUSCV, se puede estimar de forma robusta las superficies y tasas de Cambio de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal en una zona de protección ambiental. Así mismo se puede documentar cuantitativamente las ventajas y limitaciones de instrumentos cartográficos de política ambiental, así como estimar y comparar las superficies de deforestación estimadas a distintas escalas espaciales.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se desarrolla el marco teórico de la confiabilidad cartográfica y el cambio de uso de suelo, temas centrales de esta tesis, es importante tener en cuenta que es una línea de investigación poco desarrollada y particularmente en el caso de México, las investigaciones son escasas, por lo que las contribuciones hechas en este sentido son de gran relevancia para el desarrollo y consolidación de la temática.

Algunas de las principales contribuciones de este capítulo, están orientadas a presentar los antecedentes del desarrollo de esta línea de investigación, así como algunas de las principales aportaciones realizadas desde diferentes enfoques y disciplinas, con el propósito de identificar vacíos existentes y aspectos que pueden enriquecer estos estudios.

Sin embargo, para aterrizar en estos aspectos focalizados en la temática de estudio empezaremos abordando los aspectos más técnicos que posibilitan el desarrollo de la temática, por ello los primeros apartados se orientan a abordar las principales herramientas empleadas en la confiabilidad cartográfica, como son el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR).

El segundo apartado es un esbozo de la aplicación de estas técnicas a través de la cartografía temática que nos lleva al siguiente apartado sobre la confiabilidad cartográfica surgida como una necesidad de evaluar estos productos generados y que es el objetivo principal de esta tesis.

El apartado cuatro aborda de forma directa el marco del objeto de estudio, es decir el uso de suelo y la cobertura vegetal, refiriéndose como tal a la cartografía temática a evaluar y que va desde los conceptos hasta las técnicas involucradas. No se deja de lado el escenario actual en el contexto mexicano y el marco de las políticas en que se ha visto inmersa la problemática del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.

#### **1.1. Percepción remota y SIG**

En este apartado se desarrollan brevemente algunas de las generalidades de la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), partiendo de sus principios básicos y aportaciones.

La Percepción Remota (PR), también conocida como teledetección, se define como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que registran la interacción entre la energía electromagnética y los objetos en la superficie terrestre (Sabins,1996).

Años más tarde esta definición fue complementada por Lillesand, Thomas & Chipman (2004) quienes afirman que la PR es la ciencia y el arte de adquirir, procesar e interpretar imágenes que registran la interacción entre a energía electromagnética y los objetos en la superficie terrestre. (Lillesand et al., 2004).

Es decir, la PR es la ciencia que trata del monitoreo de ciertos aspectos de la superficie del planeta tierra, mediante instrumentos que no están en contacto directo con los objetos medidos, esto es posible gracias a sensores que registran la energía electromagnética (la reflejada y emitida por la superficie terrestre). Esta energía, viaja por el espacio como ondas electromagnéticas. (Figura 1.1)

**FIGURA 1.1 PRINCIPIOS Y ELEMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA**



Fuente: Florenzano (2011) en Mendoza, J. Recuperado de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Elementos-de-la-etapa-de-adquisicion-de-datos-por-teledeteccion-o-adquisicion\\_fig9\\_303652549](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Elementos-de-la-etapa-de-adquisicion-de-datos-por-teledeteccion-o-adquisicion_fig9_303652549)

Su uso tan aceptado y difundido se debe a que por sus características como la capacidad para visibilizar en una sola imagen un área mayor a la que el ojo humano percibe dentro de su campo visual, la homogeneidad de su información, así como la capacidad de hacer visibles áreas que al ojo humano no se pueden distinguir debido a la amplitud del espectro electromagnético y las limitaciones de la visión humana, además los sensores remotos pueden manejar múltiples

escalas visuales en diferentes periodos, lo que facilita dar seguimiento en el tiempo a los fenómenos estudiados. (Labrador, Évora y Arbelo, 2012)

Al igual que la percepción remota, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una importante herramienta de trabajo en la investigación orientada a estudios sobre la biosfera, pues son fundamentales para brindar un diagnóstico de la zona de estudio y con base en ello presentar propuestas orientadas a la resolución de problemas.

Un SIG compila una serie de métodos, herramientas y datos para realizar procesos y análisis que permitan dar solución a diversas problemáticas. Se define como “un conjunto de elementos de distinta naturaleza cuyo objetivo es llevar a cabo tareas de acopio, almacenamiento, manipulación, análisis, medición, transformación y representación que tiene una referencia espacial o geográfica” (Bocco, 1999 en Flamenco, 2002).

Es importante resaltar la relevancia que el uso de estas tecnologías tiene para el monitoreo de la ecosfera y más específicamente los planes de manejo de los recursos naturales, aspecto que pondría en duda que la naturaleza sea vista exclusivamente como un recurso, pues el conocimiento espacio-temporal permitirá tomar las decisiones adecuadas para su gestión.

Como ya hemos revisado, la PR y los SIG son herramientas técnicas que contemplan un conjunto de procedimientos orientados en principio a observar y monitorear la superficie objeto de estudio y, en segundo lugar, a almacenar y analizar los resultados obtenidos de ellas. Los SIG se han convertido en una poderosa herramienta para la toma de decisiones; para el caso particular de esta investigación sus aportaciones están dadas en materia de la cartografía de CUSCV y la confiabilidad de la misma, que es evaluada a través del uso de estos sistemas. En los siguientes apartados se profundizará al respecto.

## **1.2 Cartografía temática**

La cartografía temática forma parte de lo que se denomina representación cartográfica y en términos muy generales permite la elaboración de mapas de temas específicos en los que se ven representadas relaciones espaciales de uno o varios fenómenos.

Se ha consolidado como una herramienta básica de la geografía, debido a la creciente necesidad que el ser humano ha tenido por obtener información de su entorno; esto ha obligado al desarrollo de mayores y diversas formas de representar la riqueza contenida en el globo terrestre.

Con este nivel básico de cartografía, se genera y espacializa cierta información del territorio en todos sus aspectos, particularmente para esta investigación es de interés la cartografía temática

de CUSCV. Ésta, es un insumo para el monitoreo de la biosfera y sus recursos, los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo ocurridos son de especial interés, siendo la deforestación uno de los mayores y más preocupantes cambios.

La denominada cartografía de cambio es resultado de un análisis espacio-temporal, se parte de una revisión detallada de las características físicas, en este caso cobertura vegetal y en un cierto periodo de tiempo esta misma área de estudio es sometida a un análisis en el que se evalúan los cambios que ha sufrido, los productos cartográficos resultantes de este análisis son la herramienta principal para describir la dinámica por el que ha atravesado un lugar, pues describen gráficamente un proceso.

Retomando algunos de los aspectos revisados en el apartado anterior, existen numerosas técnicas en la generación de cartografía, esto también incluyendo una diversidad de herramientas (en términos de sensores). Es por ello que la cartografía generada mediante sensores remotos destaca entre sus principales ventajas:

- i. Proporcionar de manera rápida y actualizada información referente a la situación de la biosfera y sus recursos.
- ii. Generar un diagnóstico/inventario de la temática analizada.
- iii. Categorizar la imagen en clases que permitan identificar particularidades de ciertas zonas.
- iv. Identificar cambios espacio-temporales.

Estas características hacen de la percepción remota un instrumento muy recurrido actualmente para generar un diagnóstico y en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, es importante destacar que la utilización efectiva de los datos provenientes de percepción remota depende de la habilidad del usuario para interpretar, correcta y consistentemente, las fotografías, imágenes, gráficos o estadísticas que se derivan de las fuentes de percepción remota, esto implica no sólo el manejo adecuado de la información y datos procesados sino también la capacidad para interpretarlos y utilizarlos. (OEA, 1993)

### **1.3 Confiabilidad cartográfica**

En el apartado anterior, se abordó la importancia de la cartografía temática, así como los insumos que la posibilitan. Es importante hablar también de las fuentes de errores inherentes a la cartografía y que pueden desvirtuar los resultados obtenidos durante la elaboración de la cartografía, es en este contexto que surge el concepto de *confiabilidad cartográfica*.

Para contextualizar el surgimiento de la confiabilidad cartográfica es necesario revisar brevemente la historia de la cartografía, surgida a partir de la observación y con técnicas de representación poco sofisticadas, con el desarrollo e incorporación de herramientas como la fotografía aérea, también hubo una mejora en calidad de los mapas producidos y esta tendencia se ha mantenido hasta la actualidad.

Esta corriente de la cartografía ha cobrado relevancia a nivel mundial y puede atribuirse a dos factores; por una parte, la posibilidad de acceder a insumos de mejor calidad y por otra la necesidad de utilizar productos adecuados para una mejor toma de decisiones. Sin embargo, en México esta línea de investigación es relativamente joven y existen pocas investigaciones al respecto.

La confiabilidad cartográfica, tiene como propósito saber qué tan fiable es un mapa, teniendo en cuenta la influencia que los insumos y la metodología empleada pueden tener en su elaboración. El principio de la evaluación de confiabilidad se basa en la comparativa entre el mapa evaluado y un producto; este puede tratarse de un mapa, imagen satelital, fotografía aérea, entre otros. Este *material de verificación* sirve como referencia al ofrecer información confiable, idealmente con mayor resolución espacial que el mapa evaluado y con la misma temporalidad de este. Esta comparativa permite además de calcular la confiabilidad, saber la proporción de confusiones encontradas en el mapa. (Mas & Couturier, 2011)

La evaluación de la fiabilidad temática consiste en comparar la información del mapa con información de referencia considerada muy confiable. Generalmente se basa en un muestreo de sitios de verificación, cuya clasificación se obtiene a partir de observaciones de campo o del análisis de imágenes más detalladas (con mejor resolución), que aquellas utilizadas para generar el mapa. Por ejemplo, se utilizan fotografías aéreas para verificar mapas generados a partir de imágenes de satélite de alta resolución como Landsat o SPOT (Peralta-Higuera *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2001; Vogelmann *et al.*, 2001 en Mas, Reyes y Pérez, 2003).

Por un largo tiempo fue aceptada la idea de que los mapas temáticos eran confiables y no se cuestionaba la calidad de su información. Sin embargo, más tarde el razonamiento obligó a considerar que toda base de datos geográfica está expuesta a cierto grado de error que pueden surgir desde la concepción, medición, representación y análisis del fenómeno y dependen en principio de la calidad de los insumos y la metodología empleada. (Mas, Reyes y Pérez, 2003).

En este sentido, de acuerdo con Janssen y Vander Wel, (1994), Chuvieco, (1995) se identifican dos tipos de error a los que están expuestos los mapas y/o las imágenes clasificadas: 1) errores de atributo o etiqueta y 2) errores geométricos en la delimitación de los polígonos o la ubicación de los píxeles. (Janssen et al. 1994)

Más tarde, Aspinall y Pearson (1995) consideran la existencia de un tercer tipo de error potencial, que se atribuye a la heterogeneidad dentro de un polígono.

La confiabilidad cartográfica se obtiene a partir de cálculos estadísticos y esencialmente tiene como principal objetivo otorgar validez estadística al mapa generado, en dos ámbitos, tanto al productor como al usuario. Estos cálculos, se traducen en dos índices de confiabilidad: (Couturier y Mas, 2009)

1. Índice de Confiabilidad Global (ICG), que refiere al porcentaje del área total del mapa donde se representa una información correcta.
2. Índice de Confiabilidad por Clase (ICC) es el porcentaje de aciertos en la porción del mapa evaluado o de información correctamente representada en el mapa evaluado donde se encuentra representada una clase.

El rigor estadístico necesario para la evaluación del mapa se garantiza a través de un diseño de muestreo probabilístico, asociado a toda el área del mapa (Stehman, 2001), pues esto asegura la representatividad de la muestra en el mapa.

De acuerdo con Stehman y Czaplewski (1998), el proceso de evaluación de confiabilidad consta de tres etapas:

1. Diseño muestral, consistente en la selección de unidades de muestreo (sitios de verificación)
2. Evaluación del sitio de verificación, para obtener la clase que corresponde a cada unidad de muestreo (determinación de la categoría correspondiente a los sitios con base en la observación de campo o interpretación de fotografías aéreas)
3. Análisis de datos, traducido en la construcción de una matriz de confusión y la estimación de los índices de confiabilidad.

Los principales productos cartográficos sometidos a evaluaciones de confiabilidad son los mapas de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal (USCV) debido a que los mapas son una de las principales herramientas para identificar procesos y con ello hacer más eficiente y certera la toma de decisiones aunado al interés que existe por monitorear y medir la pérdida de coberturas vegetales, que en las últimas décadas se ha incrementado.

Lamentablemente no existe una estimación exacta ni actualizada de la tasa de deforestación en México, pero de acuerdo con el informe más reciente de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) se estima que la tasa de deforestación a nivel nacional

podría ser de hasta 1.98 millones de hectáreas por año y con ello el país se sitúa en los primeros lugares en tasas de deforestación del mundo. (Torres, 2004)

Teniendo en consideración la relevancia del tema y la poca disponibilidad de información al respecto, es que esta investigación destaca la necesidad de estimar la confiabilidad de la cartografía de Uso de Suelo y vegetación para una de las áreas de mayor importancia ecosistémica del país y que pese a su condición de reserva se enfrenta a una importante problemática derivada del cambio de uso de suelo.

### **1.3.1 Lógica difusa**

La lógica difusa es uno de los métodos que se han incorporado recientemente a la cartografía de uso de suelo y vegetación, empleándose tanto para la interpretación como para la validación del mapa y surge como una alternativa a la lógica clásica que se deriva de la teoría de conjuntos difusos; este método surge en el contexto de entender la complejidad que existe para determinar dónde termina cierto tipo de vegetación y comienza otro, lo que implicaría una estimación errónea, por lo que su contribución se orienta a la funcionalidad para establecer límites en estas zonas de transición. (Figura 1.2)

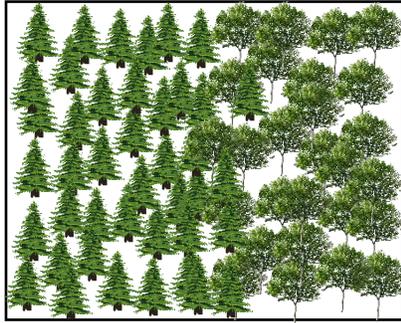
Se considera que un elemento puede tomar valores de pertenencia en un rango de 0 a 1 para identificar el grado de pertenencia difusa.

Los pioneros en darle una aplicación a la evaluación de mapas de cobertura terrestre fueron Gopal y Woodcock (1994), quienes categorizaron con expresiones de tipo cualitativo (escala lingüística) la exactitud de un mapa. Esta escala se compone de cinco categorías:

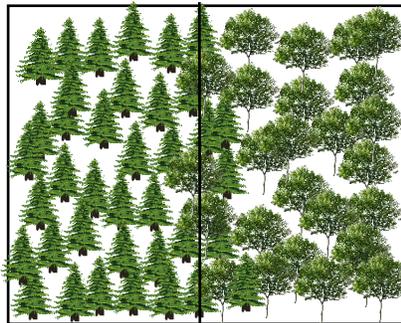
- i. Absolutamente equivocado: etiqueta inaceptable/muy mala;
- ii. Comprensible pero equivocado: no es una etiqueta correcta para describir el sitio, hay una mejor opción;
- iii. Razonable o respuesta aceptable: no es la mejor etiqueta, pero puede aceptarse, es correcta;
- iv. Buena respuesta: etiqueta que corresponde al mapa, muy correcta;
- v. Absolutamente correcto: sin duda sobre la etiqueta, acertada

Esta escala se transforma a números enteros que van del 1 al 5 y con ellos se califica la etiqueta del sitio de verificación, estos valores serán posteriormente analizados en una o varias matrices de confusión.

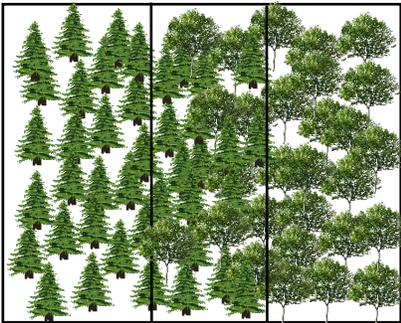
FIGURA 1.2 CATEGORIZACIÓN DE LA LÓGICA EMPLEADA EN BOSQUE DE PINO Y ENCINO



1. Realidad



2. Lógica booleana



3. Lógica difusa

Fuente: elaboración propia

#### 1.4 Cobertura Vegetal y Cambio en el Uso de Suelo

En este apartado se desarrolla brevemente una de las transformaciones antrópicas de mayor impacto a nivel mundial, el cambio de uso de suelo y la cobertura vegetal, uno de los factores identificados en el fenómeno del cambio climático.

La cobertura vegetal se define como una expresión fisionómica y estructural de la comunidad vegetal de un lugar determinado como respuesta a las condiciones ambientales, la interacción de factores químicos, biológicos, físicos, así como a la intervención humana. Es producto de

procesos ecológicos y evolutivos que tienen un arreglo espacial en el plano vertical y horizontal (Durán & Méndez 2010), es por ello que la cobertura vegetal se asume como una expresión espacio-temporal. Por estas características se reconoce como un componente natural que cumple funciones de regulación climática y faunística, además de ser el medio para la principal forma de abastecimiento y consumo humano.

En tanto que el uso de suelo, es la tipología de aprovechamiento resultante de las actividades productivas que se realizan sobre la cobertura; comprende toda la variedad de formas de utilización, naturales o humanas.

El acelerado proceso de urbanización a nivel mundial, el crecimiento demográfico y el desarrollo tecnológico son algunos de los principales fenómenos que han incentivado el cambio de uso de suelo a nivel mundial, la expansión de las ciudades demanda cotidianamente una mayor cantidad de productos para su abastecimiento.

De acuerdo con el Informe de la FAO sobre el Estado Mundial del Recurso Suelo, entre 1961 y 2000 la producción alimentaria aumentó en un 146%, la tierra cultivable creció en un 8% como resultado del crecimiento poblacional y han estimado que en 2050 la producción deberá incrementarse entre 40 y 70% para lograr satisfacer los requerimientos alimenticios de la población. Este escenario de crecimiento advierte una conversión en el uso de suelo y la cobertura vegetal a nivel mundial.

El objeto de estudio de esta investigación es el Cambio de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal (CUSCV); para ello se retoma la definición propuesta por Lambin (2006), quien define a la *cobertura vegetal* como el medio que posibilita un gran número de procesos biofísicos y está conformada por el relieve, los cuerpos de agua, el suelo, los recursos bióticos y las estructuras humanas, mientras que, en el caso de *uso de suelo*, se entiende como las actividades que los seres humanos desarrollan sobre la cobertura terrestre y se pueden clasificar como agrícola, pecuario, forestal, urbano, entre otros.

En el caso de la cobertura vegetal es importante señalar que el cambio de ésta existe en la medida que se reemplaza por otro tipo de cobertura y está estrechamente relacionado con los cambios al uso del suelo, por ejemplo, áreas forestales que son taladas para ser convertidas en pastizales y, con ello, proveer de alimento a la ganadería. Sin embargo, existen algunas excepciones que dificultan la identificación de un cambio en el uso del suelo, por ejemplo al tratarse de una tala selectiva o el desmonte en pequeñas áreas, en ocasiones estos cambios pasan desapercibidos o difícilmente son detectados en las técnicas convencionales.

En este sentido, es que la intervención humana se ha convertido en el primer agente de Cambio del Uso de Suelo y Cobertura Vegetal (CUSCV), pues desde la presencia de las primeras civilizaciones han tenido lugar las modificaciones a la cobertura vegetal. Se afirma que en los últimos tres siglos el uso de suelo ha cambiado de forma drástica a nivel mundial. Actualmente es uno de los temas que acaparan mayor interés en las disciplinas ambientales y en las últimas décadas se ha incluido como uno de los factores primordiales del cambio climático global, debido a su involucramiento en los ciclos biogeoquímicos como el agua o el carbono, además de ser este uno de los principales factores involucrados en la pérdida de la biodiversidad en el mundo. Es por esto que también se han incrementado progresivamente los estudios asociados al CUSCV pues de ella se derivan tendencias espacio-temporales de procesos como la deforestación y degradación ambiental, provocadas por actividades humanas.

Si bien es cierto, que de forma natural existen eventos capaces de modificar la cobertura vegetal, tales como incendios de carácter natural, huracanes e inundaciones, estos no se identifican como los principales desencadenadores de las transformaciones ecosistémicas, Lambin señala que las mayores transformaciones han sido producto de la intervención humana y estas han generado efectos que han impactado en la riqueza cultural y biológica del planeta. (Lambin, 2001).

Además, es importante considerar que cuando esos fenómenos ocurren los mecanismos naturales del ambiente de resiliencia son generalmente capaces de regenerar las estructuras y procesos ecológicos.

A nivel mundial se estima que desde 1992 la pérdida de cobertura vegetal ha sido de un 2.7%, equivalente al doble de la extensión territorial de España (OECD, 2018) y se estima que la pérdida de bosques desde los albores de la humanidad hasta nuestros días ha sido de un tercio de la superficie original aproximadamente y que ésta se cuadruplicó en los últimos dos siglos debido al acelerado crecimiento de la población. (Noble y Dirzo, 1997; Cincotta, Winsnewiski, y Engelman, 2000).

El cambio en el uso de suelo influye directamente en el deterioro del hábitat y la desaparición de cientos de especies, así como en la reducción de coberturas forestales, en la pérdida de suelos fértiles y en un incremento en los procesos erosivos del suelo (desertificación), además de guardar una estrecha relación con el cambio climático global, a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (Dióxido de carbono, Óxido nitroso y Metano) (Galicia, García, Gómez & Ramírez, 2007).

### **1.5 El escenario de CUSCV de México**

México es considerado como un país megadiverso, al ser una de las naciones poseedoras de mayor variedad de plantas y animales del planeta, casi el 70% de la diversidad mundial de especies, el endemismo y la diversidad de especies son las características que le otorgan el título de megadiverso y por ello se posiciona en el quinto lugar en el ranking de los 12 países megadiversos (CONABIO, 2020).

Son múltiples los factores que contribuyen a la riqueza natural del país, algunos de los principales son, 1) su extensión territorial, 2) su posición geográfica, en la región del trópico de Cáncer entre los 32° y los 14° N 3) su complejidad orográfica 4) su historia evolutiva a nivel geológico 5) variedad climática resultante del relieve y sus colindancias al mar.

