



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Evaluación del estrés hídrico en *Abies religiosa*
(Coniferophyta: Pinaceae) mediante el uso de fotografía
aérea infrarroja, en la Reserva de la Biosfera Mariposa
Monarca.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O
P R E S E N T A:

PABLO LEAUTAUD VALENZUELA



DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA

2011

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Leautaud
Valenzuela
Pablo
5532280840
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
40505060-0

2. Datos del tutor

Dr.
José
López
García

3. Datos del sinodal 1

Dr.
David
Flores
Román

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Margarita
Collazo
Ortega

5. Datos del sinodal 3

Dra.
Lilia de Lourdes
Manzo
Delgado

6. Datos del sinodal 4

Dra.
Martha Juana
Martínez
Gordillo

7. Datos del trabajo escrito

Evaluación del estrés hídrico en *Abies religiosa* (Coniferophyta: Pinaceae)
mediante el uso de fotografía aérea infrarroja, en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.
74 p.
2011

Dedicatoria

A mis padres por todo el apoyo que me han dado durante mi existencia.

A mi mamá por ser una persona extraordinaria y la mujer más fuerte que jamás haya existido, no hay obstáculo que no puedas sortear. Y no hay manera en que pueda agradecerte por todo lo que me has dado, tu seguridad, tu confianza, tus valores, tu amor, y sobre todo, mi vida.

A mis dos hermanos: Carolina y Daniel, porque ustedes son la fuerza que me hace seguir adelante todos los días. No podría haber pedido mejores hermanos que ustedes, los amo.

A Itzi, por ser mi compañera de vida, por estar conmigo en mis mejores y peores momentos, no hay palabras para poder describir lo que siento por ti. ¡Te amo! Gracias por llegar a mi vida.

A mi Papanino y Abuelita, por ser dos grandes ejemplos a seguir, sin ustedes no sería el ser humano que soy ahora, gracias por ser los mejores abuelos del mundo.

A mis amigos y amigas:

A Juan Carlos, Martín y Hazziel, por el apoyo incondicional que me han dado todos estos años, son unas excelentes personas y mis ejemplos a seguir, gracias por todo.

A todos mis “roommates”, especialmente David y Manuel, muchas gracias por hacer mi vida más amena y por todas las buenas experiencias.

A mis amigos de la facultad: Olmo, Israel, Víctor, Eli, Rubén, Martha, Claudia, Nallely, Eréndira, Pavel, José, Areli, Verónica y toda la banda del cuadro que vivimos momentos muy chéveres.

Al súper equipo de bioespeleología: Arturo, Laura, Claudia, Sonia, Sarahi, José Luis, Daniel y David. Por todas las enlodadas y caídas en la cuevas.

A los compañeros del I.G.: Fabiola, Toño, Álvaro, Poncho, Maviael, Alex, Lupita, Mati, Gema y Grace. Por todas las enseñanzas y buenos momentos.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el Instituto de Geografía de la UNAM, gracias a la beca otorgada por el proyecto PAPIIT-IN303010, y bajo la dirección del Dr. José López García, a quien agradezco su confianza, visión, apoyo y conocimientos que me ha otorgado. ¡Muchas gracias Doc!

A mi jurado de tesis: Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado, Dra. Margarita Collazo Ortega, Dra. Martha Juana Martínez Gordillo y Dr. David Flores Román. Por todo el apoyo que me ofrecieron durante la realización de esta tesis, y en especial por sus observaciones que culminaron en este escrito.

Al geógrafo Álvaro Vega y el biólogo Armando Peralta, por todo su apoyo y conocimiento que me entregaron durante la elaboración de esta tesis.

A Itzi, Olmo y Hazziel. Por toda la ayuda que me brindaron durante el trabajo de campo, y por sus comentarios que mejoraron esta tesis.

A todas las personas que nos apoyan durante nuestras estancias en la reserva, especialmente: La Sra. Graciela y su familia, así como Diego Gonzáles y su familia, que no solo han abierto sus casas para nosotros, sino que son un parte vital del equipo de trabajo y por tanto de la investigación que se realiza en la zona.

Y sobre todo agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo su apoyo y oportunidades que me ha brindado todos estos años.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Evaluación del estrés hídrico en *Abies religiosa*
(Coniferophyta: Pinaceae) mediante el uso de
fotografía aérea infrarroja, en la Reserva de la
Biosfera Mariposa Monarca.

Pablo Leautaud Valenzuela



**AÑO INTERNACIONAL
DE LOS BOSQUES • 2011**

Índice

Resumen	4
I. Introducción	5
II. Antecedentes	6
2.1 Percepción remota y el manejo forestal	6
2.1.1 Percepción remota y daño forestal.....	7
2.1.2 La fotografía aérea como herramienta en la gestión forestal.....	7
2.2 Propiedades espectrales de la vegetación.....	9
2.2.1 Mecanismo de la reflectancia vegetal	10
2.2.2 Reflectancia vegetal y el daño forestal.....	11
2.3 Las plagas y enfermedades forestales	12
2.3.1 Efectos del patógeno sobre la planta	13
2.3.2 Principales plagas forestales en México	14
2.3.3 Manejo de las plagas forestales	17
2.4 Los bosques de <i>Abies</i>	17
2.4.1 Importancia económica de los bosques de <i>Abies</i>	21
2.4.2 Importancia ecológica de los bosques de <i>Abies</i>	22
2.4.3 Principales factores que afectan el desarrollo de los bosques de <i>Abies</i>	24
2.5 La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca	26
2.5.1 Plaga forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.....	29
III. Objetivos	31



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.

IV. Materiales y método	32
4.1 Organización y proceso del material fotográfico	32
4.2 Selección de la zona de muestreo.....	35
4.3 Georreferenciación y rectificación del material fotográfico procesado	35
4.4 Desarrollo de la técnica para la detección del estrés hídrico.....	36
4.4.1 Clasificación espectral.....	37
4.4.2 Clasificación visual.....	37
4.5 Verificación en campo	39
4.6 Comparación de la técnica contra imágenes satelitales	39
V. Resultados.....	42
5.1 Clasificación espectral.....	42
5.2 Clasificación visual.....	43
5.2.1 Puntos de verificación	43
5.2.2 Verificación en campo	44
5.3 Comparación con otro material disponible	44
VI. Discusión	46
VII. Conclusión	52
VIII. Literatura citada	53
Apéndices	61
Apéndice I: Clave dicotómica de la clasificación de Murtha (1976) para el daño forestal	62
Apéndice II: Volúmenes autorizados para saneamiento forestal en el periodo 2006-2009 en la RBMM.	64

Cartografía.....	68
Mapa I: Genero <i>Abies</i> en México.....	69
Mapa II: Localización regional del área de muestreo.....	70
Mapa III: Mosaico VIR; Verificación en campo.....	71
Mapa IV: Vegetación y uso de suelo.....	72
Mapa V: Categoría de tenencia del suelo.....	73
Mapa VI: Clasificación espectral; diez categorías.....	74

Resumen

El daño forestal puede surgir a partir de una amplia gama de factores ambientales y artificiales originadas por agentes biológicos, hidrológicos y atmosféricos. Este daño puede repercutir al resto del ecosistema llegando a tener consecuencias sobre la biodiversidad que depende de este, incluidos los humanos que dependen de recursos ecosistémicos forestales, como la captación de agua, producción de oxígeno, captura de carbono y aprovechamiento de recursos maderables.

La percepción remota ha sido una valiosa fuente de información en el curso de la última década para la cartografía y monitoreo de actividades forestales. Ejemplo de ello es la presente tesis, en la que se propone desarrollar una técnica para la detección del daño forestal en el bosque de *Abies religiosa* presente en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Esta técnica hace uso de fotografías aéreas infrarrojas, aprovechando la respuesta espectral del follaje a los cambios fisiológicos derivados de una situación de estrés, la cual resulta de un escenario de infección por enfermedades o plagas forestales.

La técnica desarrollada resultó altamente eficaz, mostrando una eficiencia de detección del 96%, la cual es considerablemente mayor comparada a las técnicas basadas en imágenes de satélite. El método también resultó menos costoso en comparación al método actual de sobrevuelo en helicóptero y monitoreo en campo.

I. Introducción

El impacto forestal se define como el “efecto neto de un organismo, después de que las influencias benéficas y perjudiciales han sido balanceadas, sobre la cantidad y calidad de los múltiples recursos esperados de este” (Alfaro, 1988). El daño forestal es un impacto negativo, y generalmente se considera que ha ocurrido cuando se presenta una reducción en el crecimiento o la muerte de los árboles.

El daño forestal puede surgir a partir de una amplia gama de factores ambientales y artificiales originadas por agentes biológicos, hidrológicos y atmosféricos. El daño puede ser causado por insectos, enfermedades, hongos, fuerzas mecánicas o físicas (ej. maquinaria, inundaciones o viento). El daño también puede ser causado por fenómenos ligados a la contaminación, estrés climático o cambio en la dinámica del hábitat (Ramsey *et al.*, 1998; Mukai & Hasegawa, 2000; Tømmervik *et al.*, 1998).

La noción de daño forestal está intrínsecamente relacionada al concepto general de salud del ecosistema forestal, uno de los principales indicadores subyacentes a un manejo forestal sostenible. Los indicadores más recurridos para evaluar la salud del bosque incluyen características de la planta y el sitio que requieren forzosamente trabajo de campo, los cuales suelen ser subjetivos, por no mencionar costosos (Franklin, 2001). Debido a esto es que se presenta una gran necesidad para desarrollar técnicas de monitoreo de la salud forestal basadas en técnicas de percepción remota, las cuales ofrecen información acertada y relevante, permaneciendo como una técnica costo-efectiva.

II. Antecedentes

2.1 Percepción remota y el manejo forestal

La percepción remota ha sido una valiosa fuente de información en el curso de la última década para la cartografía y monitoreo de actividades forestales. Conforme la necesidad en cantidad y calidad de esta información se incrementa, y las tecnologías de percepción remota siguen mejorando, es razonable considerar a la percepción remota como una fuente de información cada vez más necesaria en el futuro.