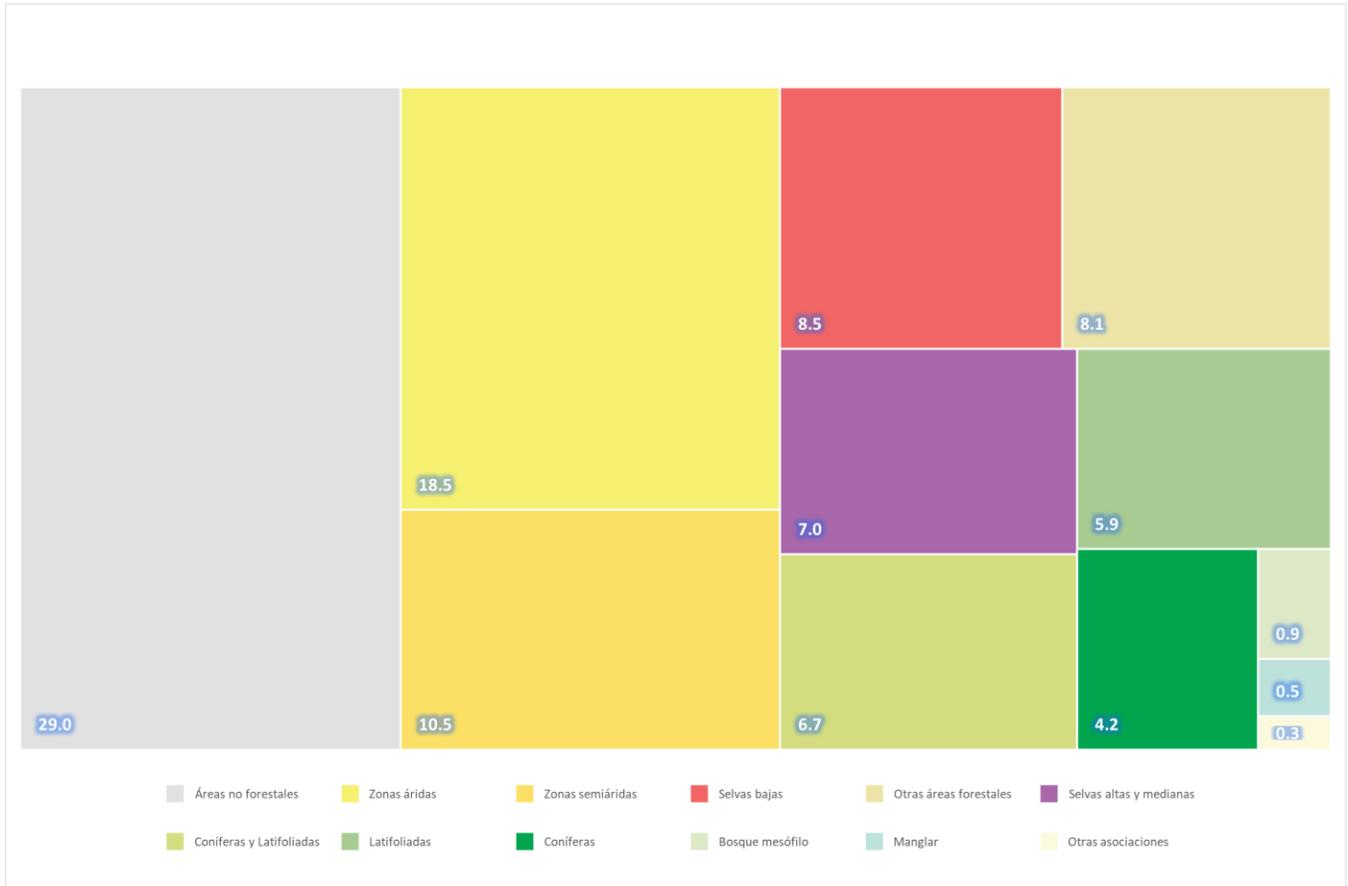
Sin embargo, el contexto mexicano ante el CUSCV es muy similar a las transformaciones que han ocurrido en la mayoría de los países subtropicales del mundo. El acelerado proceso de urbanización surgido en la década de los setenta trajo consigo un importante crecimiento poblacional y, con ello, un incremento en las tasas de consumo en todos los aspectos que se manifestaron en cambios en la cobertura vegetal, particularmente en la franja subtropical del planeta (Song, Woodcock, Seto, Pax & Macomber, 2018).

Como ya se mencionó en el apartado anterior, entre los agentes de CUSCV más importantes, se encuentra la conversión de tierras para la producción intensiva de forrajes y actividad agrícola, así como el acelerado proceso de urbanización que en el caso mexicano fue resultante del cambio al modelo de sustitución de importaciones en década de los setenta (Garza, 2003), ambas de origen antrópico.

En el ámbito forestal, que es el de interés para esta investigación, de acuerdo con CONAFOR, 2019, México contaba con un área forestal de 137.8 millones de hectáreas cuadradas, que equivale al 70% de la superficie nacional, distribuidas como se aprecia en la figura 1.3, lo que lo posiciona en el lugar 11 de los países con mayor área forestal a nivel mundial (CONAFOR, 2013). Asimismo, en la figura 1.4 se encuentra representado en el mapa la distribución de la vegetación en México.

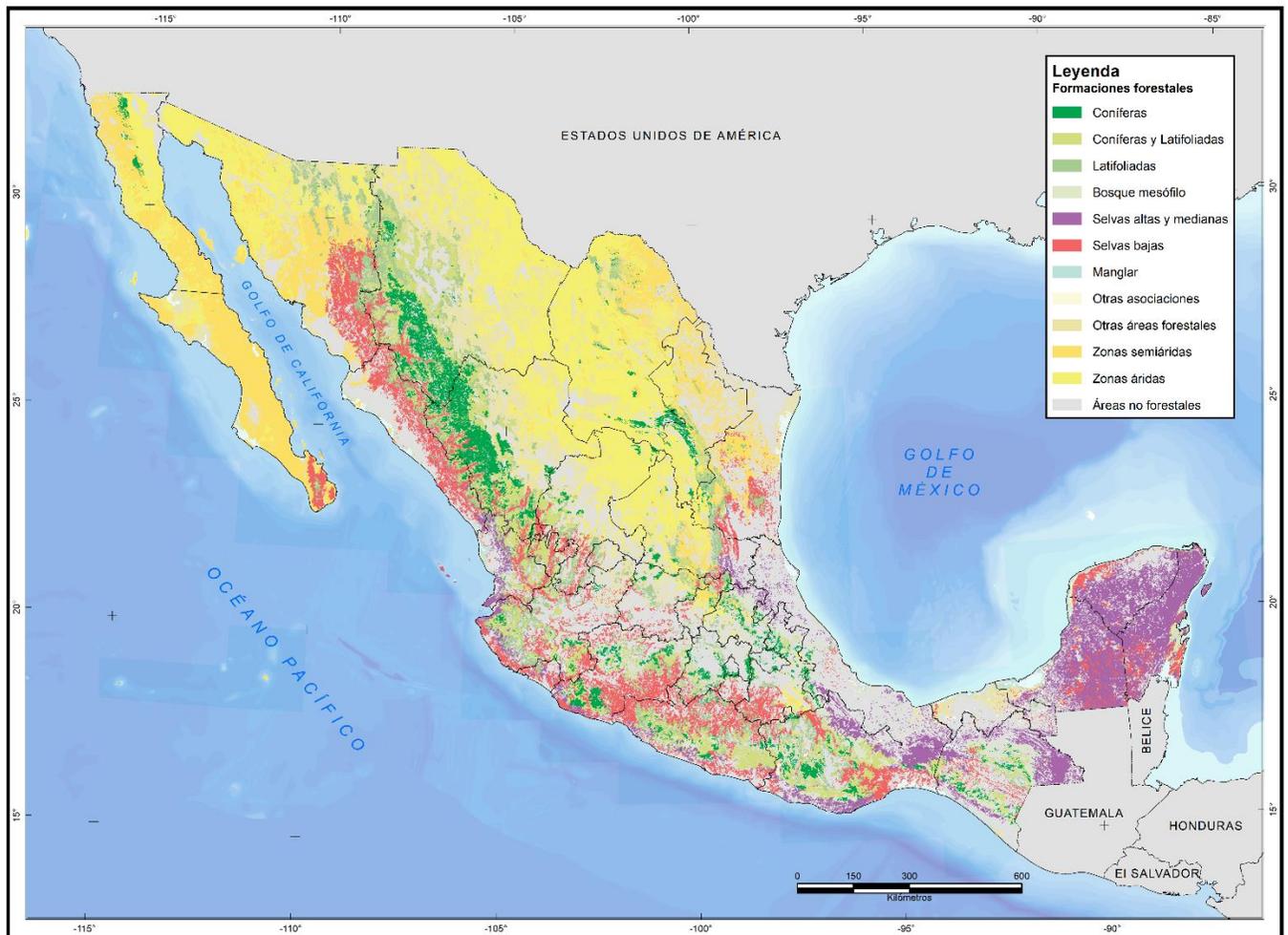
No obstante, la media mundial estima que la cubierta arbolada debería ser de 0.7 ha per cápita y actualmente se calcula que la media para México está por debajo con un 0.5 ha y se ha estimado que para 2025 esta será de 0.3 ha, lo que posicionaría al país muy por debajo de la media mundial (Velázquez, 2002). En el periodo de 2010-2015 México registró una pérdida neta anual del área de sus bosques de 89 mil hectáreas a una tasa de 0.13% (CONAFOR, 2017).

**FIGURA 1.3 PROPORCIÓN DE LAS FORMACIONES FORESTALES EN MÉXICO**



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, serie VI, 2017

**FIGURA 1.4 DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN MÉXICO**



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, serie VI, 2017.

La FAO define a la deforestación como la conversión de los bosques en otro tipo de uso de la tierra o la reducción permanente de la cubierta de dosel, por debajo del umbral mínimo de 10 por ciento, es decir la deforestación implica una pérdida permanente de la cobertura esto contempla la conversión del bosque a suelo agrícola, pastizal, embalses y áreas urbanas (FAO-FRA, 2015).

La deforestación y otros cambios de uso son las principales causas de pérdida de las coberturas vegetales (degradación ambiental) en todas las escalas. Diversos estudios sostienen que en México la tasa de deforestación oscila entre 1 y 10.4% anual variable (Cuadro 1.2), dependiendo la región del país, aunque de forma oficial se presentan con cierta periodicidad instrumentos de gestión como es el Plan Nacional Forestal o el Inventario Nacional Forestal y proporcionan datos oficiales es importante señalar que existen vacíos que van desde la disponibilidad de la información oficial actualizada hasta la precisión en la medición de fenómenos como la

deforestación, al realizar una revisión de las fuentes de información y compararlos con los datos obtenidos por organismos nacionales como la CONAFOR y los internacionales obtenidos por organismos como la FAO se tiene que las cifras de la superficie forestal y la deforestación no coinciden<sup>2</sup>. Aquí se presentan las cifras oficiales presentadas por las instituciones mexicanas.

**CUADRO 1.1 SUPERFICIE DEFORESTADA Y TASA DE DEFORESTACIÓN ENTRE 1990-2020**

Indicador	1990-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015
<b>Deforestación (pérdida de superficie anual promedio en miles de ha)</b>	354	235	155	92
<b>Tasa de deforestación anual promedio (%)</b>	0.52	0.35	0.24	0.13

Fuente: CONAFOR, 2020. *El sector forestal mexicano en cifras*.

Velázquez (2008) presenta un recuento de las tasas de deforestación reportadas para México, de fuentes oficiales y académicas en el periodo de 1988 a 2010 (cuadro 1.6), de lo cual el autor destaca dos puntos importantes; 1) En las últimas tres décadas la pérdida estimada de cubierta forestal para México, fue de 587 mil ha y 2) Sólo dos contribuciones incluyen datos originales y cartografía. Resalta también el valor de la fase de validación en campo que permite obtener información más certera.

**CUADRO 1.2 FUENTES QUE DOCUMENTAN LA TASA DE DEFORESTACIÓN A NIVEL NACIONAL**

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)	1,500
Grainger (1984)	1,600

<sup>2</sup> México ocupa uno de los primeros lugares en tasas de deforestación en el mundo. Los rangos de las tasas de deforestación fluctúan entre 75,000 ha/año a cerca de 1.98 millones de hectáreas por año. Las estimaciones oficiales muestran una pérdida de vegetación arbolada en los últimos años de cerca de 1.08 millones de hectáreas por año cifra que se reduce a 775,800 ha/año si solo se consideran bosques y selvas. (FAO, 2010)

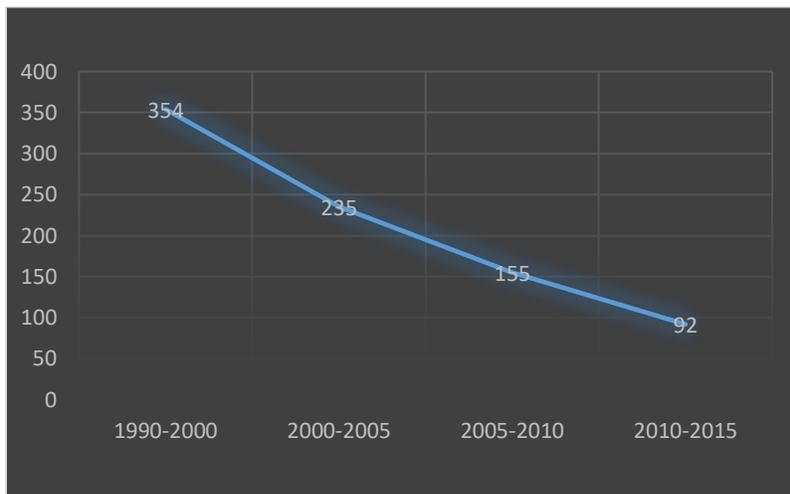
Sánchez et al (2008)	484
Media	839
Desviación Estándar	451
<b>Fuentes oficiales</b>	<b>Tasa (miles ha/año)</b>
Semarnat (2006)	365
SARH (1992)	365
SARH (1994)	370
FAO (1997)	508
FAO (1988)	615
FAO (1985)	678
FAO (Torres R., 2004)	776
Media	492
Desviación Estándar	182

Fuente: Velázquez, 2008

Ante las inconsistencias detectadas tanto de la superficie deforestada como de la superficie forestal y la vegetación encontrada, la FAO señala la importancia de mejorar las fuentes de datos de referencia con intensivo trabajo en campo (FAO, 2004), además de resaltar que muchas de las discrepancias entre las cifras presentadas son atribuidas a las diferencias surgidas de la escala e insumos empleados y como se discutirá en esta investigación a la falta de evaluación de calidad de los datos (Vela, 2016)

De acuerdo con la información presentada por la Comisión Nacional Forestal la deforestación a nivel nacional se ha reducido en desde la década de los 90 a la actualidad, en el periodo de 1990-2000 la pérdida de superficie anual promedio fue de 354 mil hectáreas con una tasa anual promedio de 0.52% los datos disponibles de años posteriores son de periodos de cinco años, de 2000 a 2005 la superficie se redujo a 235 mil hectáreas con una tasa de 0.35, en el periodo de 2005 a 2010 la pérdida fue de 155 mil hectáreas a una tasa promedio de 0.24 y los datos más recientes de 2010-2015 arrojan una superficie de pérdida de 92 mil hectáreas a una tasa promedio anual de 0.13 (Gráfico 1.1)

**GRÁFICO 1.1 DEFORESTACIÓN (PÉRDIDA DE SUPERFICIE ANUAL PROMEDIO EN MILES DE HA)**



Fuente: CONAFOR, 2020. El sector forestal mexicano en cifras 2019.

Sin embargo, es importante tener en cuenta la magnitud del impacto ecológico generado a partir de la pérdida de superficie forestal y claramente una reducción en las tasas de deforestación no puede considerarse como un dato favorable pues sí bien es cierto que en términos generales es bueno hablar de tasas en decrecimiento lo deseable sería que la pérdida registrada fuera nula, dado el impacto que genera en los ecosistemas a través de la destrucción del hábitat de muchas especies y organismos vivos que son condiciones irreversibles. Aunado a que la reforestación no es la vía ideal en términos ecosistémicos, teniendo en cuenta que las funciones y la estructura de los ecosistemas forestales pueden recuperarse de manera natural cuando se detienen estos daños. Sin embargo, en ocasiones la magnitud del daño limita o imposibilita la recuperación.

De acuerdo con Ventura, Plascencia, Hernández, Ángeles, & Aldrete (2017) la restauración ecológica es considerada una herramienta importante para revertir las condiciones de degradación que presentan diversos ecosistemas a nivel mundial, ya que su propósito es recuperar las funciones y estructura del ecosistema.

Semarnat señala que la restauración contempla al conjunto de acciones que se llevan a cabo para recuperar la salud, estructura y función de estos ecosistemas y dependen del grado de degradación en el sitio, éste es el mecanismo idóneo para atender esta problemática. Y puede lograrse a través de dos procesos:

- 1) Regeneración natural: Un bosque bajo buen manejo permite este tipo de restauración, ya que los daños no sobrepasan la capacidad del bosque para regenerarse. Es la opción más eficiente y económica y con menor grado de intervención humana.
- 2) Reforestación: las reforestaciones son una estrategia de restauración muy recurrente, que se pone en práctica, después de que un territorio ha perdido su vegetación original, esto puede deberse a la intervención humana directa a través de la construcción de infraestructuras, crecimiento del área urbana, aprovechamiento de la madera, expansión de la frontera agropecuaria o bien por causas naturales como incendios o fenómenos geológicos e hidrometeorológicos, esta medida se orienta a acelerar su recuperación y es más cara e implica mayor intervención humana. (Semarnat, 2018)

En México generalmente la actividad que se realiza como parte de la evaluación de la reforestación está orientada básicamente a la supervivencia, pero como se ha mencionado desde la perspectiva de la rehabilitación existen otros atributos que deben ser evaluados, como es el proceso de la recuperación de la estructura y funciones de la zona rehabilitada. Ventura, et al. (2017). Y en este sentido, queda mucho por hacer aún, esto va desde el cambio de estrategias generales y el apoyo a través de programas adecuados a las necesidades del ecosistema en deterioro, proponer intervenciones acordes a las especies del lugar, monitorear y garantizar su prevalencia.

### **1.6 El programa REDD+ en el contexto del cambio climático**

Los ecosistemas forestales son de gran importancia para el ambiente, la fauna y la sociedad, desde el punto de vista de la ecología, los bosques ayudan a la regulación del clima y al amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales. De acuerdo con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) los principales beneficios que ofrecen son:

- Mantienen la provisión de agua en calidad y cantidad.
- Generan oxígeno.
- Controlan la erosión, así como la generación, conservación y recuperación del suelo.
- Coadyuvan en la captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes.

- Protegen la biodiversidad, de los ecosistemas y las formas de vida.
- Propician y permiten la polinización de plantas y el control biológico de plagas.
- Son el espacio en donde se lleva a cabo la degradación y el reciclaje de desechos orgánicos.
- Permiten la apreciación del paisaje y la recreación.
- Son fuente importante de materias primas.
- Son reservorio genético de la vida y proporcionan infinidad de sustancias de gran utilidad a la humanidad para el combate de las enfermedades.

Sus aportaciones inciden en las esferas económicas, sociales y ambientales, del país y como parte de los sistemas naturales del mundo (Profepa, 2020).

Estas características son el argumento por el cual a nivel mundial existe un creciente interés por la protección y conservación, de los ecosistemas y sus recursos forestales. La FAO en su reporte *El estado de los bosques en el mundo 2018*, señaló que la deforestación es la segunda causa más importante del cambio climático sólo después de la emisión de contaminantes por la quema de combustibles fósiles y representa casi el 20% de todas las emisiones de GEI.

En el marco del cambio climático se analizó la relevancia del CUSCV, particularmente haciendo una revisión de la relación que guardan los bosques tropicales con los volúmenes de captura de dióxido de carbono: la cobertura vegetal son la cuarta fuente emisora de gases de efecto invernadero en el ámbito nacional (GEI)<sup>3</sup>.

El crecimiento de la deforestación a nivel mundial impulsó iniciativas a nivel nacional e internacional. En 2007 en el marco de la 13<sup>o</sup> Conferencia de las Partes (COP)<sup>4</sup> surgida en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Grupo

---

<sup>3</sup> A nivel mundial de acuerdo con el IPCC (2007) las tres principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero son: el sector energético con (25.9%), industrial (19.4%) y forestal (16.4%)

<sup>4</sup> En la Cumbre de la Tierra realizada en 1992 en Río de Janeiro, Brasil se presentó por primera vez la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) orientada a promover y lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI).

Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático dio a conocer el impacto de la deforestación, la degradación y los cambios de uso de suelo, afirmando que el 17% de las emisiones de gases de efecto invernadero provienen de estas.

Como resultado del interés en sumar esfuerzos globales se propuso un plan con visión de largo plazo para lograr la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques (REDD).

El Programa ONU-REDD se lanzó en 2008, se diseñó con los conocimientos técnicos y organización de la FAO, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y ONU medio ambiente, el programa promueve la participación consciente de los pueblos, indígenas y aquellas comunidades que dependen de los bosques (FAO,2010)

En 2009 como resultado de la reunión COP 15 fue formulada la función de conservación y el servicio ambiental de reserva de carbono que proveen los bosques, aspecto que se manifestó agregando un signo “+” a la REDD. Es entonces que REDD+ se consolidó como el principal mecanismo creado en torno a una política de mitigación encaminada a reducir los niveles de deforestación y con ello las emisiones de CO<sub>2</sub> en los países en desarrollo .

Los objetivos del programa han requerido de una colaboración sólida entre los países, que se han comprometido a aplicar las estrategias necesarias para reducir las emisiones de carbono.

El Programa ONU-REDD+ ofrece varios mecanismos de entrega que dan flexibilidad para conciliar las necesidades de un país con el apoyo requerido y para complementar las contribuciones con otras iniciativas (FAO, 2010). Es decir, el programa opera de acuerdo a las necesidades de cada país y está diseñado para ser un instrumento de apoyo al sector forestal.

El programa REDD+ consta de tres fases:

1. Fase 1; desarrollo de estrategias o planes de acción, políticas y medidas a nivel nacional, así como desarrollo de capacidades
2. Fase 2: Implementación de políticas y medidas a nivel nacional, así como estrategias o planes de acción que podrían implicar una continuación en el desarrollo de capacidades, el intercambio y desarrollo de tecnología, así como actividades de demostración basadas en resultados y
3. Fase 3: acciones basadas en resultados que deberán medirse, notificarse y verificarse de forma exhaustiva. (FAO, 2010)

En la actualidad el programa cuenta con más de 30 países asociados entre ellos México, quien, en 2015 en el contexto de la Cumbre del Clima de Paris, se comprometió a cumplir con los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible y firmó el acuerdo de País adoptado en la COP21 comprometiéndose a reducir la emisión de GEI y contaminantes de vida corta, estableciendo como meta el reducir a 22% las emisiones en 2020 y alcanzar una tasa neta de deforestación cero. (CONAFOR, 2017)

La participación en el Programa REDD+ ha impulsado el desarrollo de un conjunto de líneas estratégicas que promuevan simultáneamente acciones de mitigación y adaptación, donde puedan converger la agenda ambiental y de desarrollo. (CONAFOR, 2017). Un requisito para formar parte de este mecanismo es contar con una estrategia y en México ésta se diseñó en 2010 y se le denominó ENAREDD+, a través de ella se busca reorientar políticas y disminuir incentivos que promueven la deforestación y degradación, incrementando por otra parte los estímulos para la conservación el manejo, restauración y uso sustentable de los recursos forestales. (CONAFOR, 2017)

Los criterios de participación establecidos son los siguientes:

1. Contar con una estrategia a implementar a nivel nacional que sirva como guía para la aplicación del programa;
2. Presentar niveles nacionales de referencia para emisiones forestales o niveles nacionales de referencia forestal. El llamado estatus actual del balance de emisiones;
3. Disponer de sistemas nacionales de Monitoreo, Reporte y Verificación (sistema MRV), encargado de reportar a la CMUCC las emisiones y absorciones de carbono realizadas por bosques;
4. Contar con un sistema para informar sobre el cumplimiento de las estrategias planteadas a nivel nacional, que considere la inclusión y respeto a las comunidades locales y pueblos indígenas, así como la conservación de sus ecosistemas, biodiversidad y los servicios que proveen (CONAFOR, 2013)

Estas características son necesarias para que la instrumentación e implementación del programa no se dé de forma aislada, sino que se articule a políticas, programas, medidas y acciones de los sectores gubernamentales que inciden sobre los bosques y selvas.

Ante la presión que por décadas se ha ejercido sobre los ecosistemas forestales, con esta estrategia de colaboración se ha pensado en reducir, revertir y frenar la pérdida de cobertura forestal en México.

Aunque, como menciona Velázquez (2002), existen múltiples enfoques para el análisis de CUSCV, muchas veces se presentan discrepancias surgidas desde la incapacidad de identificar diferencias entre los conceptos, lo que dificulta la comparación de resultados en términos espacio-temporales, así como la falta de mecanismos de evaluación para la calidad de las bases de datos y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Las limitaciones son numerosas y aún no ha logrado consolidarse una línea de investigación en México o una red encargada de coordinar proyectos de esta índole, esto ha generado avances en dos líneas de trabajo: 1) evaluar la confiabilidad cartográfica (partiendo desde las bases de información hasta la representación) 2) establecer parámetros para generar bases de datos compatibles y que éstas sean el principal insumo para obtener estimaciones que describan los principales cambios que afectan la cobertura vegetal.

### **1.7 Producción de cartografía de uso de suelo y vegetación de México**

En el ámbito de los recursos forestales del país existen dos principales fuentes de información y producción cartográfica, INEGI con la elaboración de las Series de Uso de Suelo y Vegetación y CONAFOR con los Inventarios Forestales, nacional y estatal, a continuación, detallaremos las características y antecedentes de cada uno.

El primer inventario de recursos naturales se realizó el 1° de octubre de 1968, dirigido por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP). Los resultados fueron fundamentales para la elaboración de la serie de la carta 1:50 000 y que fuera pionera en el tema, años más tarde con la transformación de la CETENAP a la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL)<sup>5</sup>, se continuó la producción cartográfica y temática, poniendo énfasis en el material especializado en recursos naturales, como fue la carta de uso potencial de agricultura y la de uso potencial forestal elaboradas a escala 1:250 000. INEGI, ha sido siempre el organismo encargado de proveer la información estadística y geográfica de los recursos naturales de México.

Los mapas sobre cobertura vegetal y uso de suelo cuyo principal objetivo es mostrar la distribución y estado de la vegetación natural, áreas agrícolas y urbanas en México, han sido generados por INEGI desde 1978, hasta la fecha se cuentan con seis series. Las series de uso de suelo y vegetación permiten seguir la cobertura variable de 12 ecosistemas vegetales, 58

---

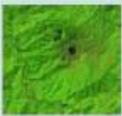
<sup>5</sup> Posteriormente la CETENAL cambiaría su nombre a la Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y posteriormente a la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DIGETENAL), manteniendo pese a estos cambios la producción cartográfica de cartas temáticas y topográficas de todo el país. En 1983 con la creación del Instituto Nacional de Estadística y geografía fue absorbida la DIGETENAL.

tipos de vegetación e información sobre su estado sucesional, dando cerca de 200 diferentes categorías.

De acuerdo con INEGI (2017) se detallan a continuación las características de las series existentes.

- 1) La serie I (1985) elaborada a una escala 1: 250 000 con base en la interpretación de fotografías aéreas tomadas entre 1968 y 1986 y en el trabajo de campo de 10, 000 sitios de verificación, con una clasificación de más de 300 clases.
- 2) La serie II (1993) comprende una actualización de la Serie I, realizada a partir de la interpretación de espacio-mapas escala 1:250 000 derivados de composiciones a color de imágenes LANDSAT TM del año 1993 y contó con un sistema de clasificación más detallado que la serie anterior.
- 3) La serie III (2002) es una actualización de las series anteriores, realizada con imágenes satelitales LANDSAT ETM 2002 y 2003 que contó con una verificación en campo y donde se generó un sistema clasificatorio mucho más detallado tomando en consideración las necesidades de los usuarios.
- 4) La serie IV (2007) es una actualización de la serie III con la aplicación de métodos más sofisticados con base en imágenes SPOT V multiespectrales y ortorectificadas de 2007, la información vectorial recabada de las series I, II y III, así como la implementación de modelos digitales de elevación, además de la verificación en campo. En esta serie se mantuvo la clasificación generada para la Serie III.
- 5) La serie V (2011) escala 1: 250 000 está basada en una actualización de la serie IV: fueron empleadas imágenes multiespectrales LANDSAT para el año 2011 con el archivo vectorial de la serie IV y los modelos digitales de elevación. En esta serie fueron detectadas áreas con cambios y adecuaciones con base en la serie de vegetación anterior, esta serie fue verificada y rectificada con información obtenida en campo.
- 6) La serie VI (2014) escala 1: 250 000 es un conjunto de datos geospaciales con cobertura nacional. Se generó tomando como base los datos del mismo tema (serie V) actualizados a partir de la interpretación de imágenes de satélite Landsat del año 2014, recorridos y observaciones de campo. La serie VI registra un 48.5% de superficie del país cubierta con vegetación primaria lo que muestra una mínima variación entre las series IV y V. (Figura 1.2)

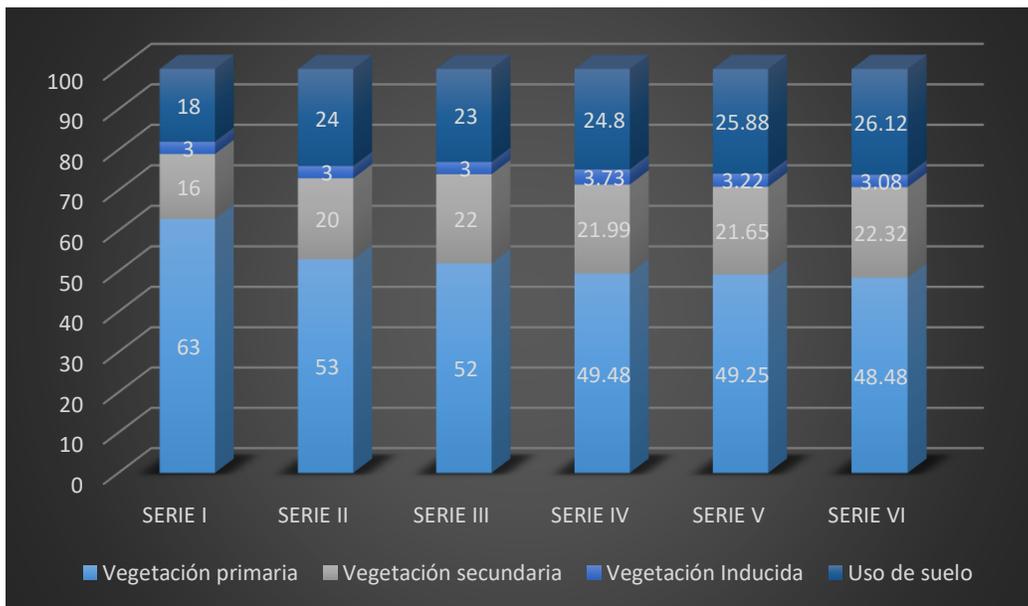
**FIGURA 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS CARTAS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN, SERIE I A VI**

	SERIE I	SERIE II	SERIE III	SERIE IV	SERIE V	SERIE VI
Período de Elaboración	1978-1991	1995-2000	2002-2005	2007-2010	2011-2014	2015-2017
Fecha de datos de campo	1978-1990	1996 - 1999	2002-2003	2007-2008	2012-2013	2015
Año de referencia de la información	1985	1993	2002	2007	2011	2014
Escala	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250 000
Imágenes						
Datos	Fotografías Aéreas	Espacio mapas Impresos	LANDSAT TM (30m)	SPOT 5 (10m)	LANDSAT 5 TM (30m)	LANDSAT 8 (30m)
Metodología	Producto Mapa Analógico	Producto Mapa Analógico	Información digital	Información digital	Información digital	Información digital
Información	Analógica	5 capas	14 capas	13 capas	13 capas	15 capas

Fuente: INEGI, 2017 Información de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250 000

El análisis de la información histórica de las seis series revela el comportamiento de la proporción de superficie de acuerdo a cada tipo de vegetación, la mayor variación corresponde a la vegetación primaria que paso de 63% en la serie I a 48.48% en la serie VI, el mayor cambio se registró entre el periodo de 1985 y 1993 con una reducción del 10% de la vegetación primaria, a partir de entonces y hasta la serie VI la pérdida registrada es del orden de 1% o menos entre cada serie. El segundo gran cambio es el de la vegetación secundaria que aumentó de 16% en 1985 a 20.32% en 2014, el siguiente cambio registrado es el uso de suelo que incremento de 18% a 26.12%, siendo el mayor incremento el registrado entre 1985 y 1983 y que mantiene un incremento sostenido del orden del 1-2% de 1993 a 2014 y el que registra una variación incipiente es la vegetación inducida que desde 1985 a 2002 se mantuvo y en las series posteriores tuvo una variación de menos del 1%. (gráfico 1.4)

**GRÁFICO 1.2 PROPORCIÓN DE SUPERFICIE DE VEGETACIÓN PRIMARIA, SECUNDARIA, INDUCIDA Y USO DE SUELO**



Fuente: INEGI, 2017

Entre los principales problemas que se tiene en el ámbito de los estudios de cambio de uso del suelo y vegetación destacan los derivados de los insumos cartográficos y su calidad, en este sentido, dos elementos son relevantes; la metodología empleada para su elaboración y la necesidad de incorporar métodos que permitan validar su confiabilidad (Mas y Couturier, 2011)

### **Inventarios Forestales y de Suelo**

La Comisión Nacional Forestal es el organismo encargado de integrar, monitorear y actualizar la información de los recursos forestales y de suelo en México. Los inventarios forestales son indispensables para el diseño de programas de aprovechamiento forestal, creación de infraestructura y en la elaboración de mapas de riesgo, además de la planificación de restauración y protección forestal con la identificación de áreas críticas o de especial importancia, análisis de cambios en la vegetación forestal, manejo sustentable de los recursos forestales, así como para su protección, conservación y restauración (SEMARNAT, 2018).

Los inventarios forestales se realizan a nivel nacional y estatal, México dispone de un INFyS escala 1:250, 000 que es actualizado cada 5 años.

## ***Inventario Nacional Forestal y de Suelo***

La relevancia de los inventarios forestales es reconocida y legitimada a través del acuerdo por el que se determina que el INFyS es de interés nacional, en este además de obligar a la participación de todas las entidades y de poner a disposición de los usuarios los resultados del mismo (DOF, 28 de mayo de 2014)

Este instrumento de política forestal ofrece información integral, actualizada y periódica sobre la ubicación, cantidad, características, dinámica y calidad de los recursos forestales y asociados a estos. El objetivo es realizar el monitoreo y caracterización de los recursos forestales, periódicamente (cada 5 años por lo menos) así como proporcionar información basada en datos de campo, que se registran mediante un muestreo sistemático abarcando todos los ecosistemas presentes en el país, en un total 26,220 conglomerados o unidades de muestreo distribuidos en estratos de acuerdo a la vegetación. La información que se encuentra es la siguiente:

- Superficie y localización
- Terrenos forestales temporales
- Tipos de vegetación forestal y suelos
- Dinámica de cambio
- Criterios e indicadores
- Infraestructura forestal
- Sistema de medición, reporte y verificación

Hasta la fecha han sido realizados seis inventarios, 1961-1985, 1991, 1994, 2000, 2004 y 2009, siendo tres sus principales fuentes de información:

- a) Información de sensores remotos: Imágenes de satélite (AVHRR; MODIS; LANDSAT; SPOT)
- b) Información cartográfica y documental: Tablas de volúmenes para las diferentes especies y zonas del país y cartas temáticas escala 1:50 000 y 1:250 000
- c) Información de campo: sobre densidades, especies, diámetros, estaturas, etc. (SEMARNAT, 2004)

## ***Inventario Estatal***

Los Inventarios Estatales Forestales y de Suelos (IEFyS), se encuentran alineados a los principios, criterios y lineamientos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). (SNIGF, s/f)

La información que integran los inventarios estatales es la superficie por tipo de vegetación forestal a nivel municipal, el crecimiento medio anual del arbolado, la densidad, volumen de madera, especies, salud del arbolado, regeneración natural, y carta de recursos forestales escala 1:50,000.

Para contar con información actualizada de los recursos forestales se incorporó información cartográfica a escala 1:50,000 de la cobertura de suelo. Esta información se derivó de la clasificación supervisada de imágenes de satélite de la constelación Rapid Eye tomadas en los años 2011 y 2012. La información cartográfica ofrece un detalle de resolución espacial de cuatro hectáreas como unidad mínima cartografiable y un detalle temático de los recursos forestales que permite la planificación y manejo sustentable en cada Entidad. La cartografía 1:50,000 cumple con los estándares establecidos por el INEGI. (SNIGF, s/f)

### **1.8 Conclusiones al capítulo**

Este capítulo ha sido el marco para el desarrollo de la investigación, por lo que en él se concentra la base teórica que da soporte al estudio, principalmente debido a los aspectos técnicos que aborda esta tesis y que son de interés para ser aplicados a una problemática global.

El tema de la confiabilidad cartográfica de los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal es relativamente nuevo a nivel internacional, los primeros trabajos se publicaron en el 2001, para el conjunto del territorio estadounidense. En México estos aparecieron hasta finales de la década, el primero de ellos empleó como insumo los resultados de la evaluación del mapa del Inventario Forestal Nacional, levantado en el 2000 (Couturier, et al., 2009), en el siguiente capítulo se profundizará al respecto. La relevancia de este trabajo es contribuir al desarrollo de esta línea de investigación al caso del CUSCV de gran importancia y vigencia para la geografía nacional, además de analizar un estudio de caso de una zona muy importante a nivel ecosistémico y de trascendencia para una especie dinámica y con fuertes interacciones de mayor escala espacial como es la mariposa monarca.

Entre los aspectos que destacan dentro de la revisión teórico-conceptual de la confiabilidad cartográfica y la cartografía temática se encuentra la importancia de contar con bases de datos multitemporales, que sean compatibles en sus categorías y con buena calidad que permitan responder de manera eficaz a las necesidades de información confiable en el país; es en este sentido que las técnicas de fotointerpretación, análisis de imágenes de satélite y trabajo de campo cobran relevancia.

Por otra parte, la perspectiva geográfica ofrece las herramientas necesarias para entender las causas y consecuencias de los cambios de uso del suelo, debido a que éstos están social, cultural y económicamente determinados.

Como se pudo apreciar, esta investigación aborda de manera transversal temas de trascendencia no solo de la geografía, sino de una problemática que aqueja a los seres humanos y a la biósfera, a través de una vertiente poco explorada.

Resaltan áreas de oportunidad en la cartografía temática, así como la limitación de las técnicas empleadas, ya que el objetivo es proveer de validez estadística a la información que se obtiene y proponer estimadores menos sesgados que los actuales para CUSCV de validez y con ello generar propuestas que incidan directamente en la política ambiental del país alineados a las propuestas de diversos organismos internacionales encargados de promover la importancia del manejo sustentable de los recursos naturales dado su impacto a nivel global.

Un ejemplo de esto, es el programa REDD+ que opera a nivel mundial y en el que México ha participado desde la última década, este instrumento fue revisado al ser parte del contexto en el cual se encuentra la situación forestal de México.

Y por otra parte se destaca la importancia de incorporar una metodología de evaluación de confiabilidad cartográfica que en el caso particular del cambio de uso de suelo y cobertura forestal es de gran relevancia debido a las transformaciones a las que ha sido sometido el medio natural en México.

Por último, fueron exploradas las principales fuentes de información de la temática forestal y las características de cada una, que además son insumos en el análisis que plantea esta investigación, esto ofrece mayor claridad en el manejo de la información, así como la posibilidad de analizar los vacíos y deficiencias de los productos empleados.

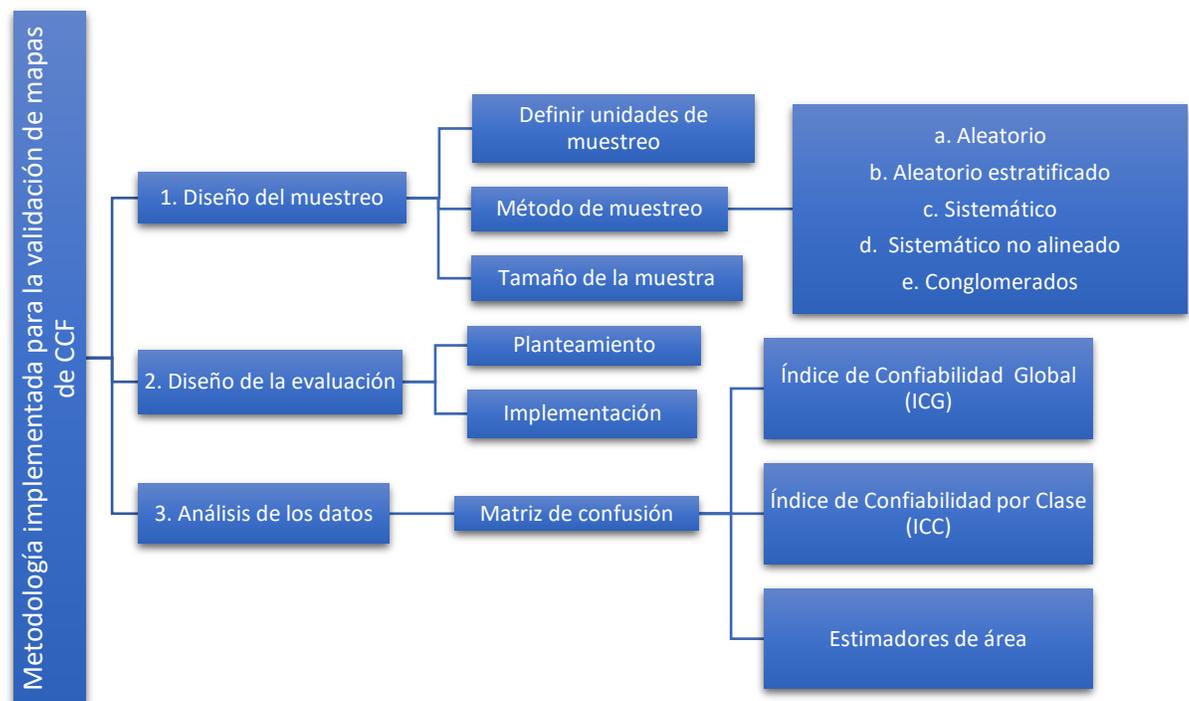
## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la fiabilidad de las cartografías de cambios en la cobertura forestal en la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca generadas en el periodo de 2003 a 2011.

En este segundo capítulo titulado Materiales y Métodos se presenta detalladamente la metodología empleada en la investigación, que está compuesta de dos partes: los insumos utilizados y la metodología aplicada para evaluar la confiabilidad cartográfica. Respecto a la metodología se presenta la estructura del proceso de evaluación de cartografía de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal al que fueron sometidos dos productos de dos escalas distintas.

En la figura 2.1 se presenta esquemáticamente la metodología empleada en esta tesis, esta representación ofrece una visión de la estructura del trabajo realizado y las etapas que integran cada fase, cada una de ellas se detalla oportunamente a lo largo del capítulo.

**FIGURA 2.1 METODOLOGÍA EMPLEADA**



Fuente: Elaboración propia

El propósito es sentar las bases metodológicas para las investigaciones orientadas a la evaluación de la confiabilidad cartográfica, como se ha mencionado anteriormente en aras de consolidar una línea de investigación de esta temática poco desarrollada en México y con potencial para convertirse en un instrumento riguroso de evaluación de la confiabilidad de los productos cartográficos que se generan.

En el último apartado se presenta una revisión a los trabajos realizados con esta temática, así como las líneas de investigación a fines que se han desarrollado sobre la zona de estudio, esto resulta fundamental para conocer cuál es el escenario de la investigación sobre la evaluación de confiabilidad cartográfica en México y como se puede incidir en una zona de gran relevancia ecológica como es la RBMM identificando espacios de oportunidad y vacíos existentes.