El manejo forestal procura por: la distribución espacial de los recursos forestales dentro de su área de gestión y ecosistemas circundantes; la adquisición adecuada de información sobre las condiciones y cambios sobre esos recursos; los impactos asociados a los cambios en patrones y procesos en diferentes escalas temporales y espaciales; la interpretación del efecto de esos cambios sobre componentes no cartografiables como es la vida silvestre; y por las implicaciones económicas, sociales y ambientales de las actividades humanas e impactos forestales. Por esto, se presenta la necesidad por poseer la mayor cantidad posible de información sobre las condiciones del bosque, para formular tratamientos, establecer políticas, y en general proveer una visión sobre el futuro de las condiciones y salud forestal. El objetivo de la percepción remota, es entonces, satisfacer la mayor cantidad de estas necesidades multidimensionales de información como sea posible (Franklin, 2001).

Mientras que la tecnología de percepción remota debe proveer la información para satisfacer las necesidades de la gestión forestal, ésta debe permanecer costo-efectiva y con tecnología de fácil comprensión. Estas son probablemente las dos principales razones por las que la fotografía aérea sigue siendo el método más común de percepción remota en la gestión forestal; con

relacion al contenido de información, resultan económicas y de fácil uso (Pitt *et al.*, 1997; Caylor, 2000).

2.1.1 Percepción remota y daño forestal

Otra definición de daño forestal que se encuentra en la literatura, es la de Murtha (1976), la cual lo define como: “Cualquier tipo e intensidad de un efecto sobre una o más plantas, o parte de ellas, producido por un agente externo, que temporal o permanentemente reduce su valor comercial o estético, o que perjudica la capacidad biológica para su desarrollo y reproducción, o ambos”.

A partir de la definición anterior Murtha realiza una clasificación del daño forestal considerando las características visuales de este daño que se pueden apreciar en materiales derivados de la percepción remota. Esta clasificación reconoce cuatro tipos generales del daño forestal: I) Vegetación que se encuentra completamente defoliada; II) Vegetación parcialmente defoliada; III) Vegetación cuyo follaje presenta inconsistencia en su coloración, con respecto a la vegetación sana y IV) Vegetación sin daño aparente, pero con propiedades espectrales distintas en alguna región distinta al visible. La clasificación completa se puede consultar en forma de clave dicotómica en el apéndice I.

2.1.2 La fotografía aérea como herramienta en la gestión forestal

Las fotografías aéreas han sido usadas ampliamente en la gestión forestal desde la década de 1940 (Spurr, 1960; Lachowski *et al.*, 2000). Inicialmente las aplicaciones forestales de la fotografía aérea se limitaban a

prospecciones espaciales y como apoyo logístico para el equipo terrestre, sin embargo, los usuarios rápidamente fueron conscientes del tremendo poder y flexibilidad proporcionados por la perspectiva aérea (Heath, 1956).

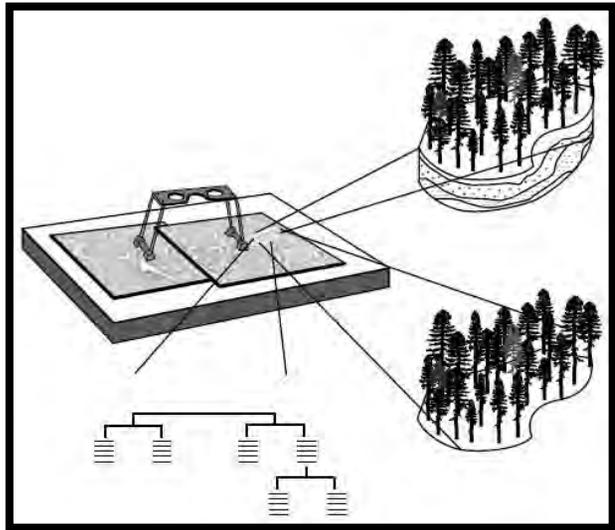


Fig. 1 – Interpretación de fotografías aéreas mediante el uso del estereoscopio. (Modificado de Franklin, 2001)

Resulta difícil compilar una lista completa de los usos de la fotografía

aérea aplicada al manejo forestal, aun así, Spurr (1960) enumera algunas aplicaciones como: la creación de cartografía forestal básica, catastro, inventariado forestal, prospección de plagas y enfermedades, administración de silvicultura, localización de caminos, protección contra incendios, recreación forestal y manejo de la vida silvestre. La interpretación de fotografías aéreas es considerada como un componente importante de la educación forestal, formando parte del entrenamiento en percepción remota y los sistemas de información geográfica (Sader & Vermillion, 2000).

La interpretación visual de las fotografías aéreas depende considerablemente en la habilidad del analista entrenado para identificar características y áreas de interés (Fig. 1). Ésta interpretación depende de la evaluación deductiva e inductiva de los patrones presentes en la fotografía aérea. La aproximación fotomórfica es base de la mayoría de los inventarios forestales y de uso de suelo; donde el analista identifica objetos o áreas,

delimitándolos por su tono, textura, patrón, tamaño, sombra, forma o asociaciones (Lillesand & Kiefer, 1994).

2.2 Propiedades espectrales de la vegetación

El intervalo del espectro electromagnético que abarca de 400 a 2,700 nm ha recibido considerable atención debido a que la radiación solar incidente ocurre predominantemente en estas longitudes de onda. Afortunadamente este rango del espectro incluye la mayor proporción de la reflectancia vegetal que puede ser detectada por los sistemas de percepción remota.

En la figura 2 se muestra el espectro de reflectancia típico del follaje de una planta. La curva muestra el porcentaje de reflexión de la energía incidente sobre la hoja, en función de la longitud de onda de dicha energía abarcando un rango espectral de 400 a 2,700 nm. En la parte visible del espectro, 400 a 700 nm, la reflectancia foliar es bastante baja, cerca del 10%, con un pico alrededor de los 550 nm en la región del verde. Este pico es el responsable del color verde de las plantas percibido por el ojo humano. La reflectancia incrementa hasta a un

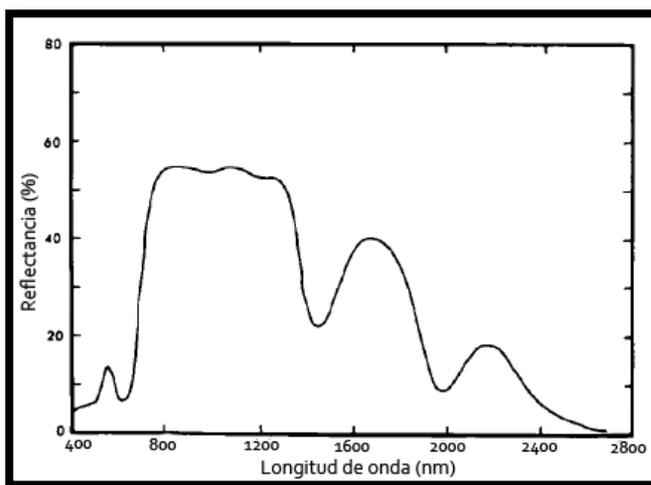


Fig. 2 - Reflectancia típica del follaje de una planta. (Modificado de Knipling, 1970)

50% en el infrarrojo dentro del rango de 700 a 1,300 nm, pero decrece gradualmente a un valor bajo cerca de los 2,700 nm (Knipling, 1970).

2.2.1 Mecanismo de la reflectancia vegetal

Sólo una parte de la energía incidente sobre la hoja es reflejada, el resto es absorbida o transmitida. Estos tres componentes están íntimamente relacionados, y es necesario considerarlos para evaluar las bases físicas y fisiológicas de la reflectancia vegetal. En la figura 3 se presenta la reflectancia, absorbancia y transmitancia foliar en el rango de longitud de onda 400 a 2,700 nm. La absorción es intensa en el espectro visible y el infrarrojo superior a los 1,300 nm (lejano), pero es casi de cero en el infrarrojo cercano (700 a 1,300 nm).

La alta absorbancia en el infrarrojo lejano es debida al agua (Allen & Richardson, 1968). En la región del espectro visible la alta absorción de radiación es causada por los pigmentos foliares, principalmente las clorofilas, aunque los carotenoides, xantofilas, y antocianinas también tienen un efecto considerable (Gates *et al.*, 1965; Rabideau *et al.*, 1946). La alta reflectividad infrarroja de las hojas parece ser causada por su estructura

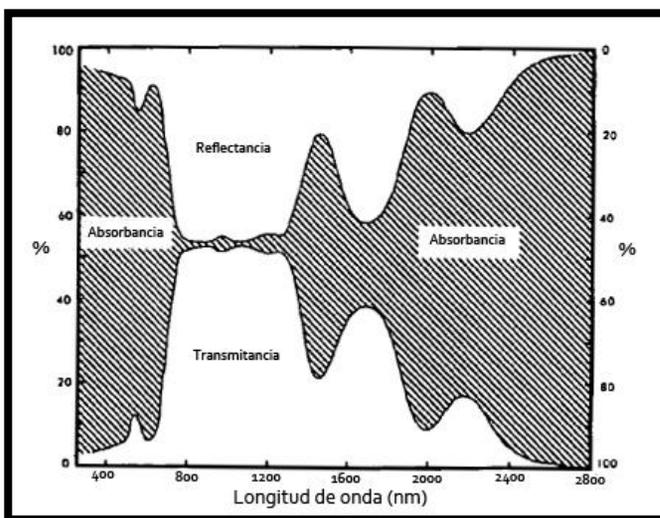


Fig. 3 - Reflectancia, absorbancia y transmitancia foliar. (Modificado de Knipling, 1970)

celular interna, la cutícula cerosa es casi transparente a la radiación visible e infrarroja, y muy poca de la radiación incidente en la hoja es reflejada por la superficie exterior. La radiación es difuminada a través de la cutícula y epidermis hasta las células mesófilas y cavidades aéreas en el interior de la hoja, aquí la radiación se dispersa al momento de pasar por múltiples reflexiones y refracciones ocasionadas por las diferencias ópticas entre los espacios con aire y las paredes de celulosa hidratada. Muy poca o ninguna de la radiación infrarroja cercana es absorbida internamente, pero cerca del 40 a 60% de ésta es dispersada hacia arriba a través de la superficie incidente, de manera que se le designa radiación reflejada. Mientras que el resto se disipa hacia abajo, denominándose radiación transmitida (Knipling, 1970).