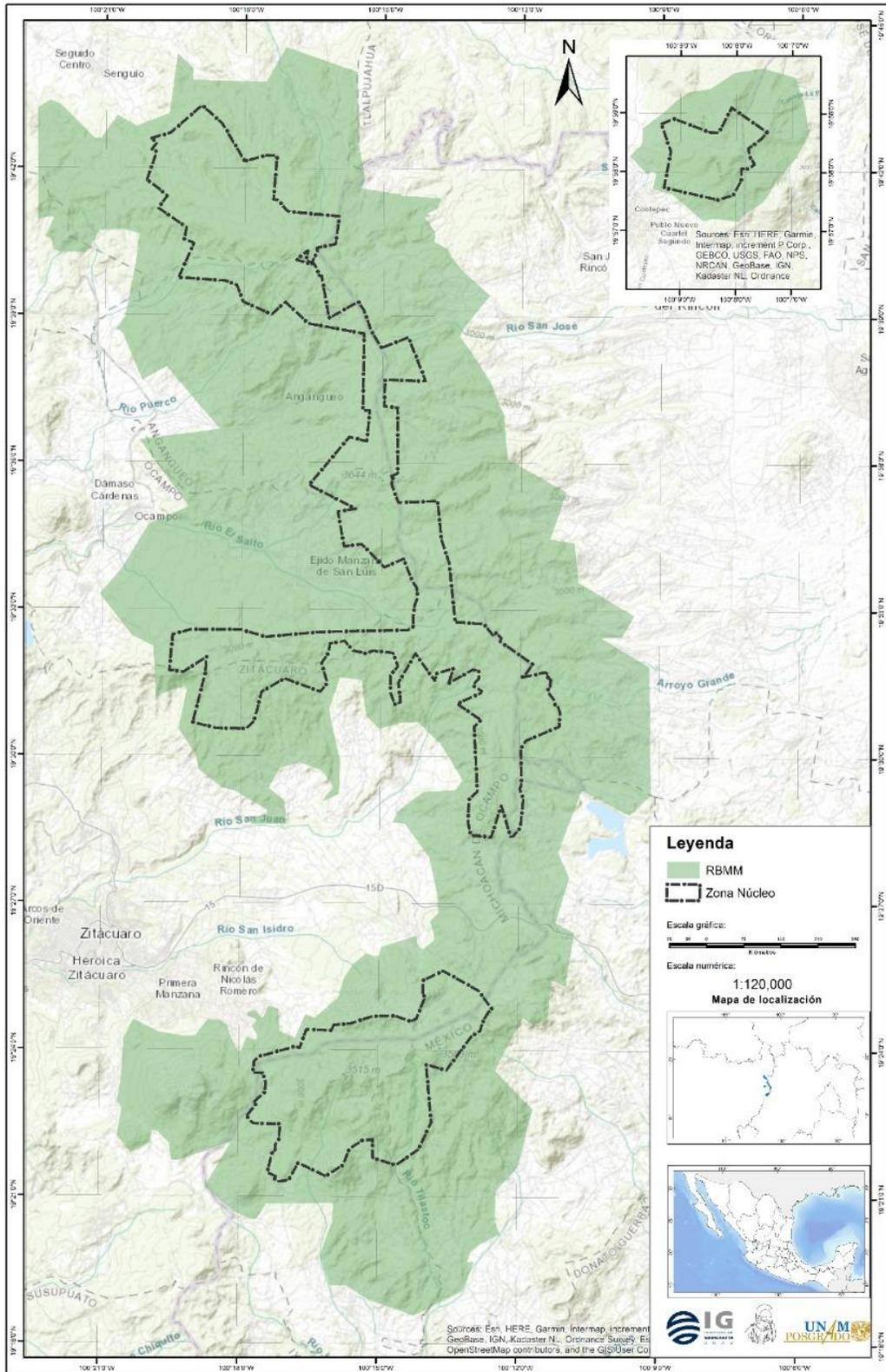
## **2.1 Generalidades del área de estudio**

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) se localiza en el Eje Neovolcánico Transversal, al oriente del estado de Michoacán y al poniente del Estado de México (figura 2.2). Administrativamente la reserva se sitúa en los municipios de Temascalcingo, San José del Rincón, Donato Guerra y Villa de Allende, en el Estado de México, y Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Áporo, en Michoacán.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) el fenómeno migratorio de la Mariposa Monarca fue descubierto por el zoólogo canadiense Fred Urquhart, en 1976 publicó un estudio en el que por primera vez se menciona su ubicación y en 1980 se decretó como Zona de Reserva y Refugio de Fauna Silvestre los lugares donde la mariposa hiberna y se reproduce (CONANP, 2001).

El 9 de octubre de 1986 se decretó en el Diario Oficial de la Federación, como Área Natural Protegida para los fines de la migración, hibernación y reproducción de la mariposa Monarca, así como para la conservación de sus condiciones ambientales (CONANP, 2001). En el año 2000 se estableció por decreto presidencial la ampliación de la zona núcleo de la RBMM de 4,490 ha a 13,551 ha como parte de los esfuerzos por preservar el área de hibernación de la mariposa monarca. En 2009 el área se modificó, comprendiendo la actual zona núcleo de 13,555 y 42,703 en la zona de amortiguamiento. (DOF, 2009). Figura 2.1

**FIGURA 2. ZONA DE ESTUDIO**



Fuente: Elaboración propia

La tenencia de la tierra en la RBMM es predominantemente social. Los 59 ejidos y 13 comunidades indígenas son propietarias de poco más de 24 mil hectáreas de bosques en la zona de amortiguamiento (42.7%) y 13 mil hectáreas más en la zona núcleo (23.1%) (Graf, 2009).

En términos de las características naturales del lugar, el paisaje de la zona de estudio se caracteriza por valles y montañas, con un origen volcánico y altitudes que van desde los 2,040 a los 3,640 metros sobre el nivel del mar (msnm). La reserva, forma parte de dos de las cuencas más grandes e importantes del país: la Cuenca del Río Lerma y la Cuenca del Río Balsas, que contribuyen con alrededor del 30 por ciento del agua que abastece a la Ciudad de México (CONANP, 2001).

La riqueza biológica es propia de un bosque templado de coníferas con diversas especies vegetales, resultantes de la zona de transición entre las regiones Neártica y Neotropical, siendo el oyamel, pino, encino y cedro las especies dominantes, éstas cumplen con importantes funciones ecológicas como es la recarga de los acuíferos, captura de carbono, retención de sedimentos y control de erosión y la conservación de la gran biodiversidad al ser el hábitat natural de plantas y animales.

Entre las especies animales destacan los mamíferos y las aves, especies como el venado cola blanca, zorra gris, coyote, mapache y cacomixtle; en tanto que en el grupo de las aves destaca el cernícalo, cuervo y búho. De acuerdo al inventario de vida silvestre realizado por el personal técnico de la reserva se tienen registradas 493 especies de plantas vasculares, 198 especies de vertebrados de los cuales 132 son aves y 56 mamíferos, además de 49 especies de hongos, también señalan que según lo establecido por la NOM-059-19947 esquema de protección especial, 11 especies amenazadas, 3 en peligro de extinción y 13 especies endémicas. (CONANP, 2001)

---

<sup>7</sup> La Norma Oficial Mexicana 059 (NOM-059) fue publicada por primera vez en 1994 y es el instrumento normativo que identifica las especies o poblaciones de México en riesgo, esta información se obtiene a través de la aplicación del Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de Especies Silvestres de México (MER), este instrumento sirve como referencia para evaluar el estado de conservación, además de ser una herramienta a nivel nacional para la ejecución de políticas ambientales. (García, et al 2017)

La CONANP señala que la presencia de estas mariposas en México, es un indicador de la existencia de bosques bien conservados y diversos reconocimientos<sup>8</sup> obtenidos en las últimas décadas dan cuenta de esto. (CONANP, 2001).

Sin embargo, ésta no es su única función ecosistémica, entre sus principales servicios destacan la provisión de alimentos, materias primas, agua dulce y recursos medicinales; en el ámbito de la regulación sobresalen los ecosistemas que favorecen la captura de carbono, conservación del suelo y polinización; mientras que, en el ámbito del soporte, se encuentran actividades de preservación del hábitat; a nivel cultural, destaca la riqueza paisajística, el cuidado de las áreas verdes y el turismo. Por ello, permanentemente se trabaja en el diseño e implementación de programas de manejo y desarrollo forestal comunitario que favorezcan la conservación y el aprovechamiento adecuado de los recursos y los servicios ambientales que la reserva provee local y regionalmente.

Por último, es importante dar cuenta del proceso de cambio de uso de suelo que se ha intensificado desde 2017, debido al creciente número de establecimiento de huertas de aguacate. De acuerdo con Forbes México, se estima que en el periodo de 2001-2012 la tala ilegal ha afectado más de 2,507 hectáreas entre tala clandestina a gran escala y tala “hormiga”. (Forbes, enero 6, 2020).

Actualmente, es también uno de los escenarios más violentos del país en términos de la defensa de los recursos naturales y el medio ambiente, en enero un guía turístico de la zona fue hallado muerto y en febrero de 2020 se registró la desaparición y asesinato de uno de los ejidatarios<sup>9</sup> defensores de la Reserva, así recobro fuerza y difusión la idea de que el cultivo de aguacate estaba ocasionando la destrucción de los bosques michoacanos.

Esta situación confirma que México es uno de los países más peligrosos para los defensores del medio ambiente, pues en 2019 Amnistía Internacional registró 24 asesinatos a defensores de

---

<sup>8</sup> La zona también es reconocida por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) como Región Hidrológica Prioritaria. El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) la define como un Área de Importancia para la Conservación de Aves (AICAS), ubicada en una ecorregión en peligro crítico. En 2008, fue declarada Patrimonio Natural de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). en inglés la define como un Área de Importancia para la Conservación de Aves (AICAS), ubicada en una ecorregión en peligro crítico. En 2008, fue declarada Patrimonio Natural de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

<sup>9</sup> Homero Gómez, ingeniero agrónomo defensor de los bosques de oyamel y la mariposa monarca, fue desaparecido y encontrado muerto el 29 de enero, hecho que causó la indignación de ambientalistas de México y el mundo.

derechos humanos, la mayoría enfocados en la defensa del territorio y el medio ambiente. (Mongabay, 2020).

Las inspecciones de PROFEPA son constantes en la zona, debido a la incidencia de casos de tala clandestina en el área de la reserva y el cambio de uso de suelo en terrenos forestales donde se han encontrado plantíos de aguacate y durazno principalmente.

En este contexto, las aportaciones que se pueden hacer desde el monitoreo y la evaluación de la cartografía de la zona son de gran relevancia, como elementos que contribuyan a la creación de mejores mecanismos de preservación y protección, así como el diseño de políticas públicas y acciones que intervengan en el territorio respetando la condición de ANP de la reserva.

## **2.2 Antecedentes**

México ha avanzado en el análisis de la dinámica de la cubierta vegetal como base para el reporte de las tendencias y proyecciones de las tasas de pérdida o deforestación. Sin embargo, los avances en términos de validación cartográfica que se requiere para este tipo de análisis están aún ausentes (Couturier, et al., 2009).

A continuación, se expone una breve revisión de las investigaciones sobre evaluación de confiabilidad cartográfica realizadas en México y que han sido publicadas en libros, artículos científicos y tesis, con el propósito de conocer como se ha ido estructurando la investigación y dimensionar la producción relacionada y conocer hacia donde se han orientado los casos de estudio, para identificar no sólo espacios de oportunidad sobre el tema de la confiabilidad sino también los vacíos en el territorio y en zonas de gran importancia ecológica y ecosistémicas como son áreas naturales protegidas, cuya atención es prioritaria.

En el contexto internacional los estudios sobre confiabilidad cartográfica surgieron en la década de los noventa, partiendo desde el cuestionamiento del error en la cartografía atribuidos a las imágenes satelitales y al mapa mismo, identificando también los tipos de error. Todas estas contribuciones permitieron estructurar una metodología sólida para medir e identificar los errores en la cartografía, en el cuadro 2.1 se presentan algunos de los autores que a nivel mundial contribuyeron su desarrollo.

Piña (2018) refiere la revisión realizada por Olofsson et al. (2013) de los artículos publicados entre 2005 y 2010 en dos de las revistas más importantes sobre percepción remota y destaca que de las 57 publicaciones sobre cambio de cobertura y uso de suelo, 8 artículos no realizaron ninguna evaluación, 24 evaluaron sus mapas pero sin considerar los cambios y 16 evaluaron la

fiabilidad de cambios pero sin calcular índices de fiabilidad y solo 9 habían aplicado una metodología de medición de la fiabilidad de forma integral, el autor concluye que pese a la gran cantidad de información que ha surgido en los últimos 30 años respecto a los métodos de evaluación no ha habido una adecuada difusión en la academia, situación que prevalece hasta la actualidad y para México la situación no es muy distinta, en seguida se presentan los hallazgos de una revisión similar para conocer los avances.

**CUADRO 2.2 PUBLICACIONES INDEXADAS SOBRE CONFIABILIDAD CARTOGRÁFICA A NIVEL INTERNACIONAL**

<b>Año</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>
1982	Card, H.D.	Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy
1989	Chrisman, N.R.	Modeling error in overlaid categorical maps
1992	Goodchild, M. F., S. Gouqing y. Shiren	Development and test of an error model for categorical data
1994	Janssen, L. F. y F. J. Van der Wel	Accuracy assessment of satellite derived landcover data, a review
1994	Gopal, S., C. E. Woodcock y A. Strahler	Fuzzy neural network classification of global land cover from a 10 AVHRR Data Set
1994	Gopal, S., y C. E. Woodcock	Accuracy of thematic maps using fuzzy sets I: theory and methods
1995	Aspinall, R. y D. M. Pearson	Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS
1998	Stehman y Czaplewski	Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles
2000	Pontius	Quantification error versus location error in comparison of categorical maps
2000	Woodcock, C. y S. Gopal	Accuracy assessment and area estimates using fuzzy sets

2001	Carmel, Y., D. J. Dean y H. F. Curtís	Combining location and classification error sources for estimating multi-temporal database accuracy
2002	Pontius	Statistical methods to partition of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions

Fuente: Elaboración propia

Los artículos científicos publicados en México se muestran en el cuadro 2.2 en la búsqueda realizada se encontraron siete artículos publicados con el tema de la evaluación de la confiabilidad cartográfica, el primero de ellos publicado en 2003 por Mas y Fernández, pionero en la aplicación de la metodología de confiabilidad cartográfica enfocado en medir el cambio en las coberturas del suelo. En el mismo año también fue publicado el artículo Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión, dónde se expone de forma más completa la necesidad de conocer la confiabilidad de la cartografía y contribuye presentando la primer revisión de la literatura especializada existentes sobre la confiabilidad temática y es además el primer estudio publicado en el que los autores detallan todas las etapas de la metodología y se exponen los principales problemas que hacen de esta metodología necesaria en la cartografía del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. A la fecha son pocas las bases de datos que han sido evaluadas.

En el lustro siguiente la investigación sobre el tema registra un vacío, posteriormente se retoma el enfoque y comienza a enfatizarse su aplicación en casos de estudio incorporándose también el aspecto de los cambios en la cobertura y el uso de suelo. Es importante señalar que autores como Mas, Couturier, Fernández y Velázquez se mantienen constantes en el desarrollo de investigación con esta temática.

**CUADRO 2.3 ARTÍCULOS NACIONALES PUBLICADOS EN REVISTAS INDEXADAS**

	<b>Número/año</b>	<b>Título</b>	<b>Autores</b>
1	Vol. 23, n.3 (2017)	Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México.	Raúl Camacho-Sanabria, José Manuel Camacho-Sanabria, Miguel Ángel Balderas, y Marcela Sánchez
2	vol. 63, no.01 (2011)	Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México	TJ García y Jean François Mas

3	Vol.1, núm.1 (2009)	¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? ¿Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico?	Stéphane Couturier y Jean François Mas
4	2009	La Evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana	Jean François Mas, Stéphane Couturier y Alejandro Velázquez
5	no.67 (2008)	Evaluación de la confiabilidad del mapa del inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes	Stéphane Couturier, Alvaro Vega, Jean François Mas, Valdemar Tapia y Erna López
6	no.51 (2003)	Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas	Jean François Mas y Tania Fernández
7	No.51 (2003)	Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión	Jean François Mas, José Reyes Díaz-Gallegos y Azucena Pérez Vega

Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, están los capítulos de libros publicados que hasta la fecha son dos, aún no ha sido publicado ningún libro que aborde en su totalidad el tema de la confiabilidad.

#### CUADRO 2.4 CAPÍTULOS DE LIBROS PUBLICADOS

	Año	Título	Autores
1	2011	Evaluación de bases de datos cartográficas	Jean- François Mas y Stéphane Couturier
2	2011	Evaluación de la cobertura vegetal en México: Aciertos y sesgos del mapa derivado de MODIS	Stéphane Couturier
3	2020	Fiabilidad temática de cartografía de cubierta/Usos de suelo del Estado de Michoacán	Andrés Piña Garduño, Jean-François Mas y Richard Lemoine Rodríguez

Fuente: elaboración propia

Por último, están las tesis publicadas, en esta categoría se encuentra la producción más numerosa sobre el tema, la primera presentada en 2006, su orientación es hacia la aplicación de una metodología para el monitoreo de la RBMM aplicando técnicas para detectar el cambio en la cobertura, brevemente expone la evaluación de la fiabilidad como elemento a considerar en el análisis de estudios multifecha. La mayoría de estas investigaciones son del área de geografía

en sus tres niveles, licenciatura, maestría y doctorado, todas desarrollan sus investigaciones desde la aplicación en diversos estudios de caso.

**CUADRO 2.5 TESIS PUBLICADAS**

<b>Año</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo de trabajo</b>
2018	Andrés Piña Garduño	Evaluación de la fiabilidad temática de cartografía de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán	Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales
2016	María del Carmen Vela López	Evaluación de la confiabilidad para mapas de cobertura forestal y uso de suelo en México a dos escalas	Tesis de Licenciatura en Geografía
2014	Rocío Martínez González	Métodos de Evaluación de confiabilidad cartográfica para la cobertura vegetal en México: Aplicación a nivel Nacional y Municipal	Tesis de Licenciatura en Geografía
2014	Oswaldo Falcón García	Dinámica de cambio en la cobertura/ Uso de suelo en una región del Estado de Quintana Roo	Tesis de Maestría en Geografía Ambiental
2013	Abraham Cárdenas Tristán	Evaluación de la calidad cartográfica vectorial utilizada para el manejo de los recursos naturales	Tesis de doctorado en Ciencias
2007	Stéphane Couturier	Evaluación de errores de mapas de cobertura vegetal y usos de suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite	Tesis de doctorado en Geografía
2006	Tania Fernández Vargas	Estimación de la confiabilidad de mapas de cambio de uso de suelo y vegetación	Tesis de Licenciatura en Geografía
2006	Ignacio González Gutiérrez	Una comparación de diferentes métodos de detección de cambio en imágenes de satélite para el monitoreo de la deforestación en la reserva de la biosfera mariposa monarca	Tesis de Licenciatura en Geografía

Fuente: Elaboración propia.

Esta revisión permite visualizar el panorama de la investigación sobre la confiabilidad cartográfica, se optó por limitar la revisión de estas publicaciones desarrolladas en México para exponer los vacíos existentes en el escenario nacional. Si bien este reducido número se atribuye a que se trata de una línea de investigación reciente, también es cierto que aún queda mucho por investigar sobre el tema y el territorio mexicano, la producción no ha sido constante y ha sido desarrollada por un pequeño grupo de investigadores, esto explica porque aún no ha podido consolidarse una línea de investigación en torno a la confiabilidad cartográfica.

Y aunque, la ciencia directamente asociada a la producción cartográfica es la geografía, los mapas son una herramienta indispensable en múltiples áreas y disciplinas, en la revisión de tesis elaboradas sólo tres de ocho corresponden a ciencias diferentes de la geografía, asimismo destaca que sólo dos de estas corresponden a estudios de posgrado, lo que permite reafirmar el poco desarrollo que ha tenido la evaluación de la confiabilidad cartográfica.

## **2.3 Materiales**

En términos de materiales estos se dividen en dos tipos: los materiales analizados y los materiales para verificación. Los analizados fueron el Mapa de Cambio del Proyecto Global Forest Cover Change (2013) y el mapa generado por Molina (2017).

### ***Analizados***

#### **2.3.1 Mapa de cambio del proyecto Global Forest Cover Change (GFCC)**

El mapa Global Forest Cover Change Dataset (GFCC) elaborado por Hansen et, al (2013) investigador de la Universidad de Maryland, ofrece un visualizador desde el cual se pueden observar el comportamiento de la superficie forestal que se ha registrado a nivel mundial de 2000-2018. Figura 2.2

El mapa GFCC es actualmente el encargado de reportar el estado de los bosques a nivel mundial. En este producto se identifica el porcentaje de cobertura, pérdida y ganancia forestal. Entre sus principales características destacan:

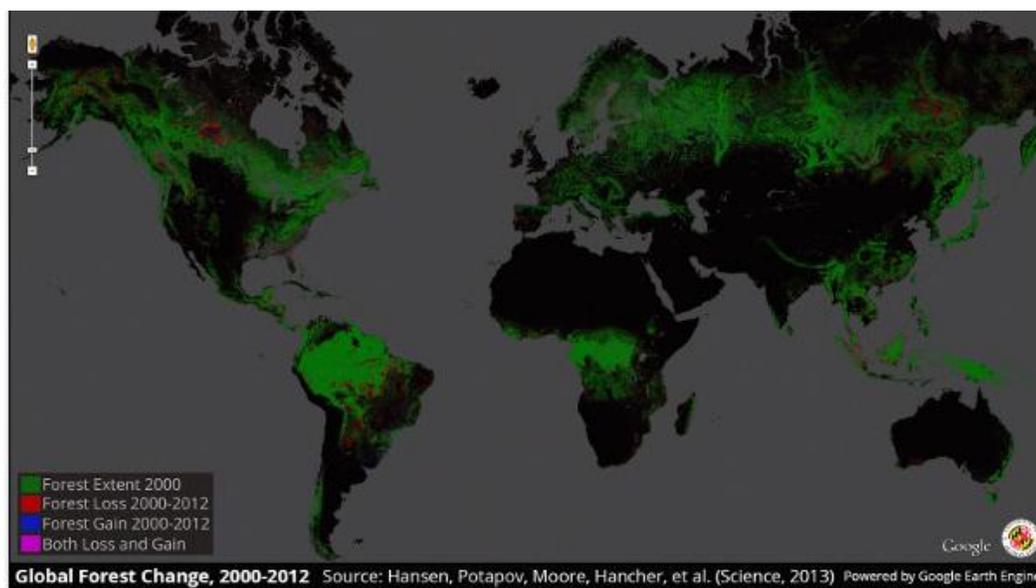
1. Se trata de un mapa que cubre 128 mil kilómetros cuadrados, casi el 86% de la superficie terrestre total y que equivale a 143,000 millones de píxeles de 30 metros de resolución espacial del sensor LANDSAT 7<sup>10</sup>.
2. Incorpora 8 colecciones temáticas con bandas preprocesadas del periodo de 2000-2019
3. EL visualizador permite identificar las tasas de cambio de las masas forestales, así como los momentos de pérdida y ganancia de vegetación.
4. Es considerado el primer mapa<sup>11</sup> que representa los cambios en los bosques, consistente y relevante a nivel local, además de ir más allá de la cartografía de cambio neto en la cubierta forestal, sus datos permiten descubrir importantes transformaciones ecológicas que pueden estar enmascaradas en sutiles cambios.
5. Anualmente son procesadas alrededor de 650 mil imágenes LANDSAT para cartografiar la pérdida y aumento de los bosques.
6. Es un producto accesible y de fácil manejo para cualquier usuario a nivel mundial que actualmente dispone incluso de una aplicación

---

<sup>10</sup> Landsat 7 fue lanzado al espacio el 15 de abril de 1999, es el último satélite de la serie que comenzó con la puesta en órbita del LANDAST 1 en 1972, este satélite orbita a 705km de altura y tarda 16 días en realizar un escaneo de toda la superficie planetaria en 232 orbitas terrestres. Capta información en 6 bandas espectrales con una resolución de 30 metros por pixel, es uno de los satélites más empleados en estudios geológicos y de vegetación. (Labrador, et al., 2012)

<sup>11</sup> Hasta la aparición del mapa de Hansen GFCC la principal Evaluación de los Recursos Forestales se realizaba a través de la FAO y era empleada principalmente como un modelo para el sector agrícola.

FIGURA 2.3 MAPA GFCC



Fuente: <https://www.globalforestwatch.org/>

Esta información está dispuesta en la plataforma Google Earth Engine que aprovecha su alta capacidad de procesamiento y representa un gran esfuerzo en términos de colocar a disposición mundial información espacial y temporalmente detallada del cambio forestal que se experimenta a nivel mundial.

De acuerdo con la directora del Google Earth Engine, Rebeca Moore, hasta el momento esta es considerada la aplicación científica de mayor escala de la tecnología de Earth Engine para medir y cartografiar los recursos naturales de la tierra.

Por otra parte, se homologaron criterios para definir las categorías para los mapas analizados, agrupando píxeles o para el mapa del GFCC (2013) existen dos productos disponibles, uno refiere al cambio que tuvo un píxel el periodo 2000-2016 con una desagregación anual, el otro es un mapa de densidad forestal expresado en porcentaje de cobertura arbórea en 2000. Para obtener un mapa con tres categorías se realizó una intersección espacial con ambas capas, se seleccionaron los píxeles con una densidad forestal mayor al 10% que sufrieron algún cambio entre 2003 y 2011 y se asignaron a la categoría de deforestación (DEF), mientras los píxeles identificados por debajo de dicho porcentaje en todo el periodo que reporta el mapa se asignaron a la categoría de permanencia no forestal (NC-NF), es decir en esa categoría se agrupan tierras agrícolas, infraestructura, cuerpos de agua, pastizales, suelos desnudos, entre otros. Se asignaron a la categoría de permanencia forestal (NC-F) todos los píxeles que reportaban un porcentaje mayor a 10% en todo el periodo.

### **2.3.2 Molina, 2017**

Es un mapa de cambio de la ZNRBMM (2002-2013) de uso de suelo y vegetación generado a partir de clasificación no supervisada empleando el método ISODATA. Este algoritmo funciona como una búsqueda automatizada de valores homogéneos en todas las bandas de imágenes satelitales.

La clasificación no supervisada es un proceso de agrupación de píxeles con niveles digitales similares para todas las bandas, estos grupos se denominan clases espectrales y cada una idealmente corresponde a un tipo de cobertura. No obstante, pueden existir algunas combinaciones: que una categoría temática este expresada en varias clases espectrales, que dos o más categorías temáticas compartan una sola clase espectral o que varias categorías temáticas compartan varias clases espectrales.

Debido a lo anterior es necesario una intervención del analista en el proceso de identificación de coberturas que el clasificador esta agrupando. Para el caso del estudio, se generaron varios ejercicios previos a obtener la imagen clasificada final, estas iteraciones tenían la finalidad de identificar la imagen que separara de manera más fiel el bosque del no bosque. La imagen resultante está compuesta de diez clases espectrales las cuales fueron agrupadas de acuerdo a la categoría temática de interés, el resultado de la reclasificación fue un mapa binario, bosque-no bosque.

La clasificación no supervisada se aplicó a dos insumos:

- ✓ Mosaico Imágenes SPOT 5 con recorte de la ZNRBMM, 2003
- ✓ Mosaico Imágenes RapidEye, con recorte de la ZNRBMM, 2011

Cabe señalar que se realizaron recortes a la ZNRBMM para minimizar el posible el ruido espectral de categorías que no sean de interés para el análisis.

El siguiente paso fue obtener el mapa de cambio entre las fechas analizadas, para esto se realizó una vectorización de las imágenes reclasificadas y una limpieza de polígonos por debajo del área mínima cartografiable de acuerdo a la escala del mapa.

Posteriormente se realizó una intersección espacial entre las capas resultantes y se identificaron las zonas que sufrieron pérdida de vegetación entre el periodo 2003-2011 y se clasificaron con la categoría temática deforestación.

## **Verificación**

La información empleada en la etapa de verificación proviene de dos satélites de teledetección y un mosaico de fotografías aéreas. Existen más de 900 satélites orbitando la tierra, la mayoría (aproximadamente el 60%) son de comunicaciones y alrededor de 120 son satélites de teledetección (que equivalen al 14%), este número es variable anualmente debido a los nuevos lanzamientos y a los satélites que dejan de funcionar. A continuación, se detallan las características de las imágenes utilizadas en esta investigación.

### **2.3.3 Imágenes ASTER**

El satélite ASTER fue lanzado en la plataforma de TERRA en diciembre de 1999. ASTER presenta una órbita helio sincrónica a 705 kilómetros de la superficie terrestres y tiene un rango de repetición de 16 días con un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 km.

**FIGURA 2.4 1FIGURA 2.2 SATÉLITE ASTER**



Fuente: <https://www.cartomex.com/satelite-aster.html>

Es un sensor de imágenes ópticas de alta resolución geométrica y radiométrica que contiene 14 bandas contenidas en tres subsistemas (TIR; SWIR Y VNIR); Infrarroja termal (TIR) con 5 bandas a 90 metros de resolución, Infrarroja de Onda Corta (SWIR) con 6 bandas a 30 metros de resolución e Infrarroja Visible/Cercana (VNIR) con 4 bandas a 15 metros de resolución. La anchura de la toma de las imágenes es 60 kilómetros. (Abrams, Hook & Ramachandran, 2002)

**FIGURA 2.5 IMÁGENES ASTER**



Fuente: <https://gidahatari.com/ih-es/tutorial-para-descargar-imagenes-aster-res-15m-libres-caso-nevado-aconcagua>

Las imágenes ASTER son utilizadas para la interpretación geológica y ambiental principalmente, gracias a su amplio diapasón de bandas espectrales sobre todo en el infrarrojo térmico.

#### **2.3.4 Imágenes RAPIDEYE**

RAPIDEYE es una constelación integrada por 5 satélites comerciales alemanes: TACHYS, MATI, CHOMA, CHOROS Y TROCHIA, equipados con sensores idénticos y situados en el mismo plano orbital, lo que permite multiplicar su capacidad de revisita y captación de imágenes. Los cinco satélites se pusieron en órbita el 29 de agosto de 2008 y orbitan a una altura de 630km de la superficie terrestre. En conjunto estos 5 satélites cubren una superficie de 4 millones de km<sup>2</sup> diariamente y cada uno de los satélites proporciona 5 bandas espectrales (azul, verde, rojo, rojo lejano y NIR).

Las imágenes que suministra dependiendo el grado de procesamiento son:

**FIGURA 2.6 SATÉLITE RAPIDEYE**



Fuente: <https://www.terr analisis.cl/es/procesamiento/rapideye.htm>

Nivel 1B, se trata de una imagen corregida radiométricamente y sin las distorsiones que se producen por el escaneado y la óptica del sensor.

Nivel 3A: esta imagen además de la corrección del nivel 1B, también es ortorrectificada con un modelo de elevación del terreno y con puntos de control en el terreno. Estas imágenes tienen una resolución de 5 m/píxel. (Labrador, et al., 2012).

**FIGURA 2.7 IMAGEN RAPIDEYE**



Fuente: <https://geocento.com/satellite-imagery-gallery/rapideye/>

### **2.3.5 Mosaico Ortorectificado de López**

La composición de un mosaico es una unión sistemática de fotografías aéreas (2003 y 2010) de alta resolución, cuyas ventajas comparativas están principalmente referidas a la rápida disponibilidad prácticamente después del vuelo realizado para su obtención, aunado a su bajo costo y nivel de precisión.

Al tratarse de grandes extensiones de territorio es necesario disponer de un cubrimiento fotográfico que permita la formación de un mosaico, el cual debe someterse a una verificación y corrección para reducir las distorsiones ocurridas en la toma de cada fotografía, tomando en cuenta la esfericidad de la superficie y la necesidad de uniformidad escalar en todo el mosaico (Prado & Peralta, 2012).

Este proceso permite garantizar un producto de calidad en la imagen y preciso en términos cartográficos. Este tipo de imágenes se han convertido en una importante herramienta en el estudio de los recursos naturales (Prado & Peralta, 2012; Prado, et al., 2012).

En esta investigación se empleó el primer mosaico ortorectificado de López, 2003, realizado en la zona de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, como parte de un estudio para el monitoreo de la deforestación y la determinación del uso de suelo en la zona.

**FIGURA 2.8 MOSAICO ORTORECTIFICADO DE LA RBMM, LÓPEZ**



Figura 4. Mosaico semicontrolado del área donde se ubica la RBMM. Las líneas en naranja muestran las áreas protegidas antes del decreto del 2000; y en rojo y azul, se muestran las nuevas zonas núcleo y de amortiguamiento, respectivamente.



Áreas protegidas anteriores



Nuevas zonas núcleo



Nueva zona de amortiguamiento



Colonias de mariposas reportadas en los últimos 21 años

.Fuente: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/download/38/38/114-1?inline=1>

## 2.4 Aspectos metodológicos

En el ámbito internacional existen varias metodologías diseñadas para evaluar los cambios de cobertura forestal, todas emplean como principales insumos, fotografías aéreas o imágenes de satélite de diversas resoluciones.

La metodología empleada en esta investigación es la diseñada por Stehman y Czaplewski (1998) y aplicada en México por primera vez por Mas, et al. (2003), ésta se compone por tres etapas: 1) diseño de muestreo, 2) evaluación de los sitios de verificación y 3) análisis de los datos.

### 2.4.1 Diseño de la muestra

Consiste en establecer el tipo, el método estadístico empleado para su selección y el número de unidades de muestreo; además de ser la primera fase para la evaluación es una de las más importantes pues con base en la selección del área para la verificación se corroborarán los datos con la matriz de confusión.

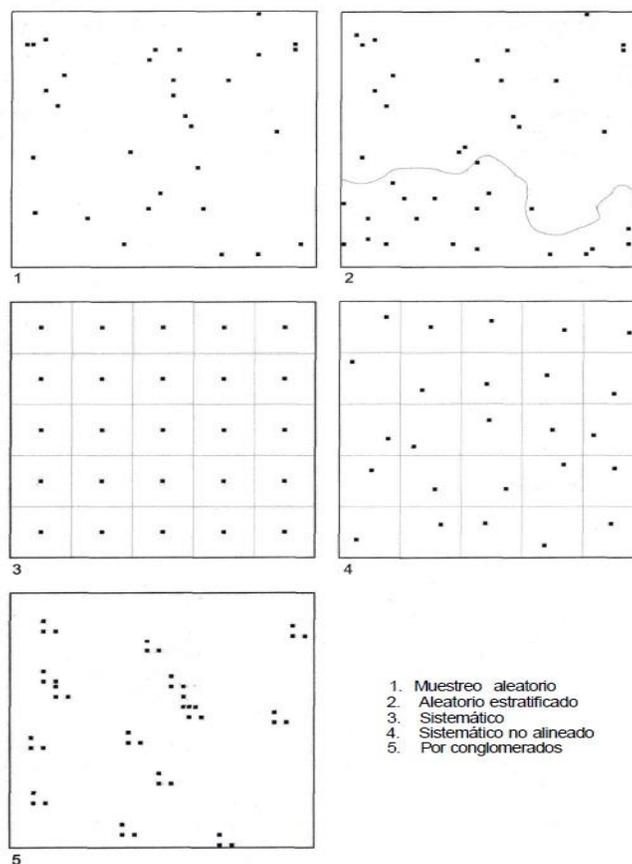
El diseño de la muestra se realiza teniendo en consideración tres aspectos:

- a) *Definir las unidades de muestreo*; se logra partiendo de un cruce de la información entre la localización en el mapa y su ubicación en la realidad. Es importante señalar que no existe una característica específica para identificar una unidad de muestreo, es decir, ésta puede ser un pixel, un polígono, una figura geométrica con límites bien definidos como un círculo, cuadrado o rectángulo, la elección del área se establece más bien, teniendo en consideración los objetivos de la evaluación, el mapeo y las categorías que son de interés para el usuario. Chuvieco, (1990) señala que la principal virtud de un buen muestreo es seleccionar adecuadamente una parte de la imagen clasificada, de tal forma que siendo tan pequeña como sea posible, sea lo suficientemente representativa de su conjunto. El diseño de la muestra realizado para este estudio, contempló en la verificación el área mínima cartografiada en áreas circulares.

- b) *El método de muestreo*: considera la posibilidad de seleccionar una pequeña área como una representativa de la totalidad del mapa. Esta fase tiene sus bases en principios probabilísticos, donde todas las unidades de muestreo del mapa tienen una probabilidad mayor a cero de ser seleccionadas, las técnicas de muestreo más empleadas comúnmente en el proceso son (Mas, et al., 2003; Chuvieco, 1995):

1. Método aleatorio simple: Todos los elementos sujetos a verificación tienen la misma probabilidad de ser seleccionados
2. Método aleatorio estratificado: La muestra se realiza a partir de la división de la población en estratos o regiones, tomando en cuenta una variable auxiliar (como altitud).
3. Método sistemático: La muestra se distribuye a distancias regulares a partir de un punto elegido al azar.
4. Método sistemático no alineado: La muestra se distribuye a distancias regulares.
5. Método por conglomerados: se elige una unidad de muestra con un grupo de observaciones, en lugar de individuos aislados. Los conglomerados pueden conformarse a partir de puntos localizados a cierta distancia del punto central. (Figura 2.2)

**FIGURA 2.9 TIPOS DE MUESTREO**



Fuente: Mas et. Al. (2003) modificado de Chuvieco (1995)

El método elegido en este estudio fue el aleatorio estratificado basándose en que todos los sitios tuvieran la misma probabilidad de ser elegidos, tomando en cuenta la representatividad de las categorías al contemplarse los estratos y aleatorio porque garantiza que toda la superficie tenga la misma posibilidad de ser seleccionada.

- c) *El tamaño de la muestra*, considera cuántos sitios de verificación es conveniente usar para estimar la confiabilidad del mapa y responde a la lógica de que a mayor tamaño de la muestra los resultados de la evaluación tendrán mayor precisión. Lamentablemente no siempre se disponen de los recursos necesarios para ello, por lo que es posible determinar un tamaño mínimo para realizar la evaluación.

#### **2.4.2 Evaluación de los sitios de verificación**

Consiste en caracterizar el sitio de verificación, asociándolo a una o varias clases del mapa que se evalúa. Cuando la evaluación de la unidad de muestreo se trata de un pixel o un punto se debe considerar una cierta área alrededor del mismo. Para esta investigación se realizó un área de influencia alrededor del sitio de muestreo donde se representaba área mínima cartografiada de cada producto y con la finalidad de reforzar la verificación.

Es importante mencionar que comúnmente la evaluación conduce a asociar el sitio de verificación a una sola categoría del mapa, lo que en ocasiones resulta inconveniente dada la subjetividad del resultado, debida a la posibilidad de que el sitio seleccionado se encuentre en una zona de transición entre dos tipos de vegetación o en un área donde se encuentren varias clases, esto se denomina “enfoque difuso” (Woodcock & Gopal, 200). Este enfoque se representa a través del grado de pertenencia expresado entre 0 y 1 para expresar la pertenencia parcial que pudiera tener en cada conjunto.

#### **2.4.3 Análisis de los datos**

Esta etapa consiste en el análisis de los datos de confiabilidad que usualmente se realiza a través de una matriz de confusión, misma que se realiza visualmente y en la que se confronta la información de los sitios de verificación con la de la base cartográfica a evaluar. Además, la construcción de esta matriz permite obtener cuatro tipos de índices de confiabilidad: el Índice de Confiabilidad por Clase (ICC), el Índice de Confiabilidad para el Usuario del Mapa (ICCU), el índice de Confiabilidad para el Productor del Mapa (ICCP) y el Índice de Confiabilidad Global (ICG) Stehman, et al. (1998)

La interpretación se realiza de forma visual en dos etapas, la primera es la de mayor temporalidad y la segunda la más reciente, este es el principio que permite inferir los cambios en la vegetación que pueden manifestarse en los sitios de verificación y consiste en señalar el porcentaje de cobertura visible en ambos periodos.

Una vez establecido el valor se le asigna una clase de cambio de tipo cualitativa, basada en la siguiente nomenclatura del cuadro 2.7., la cual construye la estructura de la matriz de confusión.

**CUADRO 2.6 NOMENCLATURA PARA DEFINIR EL PORCENTAJE DE CAMBIO**

<b>Cambio de cobertura (porcentaje)</b>	<b>Clase de cambio</b>
-80%, -60%, -50%, -30%, -20% +20%, +30%, +50%, +60%, +80%	No bosque no cambio (NC-NF) Bosque no cambio (NC-F) Deforestación (DEF) Reforestación (REF)

Fuente: Mas, et al, 2011

La matriz de confusión está compuesta por filas y columnas que representan las clases de referencia y las clases del mapa respectivamente, la diagonal formada en estos cruces expresa el número de sitios para verificación entre los que hay concordancia entre el mapa y la información de referencia, por lo que reflejan la confiabilidad del mapa mientras que los datos que se encuentran en los márgenes señalan errores de asignación. Cuadro 2.7

En función de la distribución de la matriz, se distinguen dos tipos de errores: de comisión y de omisión, teniendo en consideración las líneas y las columnas, el primero denominado de comisión se refiere a la proporción de sitios de verificación que fueron cartografiados en cierta clase pero que en realidad pertenecen a otra y el segundo, denominado errores de omisión, que se refieren a la proporción de sitios que corresponden a una categoría que fue cartografiada en otra.

**CUADRO 2.7 MATRIZ DE CONFUSIÓN**

<b>Mapa</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Sitios</b>			
<b>A</b>	7	2	0
<b>B</b>	2	7	0
<b>C</b>	1	1	10
<b>Suma</b>	10	10	10

Fuente: Mas, et al, 2011

La principal aportación de la matriz de confusión es que permite identificar los conflictos existentes entre categorías, pues además de conocer los puntos que fueron clasificados correctamente también se puede conocer cuál es la confiabilidad de cada una de las clases y las confusiones encontradas.

En síntesis, la matriz nos ofrece los parámetros de exactitud que, de acuerdo con Stehman y Czaplewski (1998), son los siguientes:

1. Índice de Confiabilidad Global (ICG): clasificación correcta del mapa; establecida en porcentaje y que nos indica la probabilidad de que un punto seleccionado al azar este clasificado correctamente en el mapa
2. Índice de Confiabilidad de Clase para el Usuario (ICCU): identifica la probabilidad de que un punto de una categoría elegido al azar represente fielmente esa categoría, tomando como base los datos de referencia.
3. Índice de Confiabilidad de Clase para el Productor (ICCP): señala la probabilidad de que un punto escogido al azar represente realmente la categoría elegida con base en la información del mapa
4. Error de comisión: parámetro que indica la probabilidad de que un punto al azar de la categoría "A" sea representado por la categoría "B", basado en la información de referencia.
5. Error de omisión: parámetro que indica la probabilidad de que un punto elegido al azar, clasificado como categoría "A" por los datos de referencia sea clasificado como categoría "B" por los datos del mapa.

Teniendo en consideración la evaluación de la fiabilidad obtenida a través de la matriz de confusión, es posible identificar y corregir estos sesgos en la evaluación de la superficie de cada una de las categorías del mapa. Es decir, algunas categorías son sobrerrepresentadas en el

muestreo respecto a su proporción de áreas en el mapa, mientras que, otras por contrario, son subrepresentadas en el muestreo y gracias a esta información pueden realizarse los ajustes necesarios.

Es por ello que Card (1982) propone un método para ajustar la matriz bruta, distribuyendo el esfuerzo de muestreo con probabilidades de muestreo más bajas para las áreas que lo requieran, evitando el sobre muestreo en las áreas más extensas.

Aplicar estas correcciones a la evaluación permite reducir los sesgos encontrados en la evaluación de cada superficie en cada una de las categorías incluidas en el mapa.

#### **2.3.4 Estimación del área y la incertidumbre**

Los estimadores de área permiten identificar la subestimación o sobreestimación de las áreas de las categorías clasificadas; teniendo como precepto que la cartografía tiene que representar fielmente la realidad, son resultado de un proceso estadístico y corresponden a la última etapa de la evaluación de confiabilidad, su objetivo es evaluar la precisión de un mapa con sus categorías.

En este sentido, los principales errores se deben a clasificaciones equivocadas resultantes de la poca definición en colindancias de coberturas principalmente y es una de las recientes contribuciones que se incorporan a la metodología de evaluación de confiabilidad cartográfica.

El área de una categoría que ha sido afectada por errores de comisión estará sobreestimada, lo que implica un ajuste, para lo cual se requiere utilizar las proporciones de área estimadas para cada clase. El área derivada del mapa deben ser ajustadas para tomar en cuenta estos sesgos. Estas estimaciones de área deben acompañarse de una estimación de su certidumbre (intervalos de confianza) (Olofsson, 2014).

En primer lugar, los totales de fila de la matriz dan las proporciones del área mapeada y en las columnas se dan las proporciones de área estimadas de acuerdo con los datos de referencia, esto se multiplica por el área total del mapa y se obtiene la estimación del área estratificada de cada clase de acuerdo con la referencia de datos. (Olofsson, 2014)

El siguiente paso es estimar el intervalo de confianza para el área de cada clase y el margen de error de la confianza, así se obtiene el intervalo de confianza del área estimada. En términos generales una vez obtenida la matriz de confusión es sencilla evaluar la precisión, estimar el área y los intervalos de confianza del área de las clases de un mapa.

En esta metodología no sólo es importante estimar el área de cambio sino también la estimación de la precisión para el muestreo estratificado al azar. Olofsson señala que más allá del propósito de cuantificar la precisión del mapa, la muestra de referencia sirve como base de estimaciones de área de cada clase donde el área está definida por la clasificación de referencia, los datos recabados de la muestra de evaluación de la precisión también contribuyen a las estimaciones de certeza de las estimaciones de área, sin esta evaluación de precisión no hay manera de comunicar la calidad del mapa cuantitativamente.