2.2.2 Reflectancia vegetal y el daño forestal

Las observaciones espectrales de vegetación sana y estresada han resultado en un mejor entendimiento sobre las posibles características de la imagen que deben ser interpretadas. Las características generales sobre la reflectancia en hojas sanas y estresadas es bien conocida (Reid, 1987: Figura 4); un desplazamiento hacia el azul y una reflectancia del infrarrojo reducida parecen

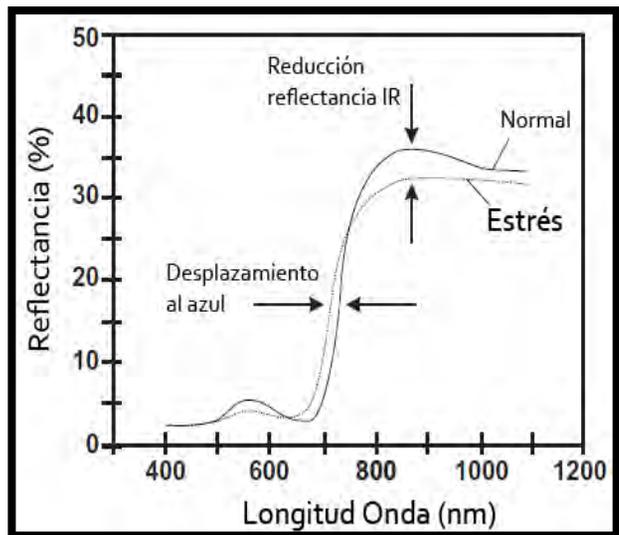


Fig. 4 - Características espectrales en hojas sanas y estresadas. (Modificado de Franklin, 2001)

ser los efectos dominantes. Conforme la planta se torna menos sana, los efectos anteriores se vuelven más aparentes (Horler *et al.*, 1983). Dichos efectos han sido observados bajo diferentes configuraciones (Rock *et al.*, 1986; Miller *et al.*, 1991), y puede que sean aplicables universalmente a todas las plantas que se encuentren bajo estrés (Essery & Morse, 1992).

Distintos estudios han demostrado el valor de la percepción remota para la detección temprana del daño forestal, y han dado pauta para un mejoramiento metodológico que ha culminado en aplicaciones operacionales dentro de algunas áreas forestales. En la Colombia Británica, la interpretación manual de fotografía infrarroja a color fue tan efectiva (y a un 20% del costo) como los métodos tradicionales de sondeos en campo, para la identificación temprana de ataques por *Dendroctonus rufipennis* (Murtha & Cozens, 1985). Entre los distintos trabajos que evalúan el daño forestal por medio de imágenes infrarrojas, se pueden mencionar: Allen *et al.*, 2006; Wulder *et al.*, 2006; Bütler & Schlaepfer, 2004; Haara & Nevalainen, 2002; entre otros.

Así mismo, es notable que las evaluaciones del daño forestal realizadas con imágenes satelitales (Landsat TM, SPOT HVR) presentaron una eficiencia en la detección de entre 70 y 86% (Luther *et al.*, 1991; Franklin *et al.*, 1995; Cohen & Fiorella, 1999). Mientras que las valoraciones efectuadas con fotografías aéreas muestran eficiencias de detección de entre el 90 y 100% (Beaubien & Jobin, 1974; Franklin, 2001).

2.3 Las plagas y enfermedades forestales

Las plagas y patógenos forestales son agentes que ocasionan daños de tipo mecánico o fisiológico a los árboles, tales como deformaciones, disminuciones en el crecimiento, debilitamiento o incluso la muerte,

causando un impacto ecológico, económico y social importante (FAO, 1993; CONABIO, 1998; SEMARNAT, 2003). Son consideradas como una de las principales causas de disturbio en los bosques templados del país, reconociéndose cerca de 250 especies de insectos y patógenos que pueden afectar al arbolado nacional (SEMARNAT, 2003). Dentro de los factores naturales que facilitan el ataque de plagas están fenómenos meteorológicos como las sequías, huracanes y nevadas, así como otras conflagraciones naturales, como los incendios (Matthews *et al.*, 2000; Castillo *et al.*, 2003; PNUMA, 2003). Sin embargo, las actividades humanas también facilitan el ataque. El aprovechamiento y pastoreo no regulados, el deficiente manejo silvícola, la introducción de especies de plagas y patógenos de otras regiones geográficas, así como los incendios inducidos, predisponen a las masas arboladas al ataque por insectos o patógenos. La superficie afectada por plagas forestales puede indicar la presión que este factor ejerce sobre el estado de los recursos forestales nacionales. La superficie de bosques afectada por plagas y enfermedades forestales se considera dentro de la lista de indicadores del Proceso de Montreal de la ONU (SEMARNAT, 2005).

2.3.1 Efectos del patógeno sobre la planta

Mientras que los patógenos infectan a las plantas para obtener nutrientes, dependiendo del tipo de patógeno y el tejido u órgano de la planta que estén infectando, estos interfieren con las diferentes funciones fisiológicas de su hospedero, llevando al desarrollo de diferentes síntomas sobre la planta. Entonces, si un patógeno infecta y mata las flores de una planta, éste interfiere con la habilidad de la planta para producir semillas y reproducirse. Si el patógeno afecta parte del sistema radical o vascular, entonces reduce la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes (Agrios, 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior, los efectos del patógeno sobre la fisiología de la planta hospedera pueden ser:

- Disminución de la fotosíntesis.
- Interferencia en la translocación de agua y nutrientes inorgánicos (estrés hídrico).
- Efectos sobre la absorción de agua por las raíces (estrés hídrico).
- Efectos sobre la transpiración foliar (estrés hídrico).
- Interferencias en la translocación de nutrientes orgánicos por el floema.
- Efectos sobre la respiración de la planta.
- Efectos sobre la permeabilidad de la membrana celular.
- Efectos sobre la transcripción y traducción del material genético.

Todos los efectos anteriores van a tener un impacto negativo sobre el desarrollo y reproducción de la planta. En el caso de los ambientes forestales, los efectos más evidentes son la disminución en la fotosíntesis, causada por patógenos que infectan las hojas y/o plagas defoliadoras. Así como el estrés hídrico, ocasionado por enfermedades del tronco y raíz y/o plagas descortezadoras (Agrios, 2005).

2.3.2 Principales plagas forestales en México

En México se tienen registradas más de 250 especies de insectos y patógenos que provocan daños en los ecosistemas forestales. Estas afectaciones llegan a ser cuantiosas en términos económicos debido a la pérdida directa de productos forestales, así como en términos ambientales, por la pérdida de cobertura arbórea y el consecuente impacto a los distintos hábitats (CONAFOR, 2007).

Las plagas forestales de México se pueden dividir en cuatro grupos principales, según el efecto que tiene sobre la planta:

Insectos descortezadores

Los descortezadores son un grupo de insectos de gran importancia forestal (Fig. 5). Los daños causados a las masas forestales pueden ser desde un pequeño grupo de árboles (menos de una hectárea) hasta cientos o miles de hectáreas. Son organismos que se desarrollan debajo de la corteza de los árboles, debilitándolos y provocándoles la muerte. Dentro de este grupo se encuentran coleópteros

de los generos *Dendroctonus*, *Ips*, *Pseudohylesinus*, *Phloesinus*, *Scolytus* y *Pityophthorus*. De los cuales destacan: *D. mexicanus*, *D. ponderosae*, *D. adjunctus*, *I. mexicanus*, *I. pini*, *P. variegatus*, *S. mundus*, entre otros (CONAFOR, 2007).

Plantas parásitas y epífitas

Las plantas parásitas son aquellas que poseen estructuras especializadas para obtener de sus hospederos el soporte y los nutrimentos necesarios para su desarrollo. Así, provocan la reducción del crecimiento de sus hospederos y su debilitamiento. Pueden ocasionar infestaciones severas y hasta la muerte. A nivel nacional, las áreas afectadas por plantas parásitas en los diferentes escenarios: bosques con manejo, bosques sin manejo, áreas naturales protegidas, plantaciones con fines de restauración, arbolado urbano, entre

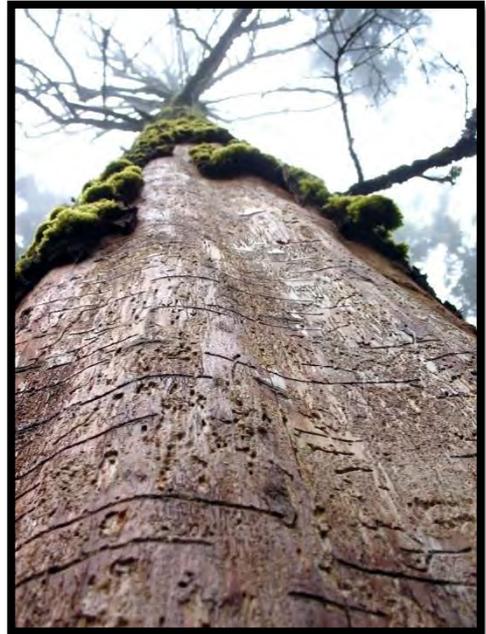


Fig. 5 - Efectos de un descortezador en *Abies religiosa*.

otras, presentan diversos niveles de infección, siendo necesario implementar acciones de diagnóstico de manejo, prevención, combate y control (CONAFOR, 2007).

Las plantas epífitas no toman del hospedero agua ni nutrimentos y sólo lo utilizan como soporte, ya que su sistema radicular es externo y no está adaptado para alimentar a la planta (epífita) sino solo para anclarse o sostenerse y se alimenta a través de las hojas que están cubiertas de tricomas o pelos especializados para coleccionar agua y nutrientes del ambiente. Aun así, algunas son consideradas dentro de las plantas parásitas ya que provocan la asfixia de ramas y muerte de los árboles (CONAFOR, 2007).

En este grupo se encuentran plantas de los géneros *Arceuthobium*, *Psittacanthus*, *Struthanthus*, *Phoradendrom*, *Cladocolea* y *Tillandsia*.

Insectos defoliadores

Los defoliadores son insectos que causan daños a la cobertura forestal debido a que se alimentan de las hojas de los árboles, provocando una disminución en la actividad fotosintética, lo que puede llevar hasta la muerte del hospedero. En este grupo destacan los estados larvarios de un gran número de Lepidópteros (CONAFOR, 2007).

Plagas de raíz

Son plagas que atacan la estructura de las raíces, limitando la absorción de agua y nutrientes, provocando la mortalidad de arbolado joven por lo general. Aquí la especie más importante es *Dendroctonus rhizophagus* que por lo general afecta a arbolado joven entre 5-15 cm de diámetro y alturas 0.1 a 3 metros (CONAFOR, 2007).