### **Conclusiones al capítulo**

En el presente capítulo se hizo una revisión a la metodología empleada en la investigación desarrollada, así como los materiales empleados. Además, se incorporó una revisión bibliométrica sobre el estudio de la confiabilidad cartográfica en México, con el fin de enfatizar los vacíos existentes sobre el tema desde múltiples perspectivas como son los casos de estudio, el tipo de materiales/insumos empleados, la temporalidad y periodos analizados.

En cuanto a la metodología, el principal propósito fue detallar el proceso seguido en dos sentidos; la técnica de muestreo empleada con todas las subetapas que la integran y la metodología concerniente a la evaluación de la confiabilidad de la cartografía temática. Es importante tener en cuenta los errores a los que está expuesta la cartografía y la importancia de su evaluación como una contribución para verificar y mejorar la confiabilidad de los mapas generados, particularmente en la temática de los recursos naturales, que tiene múltiples aplicaciones hoy en día.

En otro apartado se presentan de forma precisa los insumos requeridos para la investigación y que conciernen a las fotografías aéreas, imágenes de satélite y productos cartográficos empleados en la evaluación.

Este capítulo expone todas las características técnicas y elementos considerados en la evaluación y los resultados de la investigación y que serán expuesto en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 3.

### RESULTADOS

#### *EVALUACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL*

Este capítulo se estructura en tres apartados, el primero corresponde a las generalidades de la zona de estudio, el segundo a la temática que aborda la tesis referida a la aplicación de la metodología de evaluación de la confiabilidad cartográfica realizada a tres productos y, por último, se esboza un análisis de los principales hallazgos encontrados al realizar una comparativa entre los resultados de estas tres.

En este capítulo se detalla el principal aporte de la investigación desarrollada y corresponde a la evaluación de la cartografía de cambio de cobertura forestal, que fue aplicada desde dos escalas distintas: en primer lugar el trabajo desarrollado por Hansen al ser en formato raster el tamaño de pixel es de 30 m que sirve de referencia para trabajar a una escala máxima de 1:50 000, en segundo lugar el propuesto por el autor de la presente investigación, en el mismo formato para una escala máxima 1:10 000, analizando el periodo de 2003-2011.

#### **3.1 Mapa de cambio del proyecto Global Forest Cover Change (GFCC)**

El proyecto GFCC es el resultado del análisis de una serie de tiempo de imágenes Landsat, el cual tiene como finalidad caracterizar el cambio de la cobertura forestal a una escala global. La serie de tiempo analizada data del año 2000 al 2016, asimismo el proyecto ofrece un producto de densidad de cobertura forestal para el año 2000, con lo que se tiene un referente espacial de comparación del estado inicial de la cubierta forestal.

Para definir la categoría de pérdida forestal en el mapa de cambio forestal para el proyecto GFCC se tomaron en consideración los pixeles que presentaban cambio, esto para el periodo de tiempo de los años 2003 y 2011, mientras la clase de permanencia forestal y permanencia no forestal se obtuvo mediante la comparación del mapa de cambio forestal y el de densidad forestal, es decir los pixeles que presentaran un valor por arriba del 10% de densidad forestal<sup>14</sup> fueron caracterizados como áreas “Forestal 2000”, mientras los que no alcanzan esta proporción se caracterizaron como áreas “No Forestal 2000”.

De este modo se obtuvieron tres categorías de cambio con las siguientes proporciones:

---

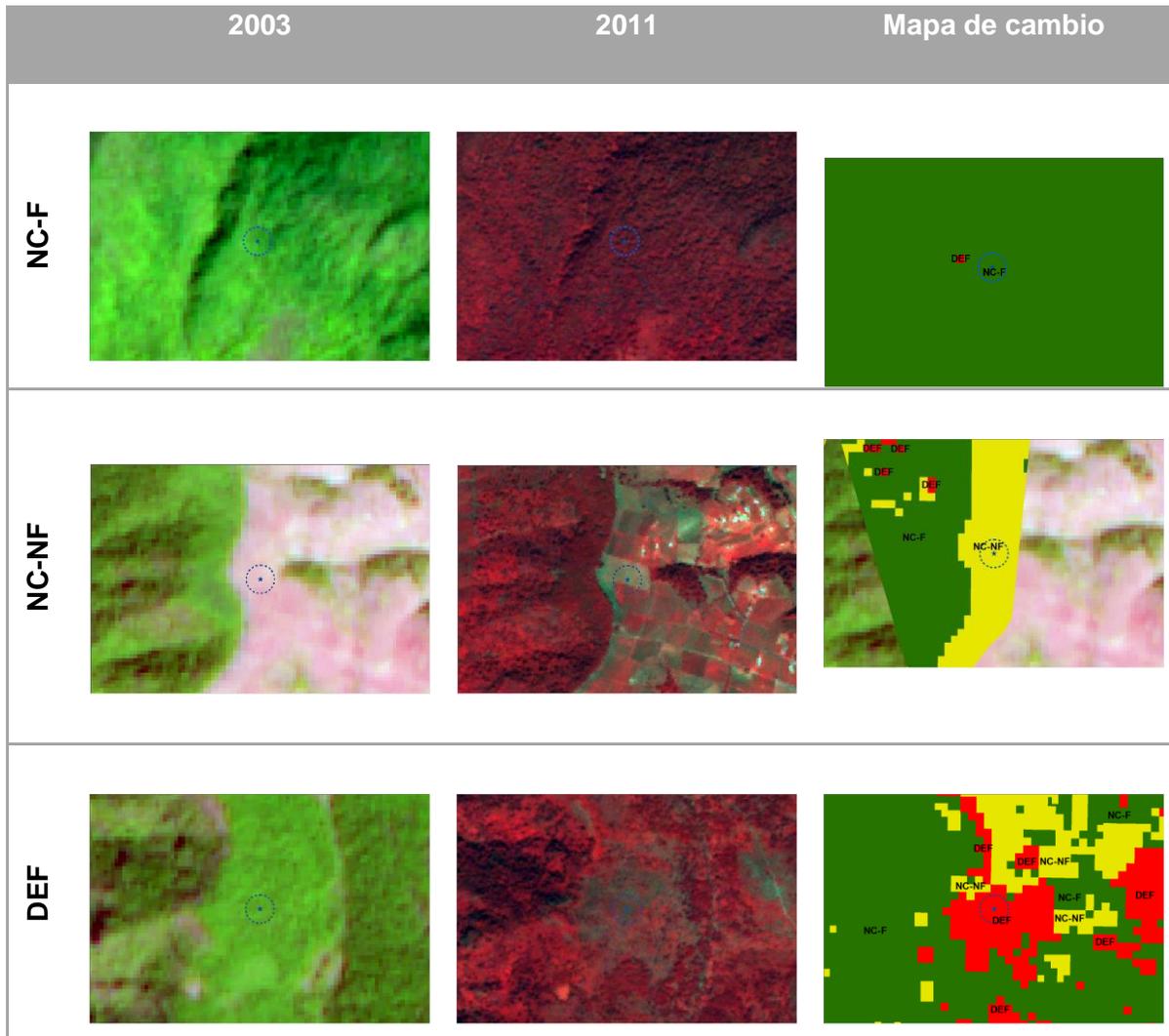
<sup>14</sup> De acuerdo al concepto de bosque planteado por la FAO el cual hace referencia a la densidad necesaria de ocupación de un conjunto de árboles para denominarse bosque

1. NC-NF (No Cambio-No Forestal): se refiere a la categoría de permanencia no forestal y que tiene una extensión de 7.64% (1,030 ha).
2. NC-F (No Cambio-Forestal): hace referencia a la cobertura de permanencia forestal y representa el 91.02% (12,267 ha) del área de estudio.
3. DEF (Deforestación): se refiere a la cobertura de pérdida forestal y representa la categoría más escasa del mapa con sólo 1.34% (180 +ha).

Una vez definidas las clases del mapa se realizó un muestreo aleatorio estratificado, tomando como estratos las tres categorías del mapa (NC-NF, NC-F y DEF); dicho muestreo consideró 400 sitios (Figura 3.4).

Como parte del material para el protocolo de verificación se utilizaron imágenes ASTER para el año 2003 y RapidEye para el año 2011. Se identificaron sitios de muestreo por clase que se consideran aciertos y se ejemplifican en la Figura 3.1. El primer ejemplo muestra un acierto para la clase de permanencia forestal, el segundo ejemplo hace referencia al acierto en una clase de permanencia no forestal, mientras el tercer ejemplo representa un acierto para la clase de deforestación.

**FIGURA 3.1 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ACIERTO PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC**



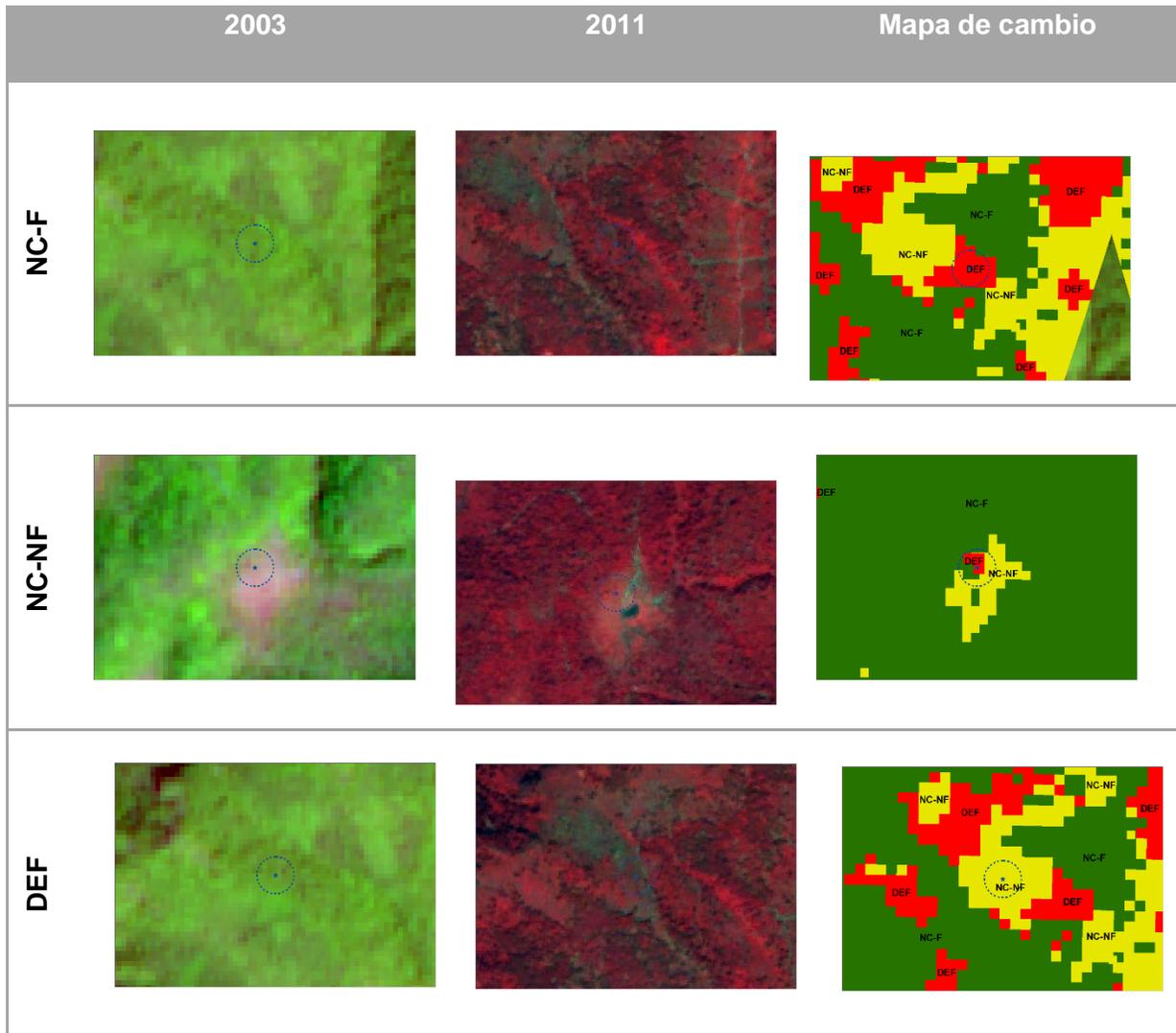
Fuente: elaboración propia con base en Hansen,2013

Al no existir concordancia con la clase de cambio del mapa y lo que se presenta en la interpretación visual en las imágenes satelitales para las fechas analizadas se identifica como error de clasificación del mapa evaluado. En la Figura 3.2 se ejemplifican algunos errores encontrados en la clasificación del mapa de cambio del GFCC.

En el primer ejemplo se identifica un sitio de muestreo que se clasifica en la interpretación visual con la clase NC-F, mientras en mapa de cambio lo clasifica como DEF, para el segundo ejemplo la clasificación en la interpretación visual identifica un área de la clase NC-NF mientras el mapa reporta que en ese sitio existe la clase DEF, para ninguno de estos dos casos hay evidencias de áreas deforestadas en la interpretación visual así como en áreas adyacentes, por lo que se pueden definir como errores de clasificación en el mapa de cambio de GFCC. Por último, se

presenta un ejemplo donde la interpretación visual identifica una zona con la clase DEF mientras que el mapa reporta que para este sitio se presenta la clase NC-NF.

**FIGURA 3.2 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ERROR PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DE GFCC**



Fuente: elaboración propia con base en Hansen,2013

Una vez concluido el protocolo de verificación se analizó estadísticamente la confiabilidad del mapa. En el Cuadro 3.1 se representa la matriz de confusión derivada de los aciertos y errores en la interpretación visual de los sitios de muestreo.

**CUADRO 3.1 MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC**

<b>Sitios/Mapa</b>	<b>NC-NF</b>	<b>NC-F</b>	<b>DEF</b>
<b>NC-NF</b>	129	7	8
<b>NC-F</b>	19	143	9
<b>DEF</b>	2	0	83
<b>Suma</b>	150	150	100

Fuente: elaboración propia

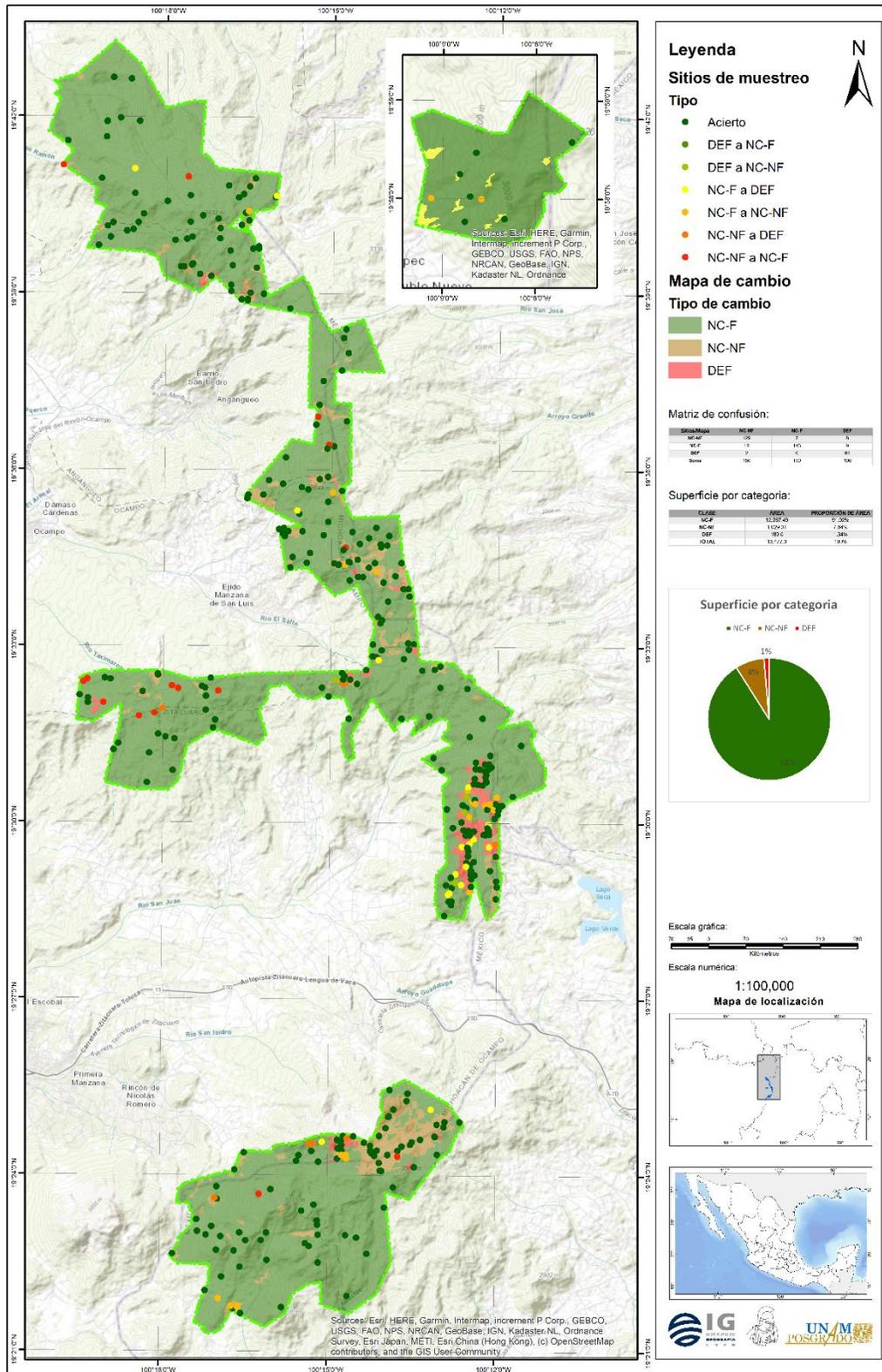
Debido al tipo de muestreo que se realizó, donde se asignaron el mismo número de sitios por clase, éstas están representadas en un 33.3%. No obstante, las áreas que cubre cada clase representan un porcentaje muy diferente entre sí. Es por ello que, para evitar sesgos de sobrerrepresentación de las clases con menor superficie, fue necesario aplicar las correcciones de Card. Es así como en la matriz corregida representada en el Cuadro 3.2 la suma de las filas de cada clase será igual a la proporción de área de cada categoría del mapa. Con base en la matriz corregida se calcula el índice de fiabilidad.

**CUADRO 3.2 MATRIZ DE CONFUSIÓN CORREGIDA MEDIANTE EL MÉTODO DE CARD PARA EL MAPA DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL**

<b>Sitios/Mapa</b>	<b>NC-NF</b>	<b>NC-F</b>	<b>DEF</b>
<b>NC-NF</b>	6.568	4.248	0.107
<b>NC-F</b>	0.967	86.776	0.121
<b>DEF</b>	0.102	0	1.112
<b>Suma</b>	7.637	91.023	1.339

Fuente: elaboración propia

**FIGURA 3.3.3 1 MAPA DE CAMBIO Y MUESTREO ESTRATIFICADO DEL CFCC**



Fuente: elaboración propia con base en Hansen,2013

Sí bien, el índice de confiabilidad global para el mapa de cambio de GFCC es de 94.46 %, cada categoría del mapa presenta índices de confiabilidad diferentes, para la clase de permanencia forestal se obtiene una mayor confiabilidad para el usuario con respecto a las otras categorías al alcanzar el 95.33 % de confiabilidad, mientras la clase de deforestación es donde se identifica mayor error ya que la confiabilidad del usuario alcanza el 83.00 %.

El medio intervalo de confianza global para el mapa de cambio de cobertura forestal es de  $\pm 1.78\%$  mientras los índices de confiabilidad y medios intervalos de confianza para productor y usuario se presentan en el Cuadro 3.3.

**CUADRO 3.3 ÍNDICES DE FIABILIDAD Y MEDIOS INTERVALOS DE CONFIANZA POR CLASE PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC**

USUARIO	FIABILIDAD		MEDIO INTERVALO DE CONFIANZA
NC-NF	86.00%	±	8.61%
NC-F	95.33%	±	0.22%
DEF	83.00%	±	6.30%
<b>PRODUCTOR</b>	<b>Fiabilidad</b>		<b>Medio intervalo de confianza</b>
NC-NF	60.13%	±	4.84%
NC-F	98.76%	±	1.71%
DEF	91.61%	±	17.79%

Fuente: elaboración propia

### 3.1.1 Corrección de las superficies derivadas del mapa de GFCC

A través de la matriz de confusión se pueden calcular áreas ajustadas tomando en cuenta los errores cartográficos del mapa; esto nos permitirá identificar y corregir las clases subestimadas o sobrestimadas en el mapa y con esto obtener superficies estadísticamente más confiables.

De acuerdo con las estimaciones de área sobre los errores cartográficos, la clase NC-NF está siendo subestimada por el mapa de cambio de GFCC ya que éste reporta una superficie de 1,029 ha., mientras con los cálculos de corrección de acuerdo con el cuadro 3.4 se ajusta a 1,472 ha., con un intervalo de confianza de 442 ha. En tanto que, la clase de NC-F está siendo sobreestimada, ya que se reportan 12,267 ha., mientras con el estimador de área se calculan 11,841 ha con un intervalo de confianza de 425 ha. La clase DEF reporta 180 ha en el mapa de

cambio de GFCC mientras con las correcciones del estimador de área se calculan 163 ha con un intervalo de confianza de 17 ha lo que denota una sobreestimación de dicha categoría.

**CUADRO 3.4 ESTIMACIÓN DE LAS SUPERFICIES, INTERVALOS DE CONFIANZA PROPORCIONES DE ÁREA DE LAS CLASES DESPUÉS DE LAS CORRECCIONES EN LOS ERRORES DE CLASIFICACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DEL GFCC**

CLASE	ÁREA	PROPORCIÓN DE ÁREA	ÁREAS CORREGIDAS	PROPORCIÓN DE ÁREA CORREGIDA	INTERVALO DE CONFIANZA
<b>NC-NF</b>	1,029.31	7.64%	1,472.13	10.92%	± 708.51
<b>NC-F</b>	12,267.49	91.02%	11,841.63	87.86%	± 681.37
<b>DEF</b>	180.50	1.34%	163.54	1.21%	± 27.14
<b>TOTAL</b>	13,477.30	100%	13,477.30	100%	

Fuente: elaboración propia

### 3.2 Mapa de cambio Molina, 2017

En el marco de la temática de evaluación de confiabilidad cartográfica, se desarrolló una propuesta que consolida el título de la presente investigación, orientada a aplicarse con un enfoque multiescala.

La última de ellas y detallada en el presente apartado, es la propuesta por el autor, la escala es una intermedia entre las ya desarrolladas y corresponde a la escala 1:10 000.

Para construir este mapa se generaron mosaicos de imágenes satelitales SPOT para 2003 y RapidEye para 2012, se clasificaron mediante el método no supervisado ISODATA, se agruparon las clases identificadas como vegetación forestal; el mismo ejercicio se realizó para categorías identificadas como no forestales, agrupando clases como suelos desnudos, cuerpos de agua, áreas agrícolas y localidades. Con este método se obtuvo un mapa binario donde se representaba la presencia o la ausencia de bosque, tomando como referencia el concepto de bosque definido por la FAO.

Posteriormente, se generó una intersección espacial entre ambos mapas creados para calcular los cambios que hubo en el periodo analizado. Cabe destacar que utilizó como área mínima cartografiable la unidad de una hectárea, con lo cual se obtiene un mapa escala máxima 1:10,000. Una vez analizados los cambios del mapa se derivaron las tres categorías de cambio homologadas para los tres productos; permanencia forestal (NC-F), permanencia no forestal (NC-NF) y deforestación (DEF).

A continuación, se presentan las proporciones de superficie para cada categoría:

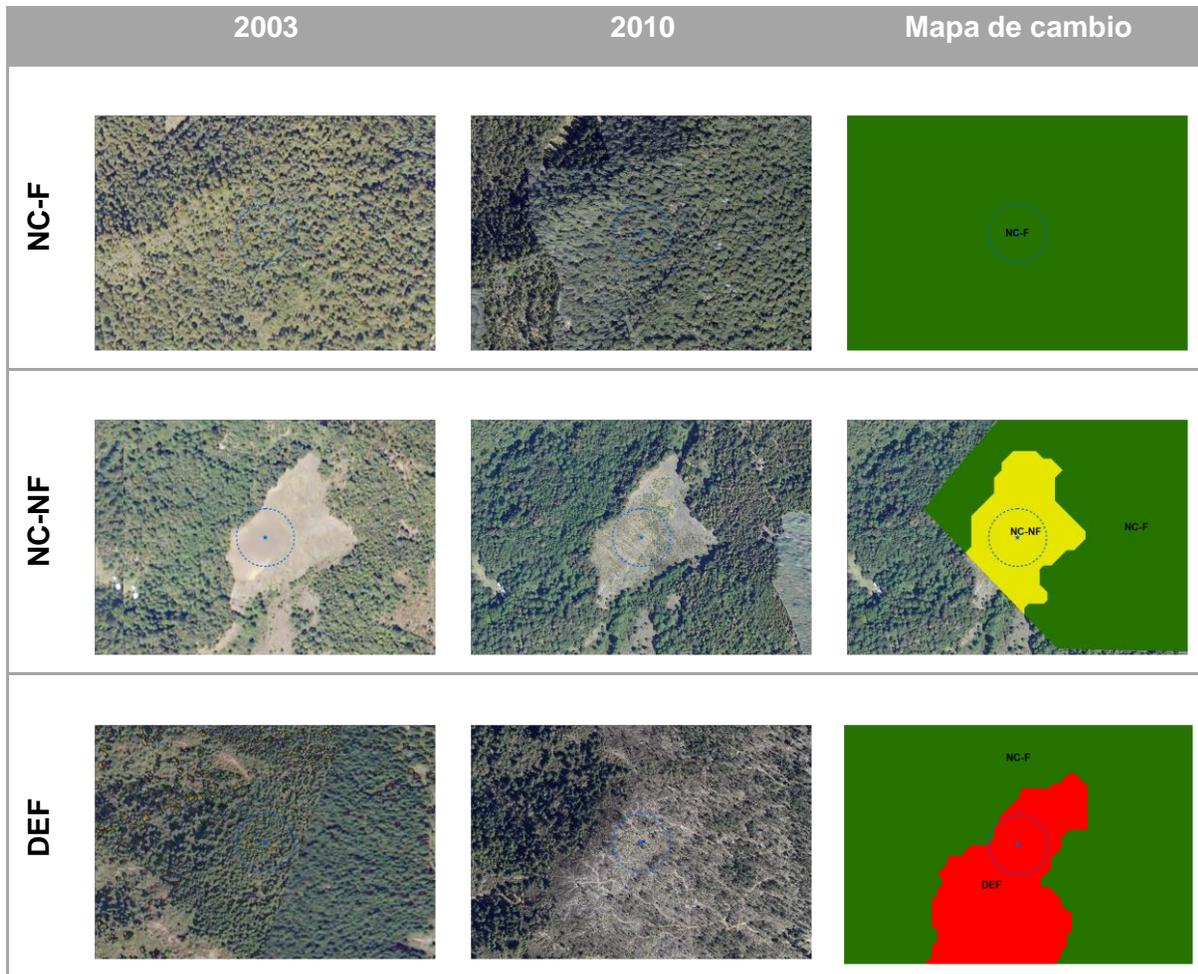
1. NC-F para permanencia forestal, la cual representa la clase más abundante del mapa con 89.68% (12,155.82 ha) de la superficie total del mapa
2. NC-NF para permanencia no forestal la cual se distribuye en el 7.68% (1,040 ha) del mapa
3. DEF para pérdida forestal esta categoría es representa el 2.65% (359 ha) de la superficie.

Siendo consistentes con la metodología aplicada en los 2 casos de evaluación, una vez definidas las tres clases del mapa se realizó un muestreo aleatorio estratificado, tomando como estratos las categorías del mapa (NC-NF, NC-F y DEF); dicho muestreo constó de 400 sitios.

Como parte del material para el protocolo de verificación se utilizaron mosaicos de ortofotos para el año 2003 y 2010; este último año representó el insumo disponible de alta resolución más cercano en temporalidad al año de referencia del mapa de cambio *Molina 2017*, que fue 2011. Se identificaron sitios de muestreo por clase que se consideran aciertos y se ejemplifican en la Figura 3.3

En el primer ejemplo de muestra un sitio con acierto para permanencia forestal, el segundo ejemplo presenta un sitio con acierto para permanencia no forestal mientras el tercer sitio lo hace para la categoría de deforestación.

**FIGURA 3.4 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ACIERTO PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA, 2017**

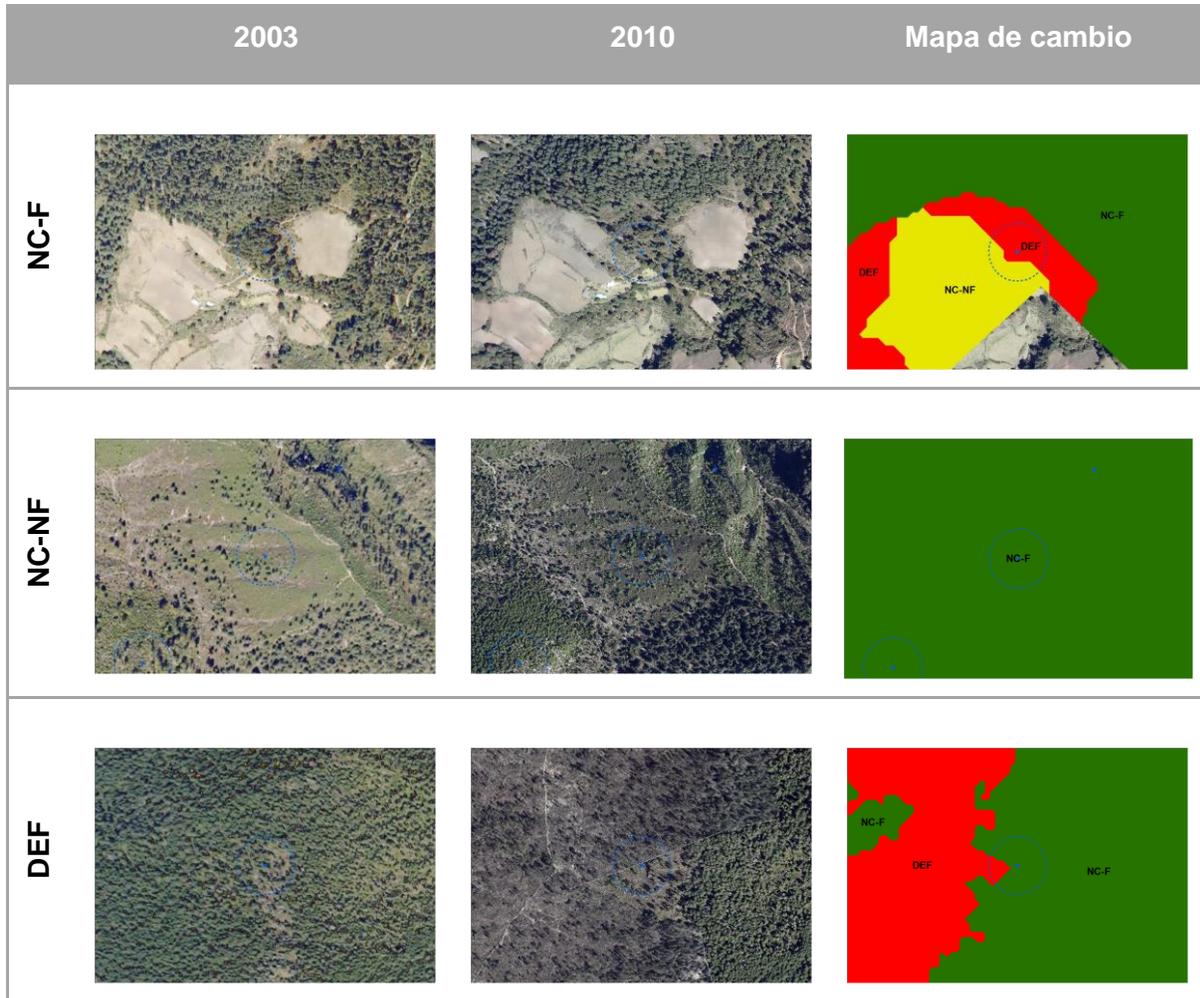


Fuente: elaboración propia con base en Molina, 2017

En términos de los errores encontrados, se señalan al igual que para los casos anteriores, 3 ejemplos y se detallan en la Figura 3.4.

En el primer ejemplo se identifica un sitio de muestreo que se clasifica en la interpretación visual con la clase permanencia forestal, mientras en mapa de cambio lo clasifica como deforestada, para el segundo ejemplo la clasificación en la interpretación visual identifica un área de la clase permanencia no forestal, mientras el mapa reporta que en ese sitio existe la clase de permanencia forestal. Por último, se presenta un ejemplo donde la interpretación visual identifica una zona con la clase deforestación evidente mientras el mapa reporta que para este sitio de muestreo se presenta la clase de permanencia no forestal.

**FIGURA 3.5 EJEMPLO DE VALIDACIÓN CON ERROR PARA CADA CLASE DEL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA, 2017**



Fuente: elaboración propia con base en Molina, 2017

En el Cuadro 3.5 se representa la matriz de confusión derivada de los aciertos y errores en la interpretación visual de los sitios de muestreo, producto del análisis estadístico de la confiabilidad del mapa.

**CUADRO 3.5 MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA (2017)**

<i>Mapa\Sitios</i>	<i>NC-NF</i>	<i>NC-F</i>	<i>DEF</i>
<i>NC-NF</i>	136	11	7
<i>NC-F</i>	12	137	13
<i>DEF</i>	2	2	80
<i>Suma</i>	150	150	100

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta el muestreo realizado, el número de sitios por clase no es proporcional a la superficie que cada una de las categorías presenta en el mapa fue necesario aplicar las correcciones de Card, cuyo propósito consistió en evitar sesgos de sobrerrepresentación de las clases con menor superficie. Esta matriz corregida se representa en el Cuadro 3.9 y donde la suma de las columnas de cada clase es igual a la proporción de área de cada categoría del mapa. Con base en la matriz corregida se calcula el índice de fiabilidad.

**CUADRO 3.6 MATRIZ DE CONFUSIÓN CORREGIDA MEDIANTE EL MÉTODO DE CARD PARA EL MAPA DE CAMBIO FORESTAL DE MOLINA, 2017.**

<i>Sitios/Mapa</i>	<i>NC-NF</i>	<i>NC-F</i>	<i>DEF</i>
<i>NC-NF</i>	6.96	6.58	0.19
<i>NC-F</i>	0.61	81.9	0.34
<i>DEF</i>	0.1	1.2	2.12
<i>Suma</i>	7.68	89.68	2.65

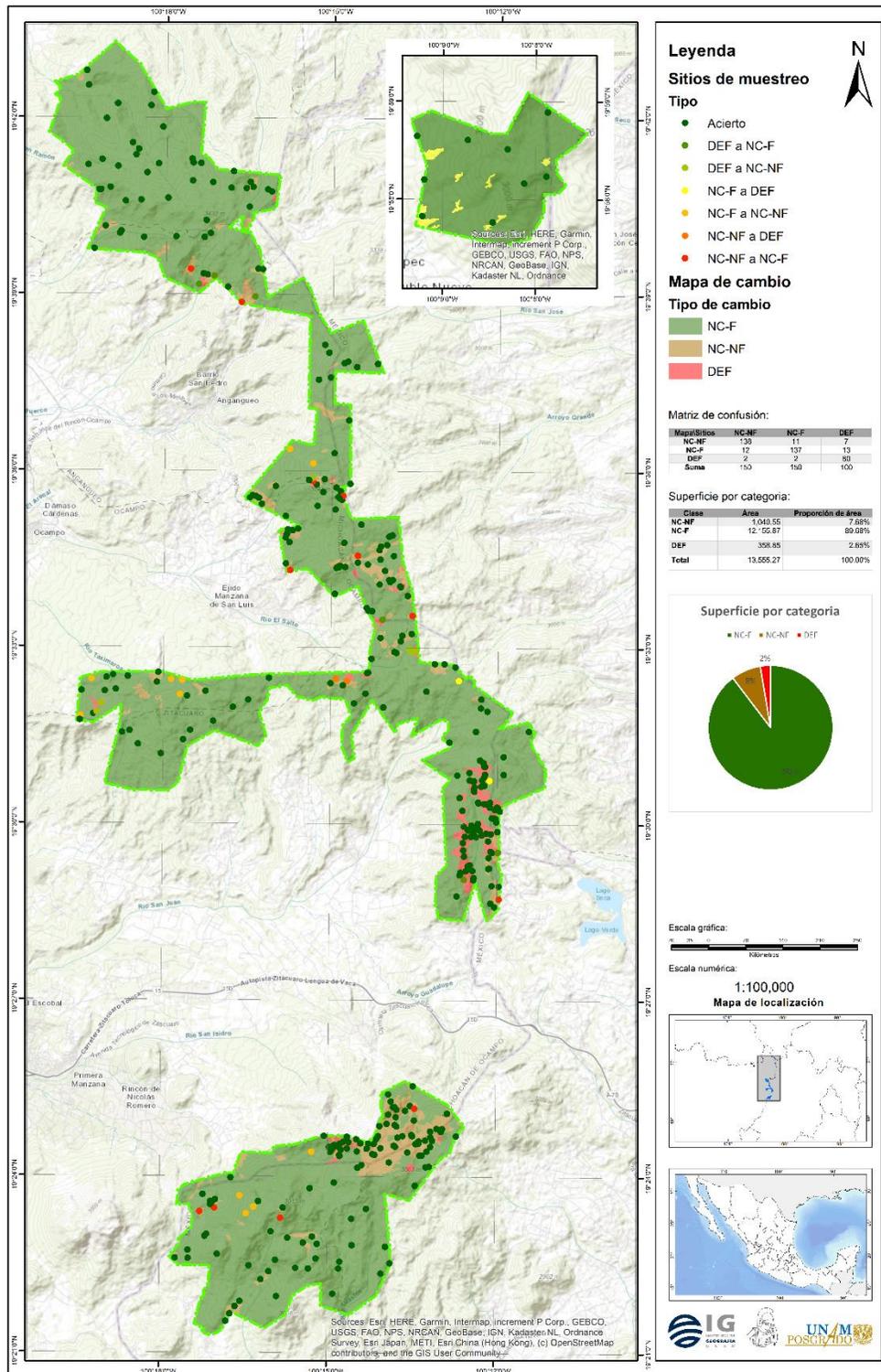
Fuente: elaboración propia

En términos de confiabilidad el índice global para el mapa propuesto por Molina es de 90.98%, aunque cada categoría del mapa presenta índices de confiabilidad diferentes, es así que para la clase de permanencia forestal se obtiene una mayor confiabilidad para el usuario con respecto a las otras categorías al alcanzar el 91.33% de confiabilidad, mientras la clase de deforestación es donde se identifica el menor índice de confiabilidad para el usuario con 80.00%

El medio intervalo de confianza global para el mapa de cambio de cobertura forestal es de  $\pm 1.82\%$  mientras los índices de fiabilidad y medios intervalos de confianza para productor y usuario se presentan en el Cuadro 3..10

Figura 3.6 Mapa de cambio de cobertura forestal de *Molina*, 2017 y muestreo aleatorio estratificado para su evaluación

**FIGURA 3.6 MAPA DE CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL DE MOLINA, 2017 Y MUESTREO ALEATORIO ESTRATIFICADO PARA SU EVALUACIÓN**



Fuente: elaboración propia con base en Molina, 2017

**CUADRO 3.7 ÍNDICES DE FIABILIDAD Y MEDIOS INTERVALOS DE CONFIANZA POR CLASE PARA EL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA, 2017**

USUARIO	FIABILIDAD		MEDIO INTERVALO DE CONFIANZA
NC-NF	90.67%	±	8.78%
NC-F	91.33%	±	0.22%
DEF	80.00%	±	3.85%
<b>PRODUCTOR</b>	<b>Fiabilidad</b>		<b>Medio intervalo de confianza</b>
NC-NF	50.72%	±	4.32%
NC-F	98.84%	±	1.76%
DEF	62.00%	±	10.60%

Fuente: elaboración propia

### 3.2.1 Corrección de las superficies derivadas del mapa de Molina, 2017

La categoría de permanencia no forestal presenta un alto grado de subestimación ya que en la corrección de superficies derivadas de la matriz de confusión aumenta más de seis puntos porcentuales con un intervalo de confianza de 1,311.09 ha, mientras la categoría de permanencia forestal está siendo sobrestimada ya que disminuye su proporción alrededor del 11% con un intervalo de confianza de 1,477.78 ha. La categoría de deforestación de acuerdo con las correcciones derivadas de la matriz presenta cierto grado de subestimación aumentando su superficie en 166.69 ha.

**CUADRO 3.8 ESTIMACIÓN DE LAS SUPERFICIES, INTERVALOS DE CONFIANZA Y PROPORCIONES DE ÁREA DE LAS CLASES DESPUÉS DE LAS CORRECCIONES EN LOS ERRORES DE CLASIFICACIÓN PARA EL MAPA DE CAMBIO DE MOLINA, 2017.**

CLASE	ÁREA	PROPORCIÓN DE ÁREA	ÁREAS CORREGIDAS	PROPORCIÓN DE ÁREA CORREGIDA	INTERVALO DE CONFIANZA
NC-NF	1,040.55	7.68%	1,859.98	13.72%	± 1,311.09
NC-F	12,155.87	89.68%	11,232.26	82.86%	± 1,477.78
DEF	358.85	2.65%	463.03	2.9%	± 166.69
<b>TOTAL</b>	<b>13,555.27</b>	<b>100%</b>	<b>13,555.27</b>	<b>100%</b>	

Fuente: elaboración propia

## Discusión

El estudio de la confiabilidad cartográfica es relativamente reciente, en México aún son pocas las investigaciones realizadas, pero todas ellas se han desarrollado empleando la misma metodología. Sin embargo, existe un creciente interés por incorporar nuevas técnicas que permitan robustecer la metodología.

Los trabajos realizados sobre el cambio de uso de suelo en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca son de gran importancia, en tres dimensiones: contar con un inventario, monitoreo y analizar los procesos y fenómenos que en ella tienen lugar, estas características ponen en evidencia la necesidad de incorporar una metodología de evaluación de los mapas de cambio generados.

En este sentido, es necesario aclarar que la presente investigación se enfoca en la evaluación de dos productos cartográficos sin considerar de forma principal el fenómeno del cambio de uso de suelo, sino como una metodología relevante para su estudio.

Particularmente esta investigación presenta aportaciones a la propia metodología a través de la incorporación de la herramienta de estimadores de área, con los cuales se puede identificar la subestimación o sobreestimación de superficies de una categoría de acuerdo a la proporción de errores que se identifican en la matriz de confusión para cada categoría del mapa.

Mediante la evaluación de los productos cartográficos fueron obtenidos, el Índice Global de Confiabilidad, los índices por clase y los estimadores de área por clase.

En primer lugar, en cuanto al *Índice Global de Confiabilidad*; se encontró una confiabilidad superior al 90%, lo que, de acuerdo con los estándares establecidos, en la literatura revisada es un resultado óptimo; en términos comparativos, el mapa de GFCC tuvo un mejor índice de confiabilidad cartográfico a pesar de haber sido elaborado con una resolución espacial menor que el de Molina. Esto puede explicarse porque el mapa de GFCC se basa en el procesamiento de una serie temporal de imágenes satelitales, lo que permite disponer de un monitoreo espacio-temporal más efectivo. En tanto que, el mapa de Molina considera solo dos temporalidades, perdiendo la información entre los periodos analizados.

En segundo lugar, en cuanto a los índices por clase referido al comparativo por categorías, destacan que la categoría NC-NF tiene una mayor fiabilidad en el mapa de Molina, debido a que se tuvieron más errores en GFCC en la categoría NC-NF, lo que puede interpretarse como errores de borde, debido a los sitios que caen en los límites de una categoría y el etiquetado es erróneo. Esto se explica por la diferente resolución de ambos productos, ya que en el mapa GFCC al tener píxeles de mayor tamaño se puede incrementar la incidencia de errores de borde.

La clase NC-F tiene mayor fiabilidad en el mapa de GFCC, aunque tiene una alta incidencia de errores en la clase NC-NF con 19 errores detectados. En el mapa de Molina los errores son de 12 y 13 para la clase NC-NF y DEF respectivamente. Por último, la categoría DEF tiene una

mayor confiabilidad en el mapa GFCC, aunque también presenta un mayor medio intervalo de confianza.

En tercer lugar, referido a los estimadores de área, una de las ventajas de la matriz de error es poder ajustar superficies tomando como referencia los errores reportados en cada categoría, este método permitió ajustar las superficies por clase, para la categoría NC-NF en el mapa GFCC se hizo un ajuste poco más 400 Ha agregadas a esta categoría, en tanto que en el mapa de Molina se agregaron más de 800 Ha a esta categoría, estos datos refieren que la categoría NC-NF estaba subestimada en ambos productos en un orden de magnitud de 3 a 6 puntos porcentuales del total de la superficie analizada.