2.3.3 Manejo de las plagas forestales

En nuestro país, la Norma Oficial Mexicana “NOM-019-SEMARNAT-2006”, establece los lineamientos técnicos de los métodos para el combate y control de insectos descortezadores. Los cuales pueden ser métodos físico-mecánicos, químicos, o la combinación de ambos. Así mismo, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) cuenta con un “Manual de Sanidad Forestal”, en el cual se describen algunos métodos de control forestal apropiados para cada tipo de plaga (CONAFOR, 2007; 2009).

2.4 Los bosques de *Abies*

Los bosques de Oyamel sobresalen entre el conjunto de las comunidades vegetales dominadas por coníferas. Tal hecho se debe principalmente a las particulares condiciones ecológicas en que se desarrollan y de cuya existencia son indicadores (Rzedowski, 2006).

La distribución geográfica de los bosques de *Abies* en México es en extremo dispersa y localizada (Mapa I). En la mayor parte de los casos, la comunidad se presenta en forma de manchones aislados, muchas veces restringidos a un cerro, a una ladera o a una cañada. Las áreas continuas de mayor extensión se presentan en las serranías que circundan al Valle de México y les siguen en importancia las correspondientes a otras montañas sobresalientes del Eje Volcánico Transversal, como por ejemplo, el Pico de Orizaba, el Cofre de Perote, el Nevado de Toluca, el Tancítaro, el Nevado de Colima y algunas otras más. En la Sierra Madre del Sur los manchones de mayor importancia se conocen de la zona del Cerro Teotepac, en Guerrero, y del área al sur de Miahuatlán, Oaxaca. En el norte de este último estado se presentan en las partes más elevadas de la Sierra de Juárez, de la Sierra de San

Felipe y en la región del Cerro Zempoaltépetl. En Chiapas se les cita en la zona del Tacaná, cerca de San Cristóbal de las Casas y también de los alrededores de Tapalapa y Coapilla (Miranda, 1952). En la parte septentrional del país los bosques de *Abies* son mucho más escasos y restringidos. En la Sierra Madre Occidental existen en Durango y en algunas localidades de Chihuahua, en la Sierra Madre Oriental, en cambio, sólo se conocen dos áreas de alguna importancia, que corresponden al Cerro Potosí y al Cerro San Antonio Peña Nevada, de Nuevo León y Tamaulipas (Rzedowski, 2006).

En cuanto a la extensión total que ocupan en México los bosques de Oyamel, Leopold (1950) le atribuye al "bosque boreal" una área correspondiente a 0.5% (9,822 km²) de la superficie de la República, pero tal cifra es exagerada y parece estar más cerca de la realidad la estimación de Flores *et al.* (1971) que es de 0.16% (3,143 km²). En México, este tipo de vegetación está prácticamente confinado a sitios de alta montaña, por lo común entre 2,400 y 3,600 m de altitud, pues entre estas cotas se localiza cuando menos 95% de la superficie que ocupa (Fig. 6)

Los bosques de oyamel que se observan en México están confinados a laderas de cerros, a menudo protegidos de la acción de vientos fuertes y de insolación intensa. En muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. No se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados, pero tal hecho quizá esté en función de la escasez de estos terrenos en la zona montañosa y en parte a la influencia humana (Rzedowski, 2006).

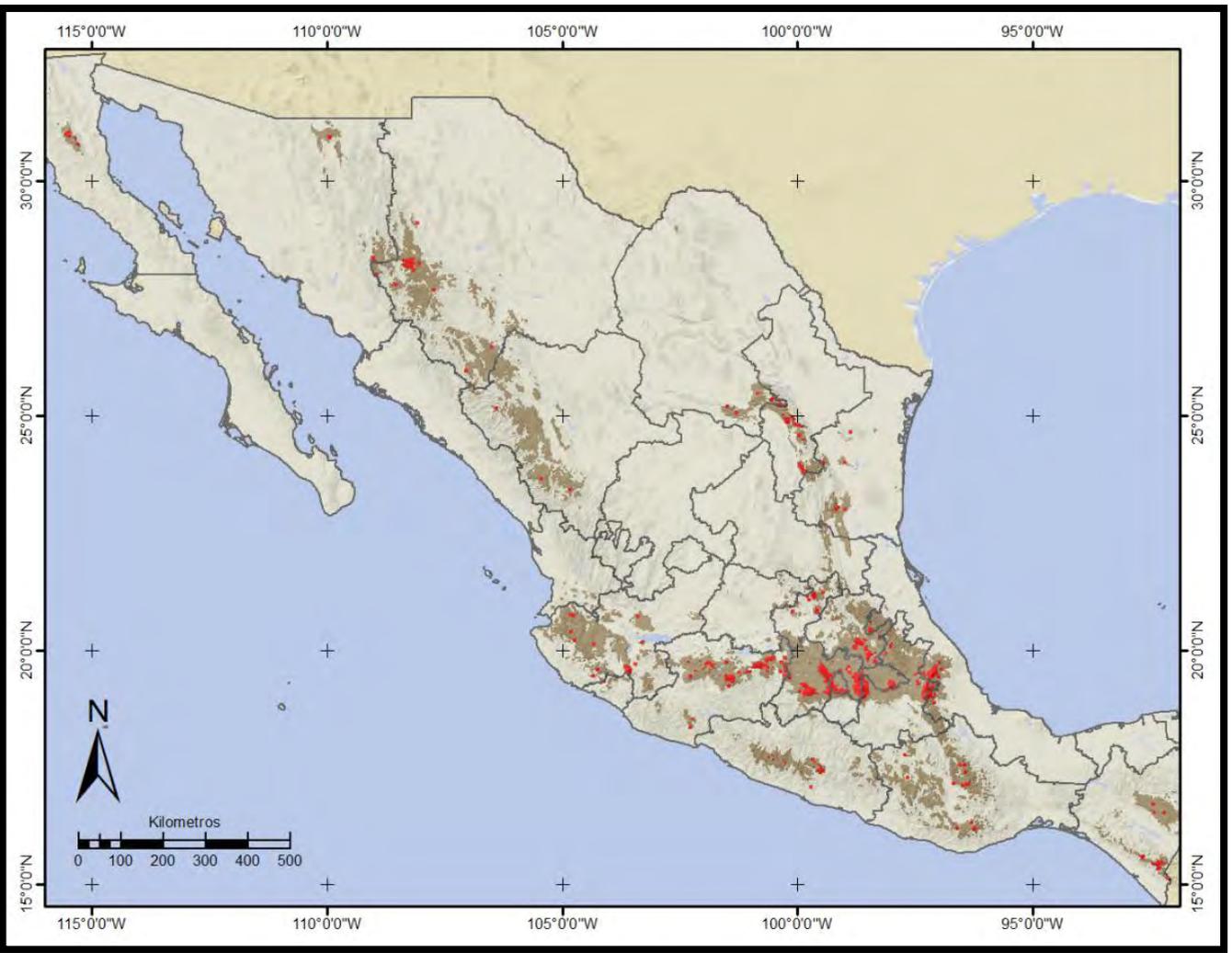


Fig. 6 - Distribución del genero *Abies* en México. En rojo: Distribución geográfica según información de CONABIO y puntos de colecta de la GBIF (Global Biodiversity Information Facility); En café oscuro: Distribución potencial calculada a partir de puntos de colecta (Elaboración propia).

Los desmontes y la tala inmoderada constituyen los mecanismos más importantes mediante los cuales el hombre afecta al bosque de *Abies*. Los primeros se realizan fundamentalmente con el propósito de utilizar el terreno para fines agropecuarios y han hecho disminuir significativamente las extensiones forestales. En muchas zonas densamente pobladas lo único que se ha respetado son las laderas demasiado abruptas para cualquier tipo de agricultura. El pastoreo, aun cuando bastante intenso en muchas partes, no parece tan perjudicial para este tipo de vegetación, como lo es para los pinares, pues el ganado que mayormente se explota aquí es el ovino y éste no es muy destructor. Además, los bosques de *Abies*, por ser más húmedos y por no poseer tanta abundancia de gramíneas en el estrato herbáceo, no son tan fácil presa del fuego. En general, en regiones donde la comunidad existe en forma de grandes masas forestales, los incendios son excepcionales, pero en sitios donde se presenta a manera de pequeños manchones rodeados por otros tipos de vegetación, su frecuencia y acción son mucho más marcadas (Rzedowski, 2006).

A menudo el bosque de oyamel se presenta puro y entonces una de las especies de *Abies* constituye el componente único del estrato arbóreo superior. Tales masas forestales son frecuentes sobre todo en el Eje Volcánico Transversal, donde domina *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. En otras partes del país pueden ser más comunes los bosques mixtos, con presencia de diversos árboles, sobre todo de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Pseudotsuga* y *Cupressus*.

La altura de la comunidad varía por lo general entre 20 y 40 m, aunque puede alcanzar hasta 50 m. Las copas de los árboles presentan de ordinario un contorno triangular y se ramifican desde niveles relativamente bajos. El bosque de *Abies* en condiciones naturales suele ser denso, lo que crea condiciones de penumbra a niveles inferiores y el desarrollo de los

estratos arbustivo y herbáceo puede ser bastante limitado. Lo más común es, sin embargo, que debido al disturbio, o bien a lo abrupto del terreno, la cantidad de luz en el interior de la comunidad sea mayor y el sotobosque presente mejor desarrollo y diversidad (Rzedowski, 2006).

Puede existir un estrato arbóreo inferior, formado por dicotiledóneas, por ejemplo, especies de *Quercus*, *Alnus*, *Arbutus*, *Salix*, *Prunus*, *Garrya*, *Buddleia* y otras especies. El arbustivo y el herbáceo contienen por lo general numerosos representantes de la familia Compositae, en particular de los géneros *Senecio*, *Eupatorium*, *Stevia* y *Archibaccharis*. El estrato rasante está dominado por musgos y presenta con frecuencia muy altos valores de cobertura (60 a 95%, según Madrigal, 1967); también se observan en él numerosos hongos basidiomicetos durante la época de lluvias.

2.4.1 Importancia económica de los bosques de *Abies*

En México la especie maderable más rica en celulosa es *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham., en cuyos tallos jóvenes (de 20 a 40 años de edad) contienen hasta el 75% de tejidos celulósicos, y éste a su vez, con el mayor porcentaje de celulosa alfa, que es empleado en la fabricación de papeles finos, y por consiguiente es el que alcanza los mayores precios en el mercado. Así que la tendencia de esta industria es aprovechar los árboles relativamente jóvenes, que presentan tejidos flojos, húmedos y poco lignificados, carentes de olor, pobres en xilema secundario y esencialmente ricos en celulosa (Garduño; 1944).