En relación a la clase NC-F, a esta categoría se le restaron alrededor de 400 Ha en el mapa GFCC, mientras que en el mapa de Molina se restaron 900 Ha aproximadamente, con esto se puede inferir que esta categoría fue sobreestimada en ambos productos, en un orden de magnitud de 4 a 7 por ciento del total de la superficie analizada.

En cuanto a la clase DEF, fueron restadas alrededor de 17 Ha para el mapa de Hansen y 100 Ha fueron sumadas para el mapa de Molina; en este sentido el mapa de Hansen estaba sobreestimando la deforestación en tanto que Molina la subestimó.

Es importante resaltar que el mapa de Hansen a pesar de que en términos globales su confiabilidad es buena esto puede deberse al insumo de verificación empleado, con el insumo de verificación de alta resolución espacial no se logra tener una verificación adecuada del sitio de muestreo debido a problemas técnicos como puede ser la saturación del pixel; en tanto que la deforestación fue subestimada, debido a que el mapa de Molina (2017) como el mapa de López mencionado en los antecedentes, reportan una mayor deforestación cerca de 500 hectáreas en el mapa de Molina y más de 1000 hectáreas en el mapa de López, ambos productos fueron generados a partir de insumos de alta y muy alta resolución respectivamente, lógicamente la resolución espacial del insumo empleado influye sobre la detección de áreas deforestadas específicamente en la zona de estudio.

## CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación se mantuvo claro el enfoque de la importancia y la necesidad de emplear el método de validación cartográfica, pues éste permite confrontar la información que se plasma en los mapas con la realidad que se representa, lo que promueve una mejora en los procesos de representación cartográfica así como todas las etapas que trae consigo y que comprende desde los métodos de obtención, el manejo de la información hasta la clasificación de los datos, todo esto con la finalidad de garantizar que la información vertida en la cartografía goza de confiabilidad.

La fiabilidad del mapa se basa en la metodología adoptada y en la calidad de la información sobre la cual ésta es aplicada. Hay que tener en cuenta que la interpretación visual implica un mayor grado de supervisión que el de tratamiento digital de imágenes, la exactitud de uno u otro también ésta influida por los recursos externos como la experiencia del interpretador o la calidad del equipo disponible.

Esta confiabilidad tiene la facultad de poder ser estimada en un ámbito donde tanto como productor y como usuario se conozca el porcentaje de confiabilidad que guarda cada mapa por clase, el conocer estos porcentajes permite identificar cuáles son las clases que aportan los porcentajes más altos de correspondencia con la realidad en términos de la confiabilidad global; aunque el segundo aspecto que ofrece mayor rigor a la metodología es la importancia de la matriz de confusión resultantes de la validación; ambos son elementos fundamentales para evitar o reducir las sobreestimaciones o subestimaciones que tienden a ocurrir.

Por otra parte, es importante destacar que la aplicación de la técnica de lógica difusa como parte del proceso de verificación fue fundamental para identificar la situación real en áreas de posible cambio, como es el caso de áreas donde se detectó pérdida de cobertura forestal y áreas reforestadas.

Si bien es cierto que la metodología de evaluación es muy completa, también es necesario mencionar que tiene ciertas limitaciones. Es así como se concluye que la medición de deforestación es significativamente diferente entre los dos ejercicios; la deforestación está estimada en 463+-104 ha cuando se mide a 100 m de resolución (Molina), significativamente mayor que cuando se mide a 30 m de resolución (163 +- 17ha, GFCC). Sorprende este resultado en una zona en donde se tendería a pensar que la tala selectiva podría ser un factor de detección de mayor deforestación a mayor resolución. Una posible explicación a esta discrepancia es una limitación de este estudio relacionada con la definición de bosque (de 10% de cobertura arbórea

en un pixel) que posiblemente la clasificación espectral (con criterios distintos en Molina, una sola fecha, que en GFCC, series de imágenes Landsat) no logra tomar en cuenta de forma consistente entre los productos. Así, dependiendo del criterio del experto encargado de realizar la clasificación digital, puede resultar una medición significativamente distinta de deforestación.

Una limitación del estudio que matiza el análisis arriba expuesto es el insuficiente tamaño de muestra para la clase dominante No Cambio No Bosque que puede resultar en estimaciones imprecisas (véase Olofsson *et al.*, 2013). Desgraciadamente, por limitación de recursos humanos se tuvo que limitar el tamaño de muestras total a 400 sitios y no se pudo atender a las recomendaciones expuestas en Olofsson *et al.* (2013).

En esta tesis se realizan aportaciones en dos sentidos, el primero al presentar un marco teórico sobre un tema poco desarrollado en la geografía y que es de gran relevancia como se menciona a lo largo de la investigación y, en segundo lugar, al aplicar la metodología que además analiza dos productos cartográficos y que permite no sólo identificar sus características y diferencias sino también detectar los errores más comunes y que tienden a ser omitidos, pese a que de su discusión depende la calidad y mejora en productos futuros y, dentro de este mismo aspecto, destaca la elaboración de un mapa generado por el autor; lo que más allá de tener como propósito evidenciar diferencias entre los mapas analizados busca ofrecer un análisis espacio-temporal del cambio de cobertura forestal en una zona de estudio que desde hace décadas hace frente a importantes procesos de cambio y que a nivel ecosistémico es de gran relevancia.

Específicamente en México, todos los mapas generados y los productos que de ellos se han desprendido no han sido validados estadísticamente. Sobre todo, teniendo en cuenta la riqueza forestal de México y el uso de sus recursos naturales, es necesario difundir esta metodología como un paso necesario para toda la cartografía que se genera con esta temática.

La utilidad de la evaluación de confiabilidad cartográfica debe permear a todas las instituciones encargadas del monitoreo de la cobertura vegetal a nivel nacional. Se debe prestar especial atención para que todos aquellos proyectos encaminados a la toma de decisiones en este ámbito validen de la misma forma la información que usan de referencia para la aplicación de políticas públicas. En la actualidad desde escalas globales hasta escalas locales la presión ejercida sobre los recursos naturales es cada día mayor, es por ello que la verificación estadística es un instrumento de gran relevancia para todos aquellos proyectos y programas orientados a la conservación de los recursos y el medio natural. Esto puede lograrse mediante la homologación

de metodologías y su estandarización a nivel nacional, así como reducir la flexibilidad que se tiene en las fuentes de información.

Específicamente la presión ejercida sobre los recursos de la Zona de la Reserva de la Mariposa Monarca, ha sido constante incluso posterior a su decreto como ANP, la tala clandestina y el cambio de uso de suelo continua y no parece detenerse, frente a actividades económicas de mayor rentabilidad como es la agricultura y particularmente el cultivo del aguacate. Más allá del activismo social son necesarias acciones desde la política pública y la legislación que garanticen el monitoreo constante de los recursos y el manejo de información de calidad.

Desde la ciencia geográfica es necesario promover el uso de información cartográfica con estimadores robustos de áreas de CUSCV que rinden cuenta de los errores a los que están sujetos los mapas, destacar la importancia de la actualización y el uso de nuevos métodos para su elaboración y evaluación, pero sobre todo la importancia de comenzar a consolidar una línea de investigación que hasta el momento ha parecido ajena a la geografía.

En el capítulo dos se presentó un breve análisis bibliométrico sobre el tema de la confiabilidad a nivel nacional, que pone en evidencia la poca producción en torno al tema, así como los grandes vacíos territoriales en la mayoría del territorio nacional.

La difusión es el medio para que a nivel nacional sea cada vez más recurrente la aplicación de la metodología de confiabilidad sobre todo teniendo en cuenta que la cartografía surge como una de las principales herramientas de la geografía y por ello deben ser garantizados productos confiables para el usuario final y en la toma de decisiones.

## Bibliografía

Abrams, M., Hook S. & B. Ramachandran. (2002). Aster User Handbook version. NASA, Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, California. En: ASTER, [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf). 135 p.; consulta: abril, 2020.

Aspinall, R. y Pearson, D.M. (1995). Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS". En Fisher, P. (ed.), *Innovations in GIS 2*, London: Taylor & Francis.

Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. (2001). "La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp 18-38.

Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. A. y Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, 23(3), 39-60. doi: 10.21829/myb.2017.2331516

Carmel, Y., Denls, . D. J. & Flather , C. . H., 2001. Combining location and classification error sources for estimating multi-temporal database accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(7), pp. 865-872.

del Castillo, A. (3 de febrero, 2020). Muerte de dos defensores prende alerta sobre Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Mongabay Latam, Disponible en: <https://es.mongabay.com/2020/02/homero-gomez-defensor-ambiente-mexico-mariposa-monarca/>

Cincotta, R.P, Winsnewiski, J. y Engelman R. (2000). Human population in the biodiversity hotspots. *Nature*, 404.

Cohen, W.B. & Spies T.A. (1992). Estimation structural attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery. *Remote Sensing of Environment*. 41:1-17.

CONABIO, (2020) ¿Qué es un país megadiverso? En <https://www.conabio.gob.mx/pais/quees.html>

CONAFOR. (2013). Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. SEMARNAT. México. Disponible en:

[http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/4034Gu%C3%ADa%20B%C3%A1sica%20de%20Bosques,%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20y%20REDD\\_%20.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/4034Gu%C3%ADa%20B%C3%A1sica%20de%20Bosques,%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20y%20REDD_%20.pdf)

CONAFOR. (2017). Estrategia Nacional REDD+ México. Disponible en: <http://www.enaredd.gob.mx/wp-content/uploads/2017/09/Estrategia-Nacional-REDD+-2017-2030.pdf>

CONAFOR. (2017). Estrategia Nacional REDD+ <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estrategia-nacional-redd-enaredd>

CONAFOR, (2020). El sector forestal mexicano en cifras. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7749El%20Sector%20Forestal%20Mexicano%20en%20Cifras%202019.pdf>

CONANP, (2001) Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. Disponible en: [http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/pdf/programas\\_manejo/monarca.pdf](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/monarca.pdf)

Chuvieco, E., (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. tercera ed. Madrid: Ediciones Rialp S.A..

Cornejo-Tenorio. G, Casas, A., Farfán, B., Villaseñor, J., e Ibarra, M. G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73. México, pp. 43-62.

Cumming, G.S., Barnes, G., Perz, S., Schmink, M., Sieving, K.E., Southworth, J., Binford, Couturier, S. & Mas, J.-F., (2009). ¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación?. *Investigación ambiental*, Volumen 1 (2), pp. 117-135.

Couturier, S., (2011). Evaluación de la cobertura vegetal en México: aciertos y sesgos del mapa derivado de MODIS. En: J. Mas., ed. *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México: INE-SEMARNAT.

Couturier, S. & Nuñez J.M. 2011. Propuesta metodológica para normar la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México. WWF, CCMSS, TNC, Centro Geo y CIGA UNAM.

Cumming, Graeme S.; Allen, Craig R.; Ban, Natalie C.; Biggs, Duan; Biggs, Harry C.; Cumming, David H. M.; De Vos, Alta; Epstein, Graham; Etienne, Michel; Maciejewski, Kristine; Mathevet, Raphael; Moore, Christine; Nenadovic, Mateja; and Schoon, Michael, "Understanding protected

area resilience: a multi-scale, social-ecological approach" (2015). *Nebraska Cooperative Fish & Wildlife Research Unit* -- Staff Publications. 179. <http://digitalcommons.unl.edu/ncfwrustaff/179>

Diario Oficial de la Federación, 28/05/2014 Acuerdo por el que se determina Información de Interés Nacional el Inventario Nacional Forestal y de Suelos. disponible en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5346488&fecha=28/05/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5346488&fecha=28/05/2014)

---(11 de noviembre 2000). DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Mariposa Monarca, ubicada en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Aporo en el Estado de Michoacán, con una superficie total de 56,259-05-07.275 hectáreas.

---(Diario Oficial de la Federación). (2008). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 28 de enero de 1988, México.

---, (Diario Oficial de la Federación). (2009). DECRETO que modifica el Artículo Primero del diverso por el que se declaró como Área Natural Protegida, con la categoría de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 13 de noviembre de 2009, México.

Durán, R., & Méndez, M. E. (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en *Yucatán*, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, 496.pp

Fahsi A. et al; (2000). Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. *Forest Ecology and Management* 128. 57-64.

FAO. (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2010). La Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2010). Estrategia del Programa ONU-REDD 2011-2015 [https://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/fao56\\_spn\\_0.pdf](https://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/fao56_spn_0.pdf)

FAO (s/f). REDD+ Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques <http://www.fao.org/redd/initiatives/es/>

FAO, FRA (2015). Términos y Definiciones, Documento de trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales No. 180. Roma

Fernandez, T. (2006). Estimación de la confiabilidad en mapas de uso de suelo y vegetación. Tesis de licenciatura: Facultad de Filosofía y Letras, Geografía, UNAM.

Flamenco, A. (2002) Sistemas de Información Geográfica, en *Ecofronteras*, núm. 17.

Forbes Staff. (6 de enero, 2020). Pese a riesgo de extinción, persiste tala en reserva de mariposa monarca. *Forbes*. disponible en: <https://www.forbes.com.mx/pese-a-riesgo-de-extincion-persiste-tala-en-reserva-de-mariposa-monarca/>

Galicia, L., García, A., Gómez & Ramírez. (2007). Cambio de uso de suelo y degradación ambiental, en *Revista de la Academia Mexicana de la Ciencia*, vol. 58 núm. 4 octubre - diciembre 2007

Garza, G. (2003). La urbanización de México en el siglo XX, El Colegio de México, México.

García, M., Luévano, J. & Cueva, H. (2017). La fauna nativa de México en riesgo y la NOM-059: ¿Están todos los que son y son todos los que están?. *Acta zoológica mexicana*, 33(2), 188-198. Recuperado en 18 de junio de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0065-17372017000200188&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372017000200188&lng=es&tlng=es).

Gopal, S., & Woodcock C.E. (1994), "Accuracy of thematic maps using fuzzy sets I: theory and methods", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58:35-46.

Gopal, S., Woodcock C.E. & Strahler, A. (1999), "Fuzzy neural network classification of global land cover from a 1°AVHRR Data Set", *Remote Sensing Environment*, Elsevier Science Inc., New York, 67:203-243.

Graf S., R. González F. (2009). Informe rediseño del Fondo Monarca. México, D.F. pp.14

Green, D. R. y S. Hartley (2000), "Integrating photointerpretation and GIS for vegetation mapping: some issues of error", Alexander, R. y A. C. Millington (eds.), *Vegetation Mapping: From Patch to Planet*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 103-134.

Hammond, T. O. y D. L. Verbyla (1996), "Optimistic bias in classification accuracy assessment", *International Journal Remote Sensing*, 17 (6):1261-1266.

Hay, A. M. (1988), "The derivation of global estimates from a confusion matrix", *International Journal Remote Sensing*, 9(8):1395-1398.

Hord, R. M. y W. Brooner (1976), "Land-use map accuracy criteria", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(5):671-677.

INEGI. (2017). Comunicado de prensa núm. 535/17 Inegi presenta carta de uso de suelo y vegetación serie VI en [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017\\_12\\_01.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017_12_01.pdf)

Janssen, L. F. y F. J. Van der Wel (1994), "Accuracy assessment of satellite derived landcover data, a review", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(4):419-426.

Justice, C.O. et al; (1981). Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. *Int. J. Remote Sensing*. 2(3), 213-230.

Jupp, D. (1989), "The stability of global estimates from confusion matrices", *International Journal Remote Sensing*,10(9):1563-1569.

Khorram, S. (1999), "Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Monograph Series*.

Khorram, S , J Knight, H. Cakir, H. Yan, Z Mao y X. Dai (2000), "Improving estimates of the accuracy of thematic maps when using aerial photos as the ground reference source", *Proceedings of the ASPRS Symposium, Washington, USA*.

Labrador, M., Évora, J.A. & Arbelo, M. (2012), *Satèlites de teledetecció para la gestió del territori*, Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

Lambin, E., et al. (2001) The causes of land use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11:261-269.

Lambin, E. & Geist, H. (2006). *Land Use and Land Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. 16 (01)

Lefsky, M.A et al;(1999). Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir western hemlock forest. *Remote Sensing of Environment*. 70 (3).

Lillesand, T.M., and Kiefer, R.W. (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation* (Somerset, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc..

Lillesand, M., Thomas R. & Chipman J.W. (2004). *Remote sensing imagen interpetation*, 5| ed., John Wiley and Sons, Inc. New York..

López, G. J. (2007) *Análisis de Cambio de la cobertura forestal de la Reserva de la Mariposa Monarca (2006-2007)*. Reporte al Fondo Monarca, México.

López, J. *Análisis de cambios con fotografías aéreas digitales e imágenes de satelite Spot5 en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*, en Quintero, J.A. (2012) *Temas selectos geomática: métodos y aplicaciones*, UNAM: México

Martínez, R. (2014). *Métodos de evaluación de la confiabilidad cartográfica para la cobertura vegetal en México: aplicación a nivel nacional y municipal*. Tesis de licenciatura: Facultad de Filosofía y Letras, Geografía, UNAM.

Maass, e. a., 2003. *Principios básicos de Cartografía y Cartografía automatizada*. primera ed. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

Mas, J, y Couturier, S. (2011). *Evaluación de bases de datos cartográficas*. En F. Bautista (Ed.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (675-703)*. México, D.F., México: Instituto de Geografía-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México.

Mas, J.-F., Reyes, J. & Pérez, A.. (2003). *Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Issue 51, pp. 53-72.

Mendoza, J. & Calvache Ulloa, A. (2004). *B3.-Aplicabilidad de las coordenadas UTM generadas por navegadores GPS en agrimensura con fines de manejo por sitio específico*. Rumipamba. 2004.

Mittermeier, R. A., Goettsch-Mittermeier, C. & Robles-Gil, P. (2005). *Megadiversity: Earth's biologically wealthiest nations*. Cemex, México D. F., 501 pp.

Holt, M. R.D., Stickler, C., y VanHolt, T. (2005). An exploratory framework for the empirical measurement of resilience. *Ecosystems*, 8, pp. 975-987.

Noble, J.L. y Dirzo, R. (1997) Forest as human dominated ecosystem. *Science*. 277:522:525.

OEA (1993) Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado, Organización de Estados Americanos, Washington, D.C.

OECD, (2018) Monitoring Land cover change, 16pp. Disponible en: <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/brochure-land-cover-change.pdf>

Olofsson, P. Foody, G.M., Stehman, S.V. & Woodcock, C.E. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: estimating accuracy and area quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129:122-131.

Oloffson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57.

PAOT. (2002). Vegetación y Uso de suelo, Disponible en: [http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/02\\_Vegetacion/2.2\\_Cambios/index.htm](http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.2_Cambios/index.htm)

Pinilla C. et al; (2000). Unsupervised classifications's optimizacion. *Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications*. Casanova (Ed.), Rotterdam.

Piña, A. (2018). Evaluación de la fiabilidad temática de cartografía de cubierta/uso de suelo del estado de Michoacán. *Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Prado, J. & Peralta, A., Mosaicos ortorectificados generados a partir de fotografías aéreas digitales de pequeño formato, en Quintero, J.A. (2012) *Temas selectos geomática: métodos y aplicaciones*, UNAM: México

Prado, J. & Peralta, A. y López, J. Utilización de imágenes aéreas digitales de alta resolución en la evaluación de recursos naturales, en Quintero, J.A. (2012) *Temas selectos geomática: métodos y aplicaciones*, UNAM: México

Profepa. (2020). Importancia de los Ecosistemas Forestales; Especies de los Bosques y Selvas.

<https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/importancia-de-los-ecosistemas-forestales-especies-de-los-bosques-y-selvas?idiom=es>

Proyecto Global Forest Cover Change (2013). Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org/>

Sabins F. (1996) Remote sensing: Principals and Interpretation, San Francisco: Freeman, 432p.

San Miguel, J. & Biging G. S.; (1997). Comparison of Single-Stage and Multi-Stage Classification Approaches for Cover Type Mapping with TM and SPOT data. Remote Sensing of Environment. 59: 92-104.

SEMARNAT. (2004). Documento estratégico rector del inventario Nacional Forestal y de Suelos.

SEMARNAT. (2018). México: biodiversidad que asombra, Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/mexico-biodiversidad-que-asombra?idiom=es>

SEMARNAT. (2018). Qué es la restauración forestal, <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-restauracion-forestal?idiom=es>

SEMARNAT & CONANP (2018), Plan de Acción para la Conservación de la Mariposa Monarca en México, 2018–2024, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.

Sistema Nacional de Información y gestión Forestal. Disponible en: <https://snigf.cnf.gob.mx/inventario-nacional-forestal/>

Song C. Woodcock, C. Seto, K. Pax & Macomber S., (2018). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?. Remote Sensing of Environment. 75:230-244.

Staub, Guido, & Bähr, Hans-Peter. (2014). Potencial de la percepción remota - estudio basado en desastres naturales ocurridos durante los últimos 5 años en Chile. Boletim de Ciências Geodésicas, 20(1), 204-221. <https://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702014000100013>

Stehman, S.V. (2001). Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67 (6). 727-734

Stehman S.V. & Czaplewski, R. L. (1998). Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. Remote Sensing of Environment , 64(3). 331-344.

Torres, J. (2004) Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020: informe nacional: México.

Vela, M.C. (2016). Evaluación de la confiabilidad para mapas de cobertura forestal y uso de suelo a dos escalas. *Tesis de Licenciatura en Geografía*. Universidad Nacional Autónoma de México

Velázquez, A., Mas, J.F., Palacio, J.L, Díaz, J.R., Mayorga, R, Alcántara, C., Castro R. Y Fernández T. (2002) Análisis de cambio de uso de suelo. Informe técnico: 2002. Convenio INE-IGg (UNAM), Instituto de Geografía, UNAM, 2002.

Velázquez, A. (2008) La dinámica de la cubierta forestal de México, *Revista Mexicana de física*, 01/01 JOUR

Velázquez, A. et al., 2011. Propuesta metodológica para normar la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México. WWF, CCMSS, TNC, Centro Geo y CIGA UNAM. Pese a riesgo de extinción, persiste tala en reserva de mariposa monarca,

Ventura, A., Plascencia, F., Hernández, P., Ángeles, G. & Aldrete., A. (2017) ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino? Una experiencia en el centro de México *Bosque*, vol. 38, núm. 1, 2017, pp. 55-66 Universidad Austral de Chile Valdivia, Chile.

Wookcock, C. & Gopal, S. (2000). Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation. *International Journal Geographical Information Science*, 14 (20), pp- 153-172.