A medida que va siendo mayor la edad del árbol, los tejidos celulósicos se impregnan en mayor cantidad de sílice y de colorantes, presentándose entonces el problema de la eliminación de todas estas sustancias extrañas, y

cuya resolución eleva considerablemente el costo de la industrialización y afecta la calidad de la pasta, ésta es la razón por la cual la industria papelera prefiere el aprovechamiento de árboles jóvenes (Garduño, 1944).

La producción de madera en México está basada principalmente en el aprovechamiento de coníferas. En 1987 se produjeron 9.7 millones de metros cúbicos en rollo de productos maderables, de ese volumen el 86% correspondió a coníferas, dentro de las cuales, del género *Abies* se aprovecharon 453,275 m³ en rollo que representan un 4.6 % del volumen total y 5.4% del volumen de coníferas (CNIDS, 1988).

Para el año 2007 la producción forestal maderable aprovechó 6.9 millones de metros cúbicos en rollo, de estos el 83.1% provino de las coníferas, de las cuales el oyamel contribuyó con 116,860 metros cúbicos (1.7%). En la producción de madera de coníferas destacan los estados de Durango, Chihuahua y Michoacán, los cuales representan el 64.5%. En cuanto a la producción de oyamel, esta se concentra en el Eje Neovolcánico Transversal, en los estados de México, Puebla y Michoacán (DGGFS, 2007).

2.4.2 Importancia ecológica de los bosques de *Abies*

Los bosques de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. Del Eje Neovolcánico Transversal, conocidos también como bosques de oyamel u oyametales, son considerados como un tipo de vegetación relictos. Estos bosques requieren para su óptimo desarrollo de una serie de condiciones como: suelos profundos ricos en alófanos, gruesas capas de materia orgánica en descomposición, cañadas profundas, agrestes y una alta humedad relativa (Nieto de Pascual, 1995).



Fig. 7 - Bosque de *Abies religiosa* en la RBMM.

Dentro del Eje Neovolcánico Transversal se encuentra un macizo montañoso, donde este tipo de formación forestal presenta un interés particular, como es la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en los estados de Michoacán y México (Fig. 7). En su interior alberga a la población invernante de mariposas monarca *Danaus plexippus* L. más importante del país y del mundo. Es por ello que estos ecosistemas han atraído durante las últimas décadas la atención de naturalistas, científicos y exploradores producto de la belleza de sus paisajes, hábitat y especies (Rzedowski, 1983).

El bosque de oyamel se considera como uno de los ecosistemas de mayor importancia para la conservación del fenómeno de hibernación de la mariposa monarca en México. Sin embargo, estos sitios están siendo perturbados y reducidos cada vez más por diferentes agentes como: la tala, los incendios, el pastoreo y el aprovechamiento maderable de tipo hormiga, los

cuales en su conjunto, no permiten de manera natural el proceso de regeneración, conocido también como proceso sucesional (Gómez, 2003).

La importancia del oyamel, en las diversas cuencas de captación de agua también es grande, pues en estos bosques se registran altas precipitaciones y por las características de la cobertura de los diferentes estratos de la comunidad y las propiedades físicas del suelo, permiten una eficiente absorción y retención del agua de lluvia (Madrigal, 1964).

2.4.3 Principales factores que afectan el desarrollo de los bosques de Abies

Fuego

Los incendios, unidos más o menos estrechamente con el pastoreo, son también de consideración en el Eje Neovolcánico y es en el bosque de oyamel donde se presentan con menos frecuencia, tanto por el mayor contenido de humedad del suelo, y en general en todo el bosque, como por la vegetación herbácea que es menos abundante en gramíneas, lo que contrasta con las condiciones de las comunidades vegetales adyacentes. El período de incendios en el Eje Neovolcánico comprende desde el mes de diciembre, cuando hay muchas herbáceas secas y se prolonga hasta el comienzo de la temporada de lluvias a finales de mayo o en junio (Gómez, 2003).

Clima

Los factores del medio ambiente que parecen influir más en la comunidad de *Abies religiosa* son la altitud y el relieve, en función de los cuales varían los factores climáticos (principalmente la temperatura,

precipitación y humedad relativa); además del factor suelo (Tabla 1) (Gómez, 2003).

Tabla 1 - Factores climáticos que caracterizan la comunidad de *A. religiosa*.

Temperatura media	10.5 a 13°C
Temperatura máxima extrema	25 a 30°C
Temperatura máxima media	17 a 20°C
Temperatura mínima extrema	-7.5 a -11°C
Temperatura mínima media	3 a 5°C
Oscilación diaria media	13 a 16°C
Precipitación media anual	1,000 a 1,400mm
Evaporación media anual	800 a 1,400mm

Suelo

López (1993), realizó una evaluación nutrimental de *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones, Distrito Federal. Se hicieron determinaciones de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn y Mn, Índice DRIS¹. De acuerdo a estos índices, el orden de requerimientos de nutrimentos quedó definido de la siguiente manera:

$$K > Fe > Mn > P > Zn > N > Mg > Ca > S$$

El orden de requerimiento muestra que el K, Fe y el Mn son los nutrimentos más limitantes en la plantación del Desierto de los Leones. En el trabajo de Ávila (2008) se puede encontrar una descripción exhaustiva de los limitantes del suelo sobre los bosques de *Abies religiosa*.

Insectos y otras plagas

¹ Diagnosis and Recommendation Integrated System

Para los bosques de *Abies* en Norte América se tienen registros de numerosos patógenos, de los que destacan: Las polillas *Orgyia pseudotsugata* (Mason & Wickman, 1991), *Choristoneura fumiferana* (Steinman & MacLean, 1994), *Choristoneura occidentalis* (Wainhouse, 2005), *Lambdina fiscellaria* (MacLean & Ebert, 1999), *Neodiprion abietis* (Parsons *et al.*, 2003); el hongo *Phaeocryptopus gaeumannii* (Black *et al.*, 2010). Y los más recurrentes en los bosques de *Abies religiosa* del Eje Neovolcanico: Los escarabajos descortezadores *Pseudohylesinus variegatus* y *Scolytus mundus*, así como la especie de ácaros *Oligonichus verduzcoi* (Alvarado *et al.*, 1993; CONAFOR, 2009).

2.5 La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) está ubicada en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Temascalcingo y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Angangueo, Aporo, Contepec, Ocampo, Senguio y Zitácuato, pertenecientes al estado de Michoacán. La reserva tiene una superficie total de 56,259 ha, de la cual la zona núcleo abarca 13,555 ha (Fig. 8 y Mapa II) (Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manríquez, 2008).

La RBMM forma parte del Eje Neovolcánico Transversal, por lo que su paisaje se caracteriza por montañas y valles con altitudes entre los 2,400 y 3,600 m.s.n.m. La temperatura media fluctúa a lo largo del año entre 8° y 22°C, la precipitación anual es de 700 a 1250 mm y el tipo de clima predominante es el templado subhúmedo, con lluvias en verano (Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manríquez, 2008).

Los tipos de suelo que se encuentran en esta zona son derivados de cenizas volcánicas. En los sitios ocupados por el bosque el suelo tiene colores oscuros debido a una abundante materia orgánica, en tanto que los suelos sin cubierta vegetal son de colores claros por haber perdido la capa superficial orgánica, lo que les confiere una alta susceptibilidad a la degradación cuando son desmontados. Por otra parte, las fuertes pendientes que existen en la zona y la capacidad de permeabilidad o absorción de humedad que tienen los suelos, convierten a la región en una importante área de recarga de acuíferos, con lo cual es posible alimentar un total de 23 cuerpos de agua, que abastecen diversos centros urbanos, así como las ciudades de México y Toluca (Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manríquez, 2008).

Entre los principales tipos de vegetación forestal se encuentran:

- Bosque de oyamel: Es la comunidad vegetal predominante en la zona núcleo de la reserva y se presenta entre los 2,800 a 3,400 m.s.n.m., la cual presenta una alta humedad ambiental.
- Bosque mesófilo de montaña: Este tipo de vegetación se encuentra en áreas muy restringidas, formando complejos gradientes con otros tipos de vegetación a lo largo de pequeños cauces y cañadas, a una altitud de 2,300 a 2,750 m.s.n.m.
- Bosque de pino-encino: Comunidad con gran riqueza de hierbas, se presenta en mezcla que va desde pino predominante hasta encino predominante. Se encuentra de 2,300 a 3,000 m.s.n.m.

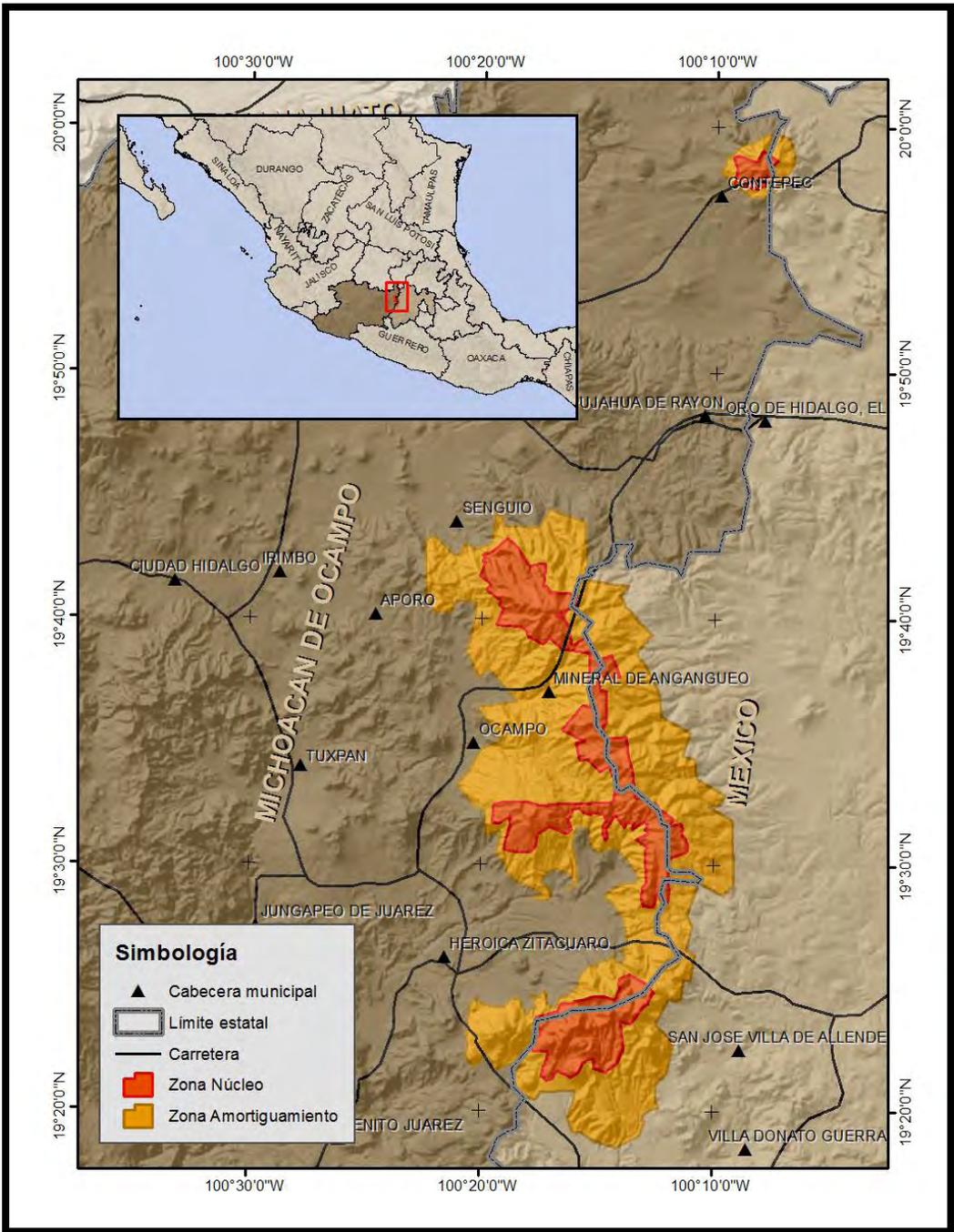


Fig. 8 - Ubicación geográfica de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (Elaboración propia)

2.5.1 Plaga forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

Los principales agentes de disturbio en los bosques de oyamel y pino en la RBMM son los incendios y los insectos descortezadores. Los insectos descortezadores presentes en la zona de estudio son especies nativas que tienen como hospederos las especies de coníferas dominantes en el área; Para el oyamel se tiene como plaga dominante a *Scolytus mundus* y a *Pseudohylesinus variegatus* como secundaria, para las especies de pino los descortezadores dominantes son *Dendroctonus mexicanus* y *D. adjunctus* (CONAFOR, 2009).

El descortezador del oyamel (*S. mundus*) es una condición endémica¹, se encuentra en árboles previamente afectados por descargas eléctricas, desramados por viento o con una afectación previa por enfermedades de raíz o plantas parásitas. En una condición normal los insectos afectan la punta del árbol, partes del cambium del tronco o ramas (Fig. 9). La muerte del árbol puede sobrevenir después de hasta siete años de ataques sucesivos del insecto,

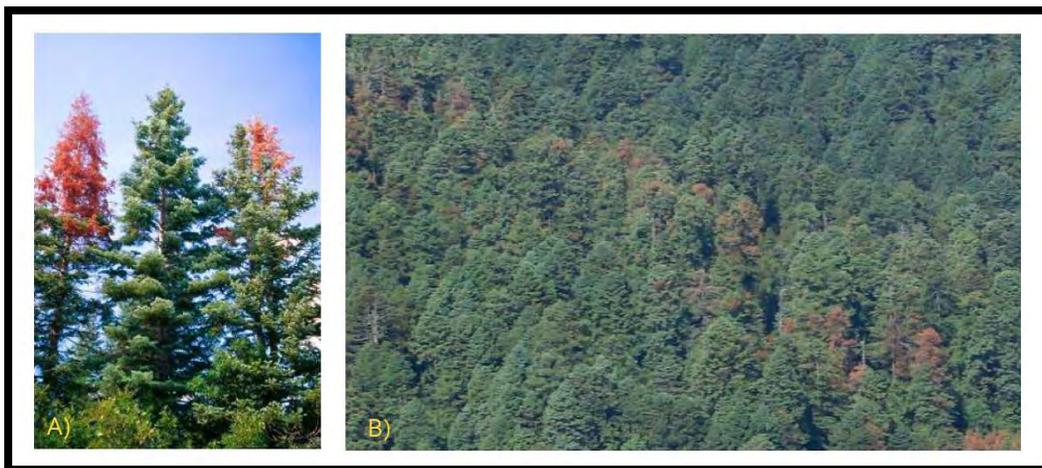


Fig. 9 - Daño por descortezadores en la RBMM. A) Infección puntual (endémica); B) Infección epidémica.

¹ En ciclos de retorno de insectos descortezadores; Endémica: retornos anuales de baja intensidad; Epidémica: retornos de hasta décadas de alta intensidad.

pero en una situación de estrés la muerte puede sobrevenir en un solo año. Así mismo, en condiciones climáticas normales es posible encontrar de uno a cinco árboles muertos por brote (Fig. 9a), mismos que en general se encuentran diseminados en el área que cubre la especie hospedera dominante. En condiciones climáticas de sequía y de elevadas poblaciones del descortezador, los daños pueden ser observados en grupos de hasta 200 árboles afectados (Fig. 9b) (CONAFOR, 2009).

En lo que respecta a la situación actual de las plagas forestales en la RBMM, el “Programa de Sanidad” de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), tiene como actividad prioritaria el mapeo aéreo de daño asociado a plagas o enfermedades forestales y a partir del año 2006 se han realizado sobrevuelos en el área forestal de la RBMM. En el apéndice II se anexan los volúmenes autorizados para saneamiento forestal en el periodo 2006-2009.

III. Objetivos

General: Evaluar la efectividad de las fotografías aéreas infrarrojas para detectar una respuesta espectral al estrés hídrico foliar derivado de la presencia de plagas, en el bosque de *Abies religiosa* de la RBMM.

Particulares:

1. Obtener un compuesto visible-infrarrojo (VIR) a partir del material fotográfico correspondiente al levantamiento aéreo realizado en la RBMM en 2009.
2. Desarrollar un método para la detección del estrés hídrico foliar causado por plagas forestales en *Abies religiosa*, analizando el compuesto VIR.
3. Verificar la efectividad del método desarrollado mediante una comprobación en campo.
4. Comparar el material y método utilizado, con otros disponibles.

IV. Materiales y método

El procedimiento que se llevó a cabo en esta tesis se divide en las siguientes etapas:

1. Organización y proceso del material fotográfico.
2. Georreferenciación y rectificación del material fotográfico procesado
3. Desarrollo de la técnica para la detección del estrés hídrico derivado de plagas forestales.
4. Verificación en campo.
5. Comparación de la técnica con otro material disponible.

4.1 Organización y proceso del material fotográfico

Para la presente investigación fueron utilizadas fotografías del levantamiento aéreo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) realizado en el año 2009. Dicho levantamiento utilizó dos cámaras fotográficas; una Nikon D2X¹ para la toma del espectro visible (EV), mientras que una Canon EOS Digital Rebel² registraba el espectro infrarrojo (IR).

Las fotografías fueron separadas en dos carpetas; una conteniendo las imágenes a color y la otra las infrarrojas. Así mismo, en cada carpeta se organizaron las fotografías en subcarpetas correspondiendo a las líneas de vuelo. En total fueron usadas 668 imágenes de cada espectro (EV e IR) dando un total de 1,336 fotografías a procesar.

¹ Usando un objetivo de 25mm (37.5 equivalente en formato 35mm), un sensor con tamaño de pixel de 5.6 μ m, y registrando imágenes con dimensiones de 4,288 x 2,848 pixeles.

² Usando un objetivo de 21mm (33.6 equivalente en formato 35mm), un sensor con tamaño de pixel de 7.1 μ m, y registrando imágenes con dimensiones de 3,072 x 2,048 pixeles.

Las fotografías que fueron obtenidas en dirección de vuelo norte a sur requirieron ser rotadas 180° para que todas las fotos estuvieran orientadas al norte, en esta etapa también se decidió dar una corrección de color a las fotografías EV, así como un ajuste de niveles tanto a las fotografías EV como las IR.

Una vez procesadas y organizadas las fotografías se procedió a la unión de las imágenes EV con las IR para obtener el compuesto VIR, esto se llevó a cabo en el programa de edición Photoshop (Adobe™). El proceso, ilustrado en la figura 10, consiste básicamente en:

1. Alinear las dos fotografías correspondientes (EV + IR).
2. Recortar el área compartida entre las dos fotografías.
3. Recorrer los canales (bandas) de la imagen EV; azul a alfa, verde al azul, rojo al verde. Dejando el canal rojo para el IR.
4. Copiar la imagen IR al canal rojo de la imagen compuesta.
5. Eliminar la fotografía IR original y “aplanar” la imagen.
6. Guardar el compuesto VIR resultante como un archivo TIF de cuatro bandas.

Para agilizar este procedimiento se construyó un macro que realiza el proceso anterior de manera semiautomática.

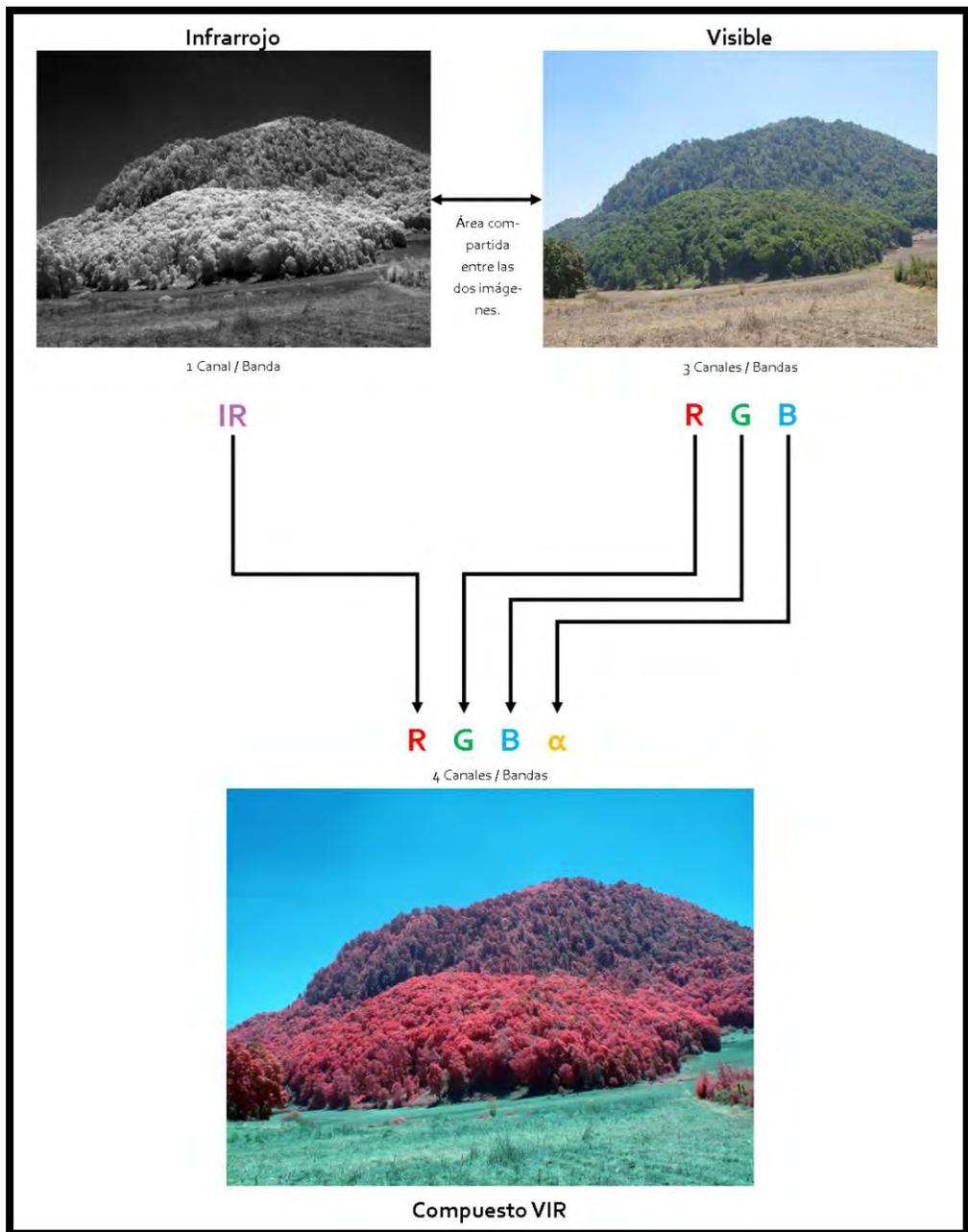


Fig. 10 – Proceso para integrar las imágenes visibles e infrarrojas en un compuesto VIR. IR: Canal infrarrojo; R: Canal rojo; G: Canal verde; B: Canal azul.

4.2 Selección de la zona de muestreo

Para fines prácticos y pensando en la economía de los recursos disponibles, se decidió establecer un área de muestreo representativa del bosque de Oyamel presente en la zona de estudio. Esta área debería ser lo suficientemente grande para abarcar el mayor número de árboles estresados posibles, pero no tan grande como para prolongar demasiado las etapas de proceso de información y hacer inviable el muestreo en campo.

El área elegida fue un recuadro de aproximadamente 1,900 hectáreas cerca del santuario “Sierra Chincua” (Mapa III), abarcando principalmente superficies de los ejidos: Cierro Prieto, Los Remedios, Santa Ana, Rosa de Palo Amarillo, San Jerónimo Pilitas. Así como parte de la pequeña propiedad Pancho Maya, y otra porción de propiedad federal.

Esta zona se ubica entre altitudes de 3,000 y 3,400 metros, por lo que la mayoría de la vegetación forestal corresponde al bosque de *A. religiosa*, que abarca el 79% de la superficie del área de muestreo, seguido por un 11% de uso agrícola, 5% de pastizal y matorral, 4% de bosque de pino y el 1% restante ocupado por bosque de encino y otras categorías de uso de suelo (Mapa IV).

4.3 Georreferenciación y rectificación del material fotográfico procesado

Una vez obtenidas las imágenes compuestas EV+IR (VIR), fueron seleccionadas las fotografías que cubrían el área de muestreo elegida, las cuales fueron georreferenciadas en el paquete ArcGIS (ESRI™) usando como referencia horizontal la ortofoto de INEGI correspondiente (E14A26A). En

total se referenciaron 12 fotografías pertenecientes a las líneas de vuelo: 7, 8 y 9. A cada fotografía se le asignaron entre 25 y 30 puntos de control, y para su rectificación fue usado el método de transformación “spline”.

Las imágenes rectificadas fueron requeridas para la elaboración de un mosaico que abarcara la extensión del muestreo, dicho mosaico fue realizado en el software ERDAS IMAGINE (ERDAS™), siguiendo las instrucciones de la guía automatizada (Mosaic Wizard). La imagen resultante de la unión de las fotografías fue recortada usando el polígono de área de muestreo como guía.

La georreferenciación y rectificación, así como la cartografía elaborada, se realizó utilizando el sistema de coordenadas proyectado UTM zona 14 con el datum NAD 1927.

4.4 Desarrollo de la técnica para la detección del estrés hídrico

Durante el diseño de la técnica de detección se siguieron tres aproximaciones metodológicas; un proceso automático, uno semiautomático y otro manual. Las variantes semiautomática y automática corresponden a una clasificación espectral asistida y no asistida respectivamente, mientras que el método manual consiste en la observación directa del material fotográfico procesado. Para el desarrollo de la técnica se utilizó como base el mosaico fotográfico del área de muestreo.

4.4.1 Clasificación espectral

La clasificación espectral no asistida y asistida, fue llevada a cabo con el paquete ERDAS IMAGINE. Para la clasificación no asistida se realizaron pruebas con diferente número de categorías divisorias: 5, 10 y 15.

Durante la clasificación asistida se le indicó al programa, por medio de “áreas de interés”, las propiedades espectrales de cada categoría con la que se realizó la partición. Se dio instrucciones para una separación en cinco categorías; bosque sano, bosque enfermo, matorral, suelo desnudo y sombras.

4.4.2 Clasificación visual

El método manual consistió en ubicar de manera visual y directamente sobre el mosaico VIR los árboles en condición de estrés, esta detección fue basada en las propiedades espectrales (Fig. 4) visibles en una fotografía de “falso-color” VIR, dichas propiedades están bien documentadas en la literatura¹, y visualmente se pueden apreciar como un cambio en la tonalidad de follaje, el cual pasa de un color rojo (sano) a un gris azulado (estrés) (Fig. 11).

Los árboles en condición de estrés fueron marcados de manera puntual sobre el mosaico utilizando un archivo “shape” el cual fue denominado como: puntos de verificación. Estos puntos se sometieron a un análisis de vecino más cercano para determinar una distribución agrupada o dispersa, también se calculó un árbol de tendido mínimo para ayudar a la visualización de cúmulos y planear rutas de verificación en campo.

¹ Antecedentes: Propiedades espectrales de la vegetación. (p. 11)

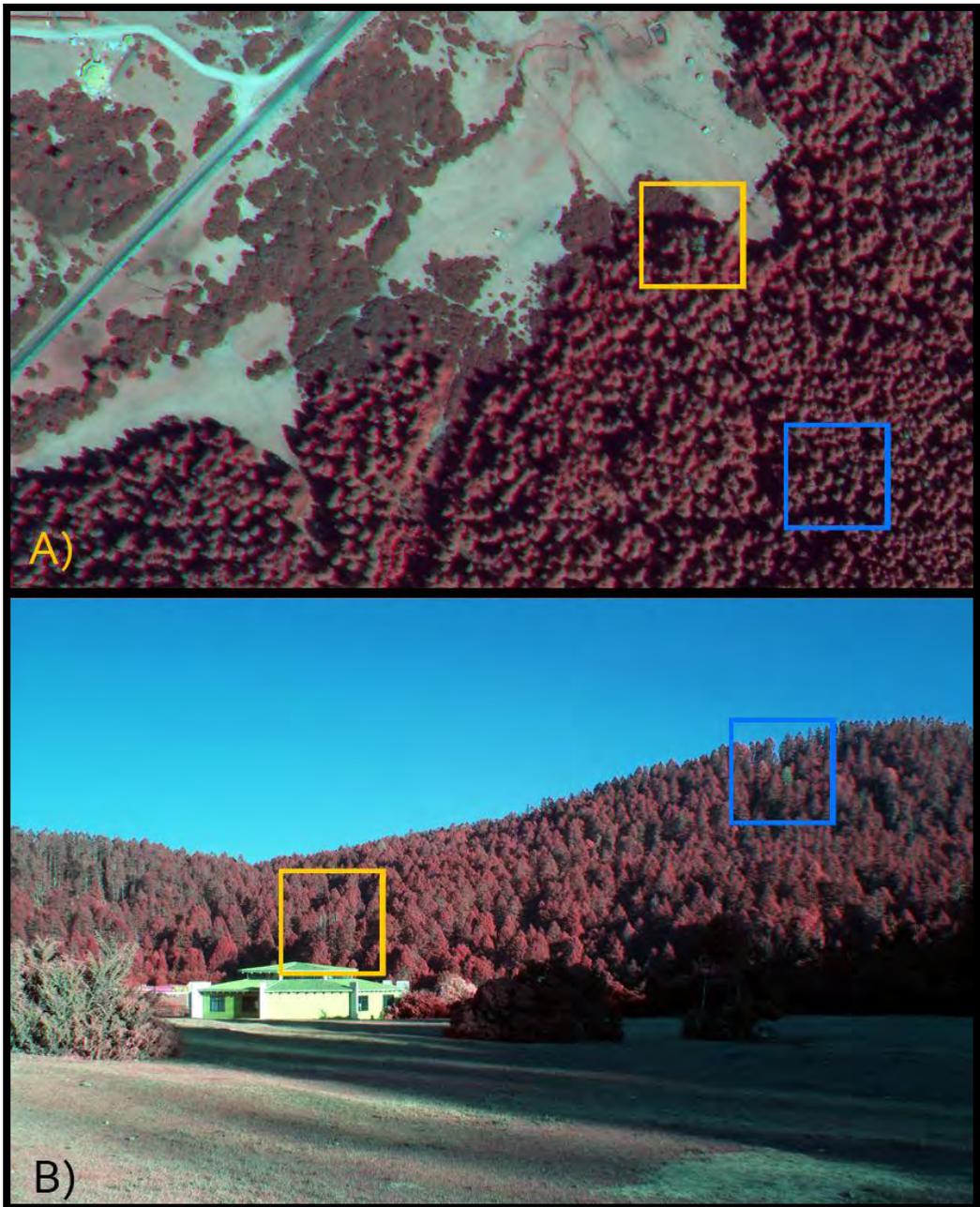


Fig. 11 - Ejemplo de las propiedades visuales del estrés hídrico en fotografías VIR: A) Fotografía VIR aérea; B) Fotografía VIR horizontal.

4.5 Verificación en campo

Con fin de comprobar la veracidad de la técnica para la detección de estrés hídrico derivado de plagas forestales, se realizó una salida a campo en la cual se visitaron diferentes puntos de verificación, donde se corroboraría el estado de salud del árbol mediante la observación directa, y con toma de fotografías infrarrojas a nivel horizontal (Fig. 11b).

Para la localización de los puntos de verificación se construyó una cartografía base para el GPS Magellan MobileMapper 6, la cual incluía el “shape” puntos de verificación.

Durante la comprobación en campo se tomaron datos estructurales del árbol como su altura y diámetro a nivel de pecho, también se realizaron anotaciones del tipo de daño presente siguiendo la clasificación de Murtha (1976). Así mismo, cada árbol fue marcado con una clave única como referencia para futuras visitas.

4.6 Comparación de la técnica contra imágenes satelitales

De manera complementaria, se realizó una comparación entre la técnica, o más específicamente, entre el material utilizado en el presente estudio, las fotografías aéreas (Fig. 12a), e imágenes de satélite disponibles.

Para esta zona de estudio estuvieron disponibles dos imágenes satelitales: una Landsat 5 (TM) adquirida el 24 de noviembre del 2009 (Path:27, Row: 46), la cual cuenta con siete bandas y una resolución de 30

metros por pixel¹ (Fig. 12c). También se obtuvo una imagen SPOT-5 adquirida el 1 de enero del 2008 (J-1A-L7.446901), esta cuenta con cinco bandas con una resolución de entre 10 y 20 metros por pixel² (Fig. 12b).

Al igual que la fotografía aérea se realizó una clasificación no asistida (automática), así como una localización visual (manual) de posibles arboles estresados.

¹ La banda 6 correspondiente al infrarrojo térmico presenta una resolución de 120m por pixel.

² Cuenta con una banda pancromática con resolución de 5m por pixel.

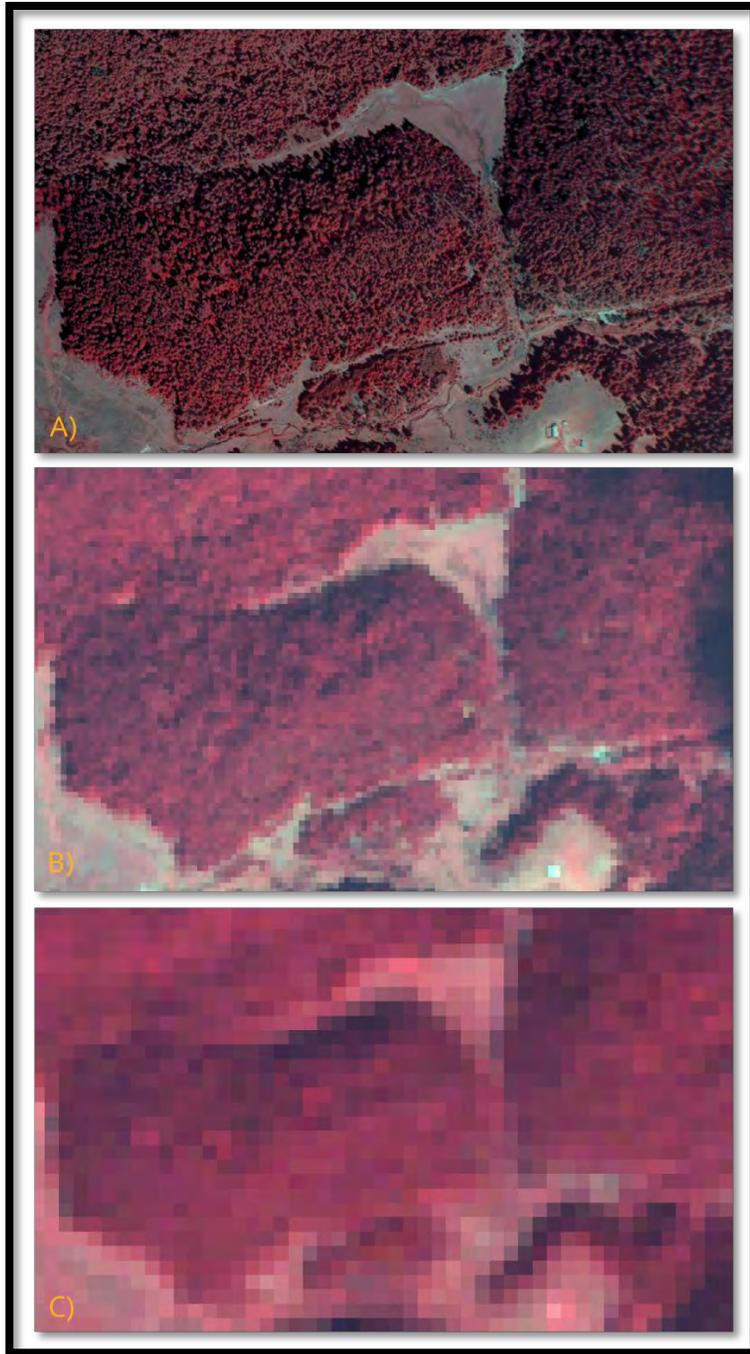


Fig. 12 - Comparación de las tres fuentes de información remota usadas en la investigación: A) Fotografía aérea; B) Imagen SPOT-5; C) Imagen Landsat 5 (TM).

V. Resultados

Al término del proceso del material fotográfico se obtuvieron 668 fotografías VIR (visible + infrarrojo) con cuatro bandas y una resolución aproximada de un metro por pixel (0.9 ± 0.02 m/px). A pesar del proceso de las imágenes para corrección de niveles y color, las fotografías VIR siguen presentando una heterogeneidad considerable en su luminosidad (exposición), la cual fue aún más notable al momento de construir el mosaico. El mosaico VIR final cubre un rectángulo de 1907.25 hectáreas mostrando una resolución de 0.89 metros por pixel.

5.1 Clasificación espectral

Al momento de realizar las clasificaciones espectrales tanto las asistidas como las no asistidas, fue de notar que al usar cuatro o menos categorías divisorias las sombras eran agrupadas junto con alguna clase de vegetación forestal, es por eso que todas las clasificaciones reportadas utilizaron cinco o más de dichas categorías.

Tanto las clasificaciones no asistidas como la asistida dieron efectos muy similares, las imágenes clasificadas resultaron demasiado heterogéneas y con un detalle excesivo, de tal manera que fue imposible discernir la vegetación forestal sana de la dañada.

La clasificación que dio relativamente mejores resultados fue la no asistida con diez categorías divisorias (Mapa VI.), aun así, la “vegetación estresada” fue agrupada en las clases “pastizal” o “suelo desnudo”.

Durante este análisis también fue evidente que la disparidad lumínica entre cada fotografía afectó de manera significativa al proceso de clasificación, esto fue notable en el bosque de *Abies religiosa* el cual terminó clasificado en tres categorías diferentes (Bosque1, Bosque2 y Bosque/Pastizal), las cuales en la imagen forman parches discretos que coinciden con los límites de cada fotografía con las que se formó el mosaico.

5.2 Clasificación visual

Para el caso específico del bosque de *Abies religiosa*, con las fotografías VIR, fue posible localizar árboles con daños de tipo: I-A, I-B, II-A y III-I¹. Los árboles dañados se distinguieron del resto (en el compuesto VIR) por presentar una coloración azul claro a gris, en comparación a los árboles sanos que exhiben un color rojo oscuro (Fig. 11).

5.2.1 Puntos de verificación

Conociendo la tendencia de respuesta espectral al estrés hídrico foliar resultó más fácil ubicar a los árboles dañados utilizando el contexto de los árboles sanos del bosque, de esa manera se localizaron 156 puntos en el recuadro de 1900 hectáreas.

Es de apreciar que el análisis de vecino más cercano indica que estos puntos exhiben un patrón de distribución agregada (relación de vecindad: 0.8, $p < 0.01$). Igualmente notable es que una gran parte de esos puntos se

¹ En el apéndice I se puede consultar la clave dicotómica de la clasificación de Murtha (1976) para el daño forestal.

encontraron en la zona núcleo¹ (97 puntos o 62%), y si tomamos en cuenta que la zona núcleo abarca aproximadamente 585 hectáreas (30%) del área de muestreo, se tiene que los árboles estresados tienen una densidad de 10.96 individuos por kilómetro cuadrado en la zona núcleo, mientras que en amortiguamiento presentan una densidad de 4.46 individuos por kilómetro cuadrado.

5.2.2 Verificación en campo

La verificación en campo se llevó a cabo del 11 al 14 de noviembre del 2010, durante esos días se visitaron algunos lugares dentro del área de muestreo, debido a la dificultad del terreno gran parte de los puntos de verificación resultaron inaccesibles con el tiempo y recursos disponibles. Aun así, se pudieron visitar 33 árboles de los cuales 25 presentaron algún tipo de daño derivado del ataque de plagas forestales, de los ocho no confirmados (o ausentes), siete están en un área donde datos de la CONAFOR indican que se realizó un saneamiento de árboles plagados, lo que podría explicar su ausencia.

5.3 Comparación con otro material disponible

En el caso de las clasificaciones no asistidas, las imágenes de satélite dieron mejores resultados en lo que respecta a uniformidad de la clase separada, sin embargo carecen de la resolución necesaria para poder identificar individualmente a los árboles estresados. Sólo en la imagen SPOT

¹ Y la mayoría de estos en la zona de propiedad federal (Mapa V.)

se pudo observar de manera manual un parche de cinco árboles enfermos, en la clasificación este parche fue categorizado junto con el “suelo desnudo”.

VI. Discusión

Marco teórico

Algo que se observó durante la prospección bibliográfica, es que el mecanismo de interacción entre las plagas forestales y su hospedero no está muy bien documentado, en especial para el caso de los insectos descortezadores. Y aunque la fisiología de dicha interacción no es el objetivo principal de esta tesis, se trató de abordar de la mejor manera posible. La manera en que se interpretó esta interacción tomando en cuenta la bibliografía recopilada fue así:

- La alta reflectancia del espectro infrarrojo sobre el follaje de las plantas depende de la estructura interna de las hojas, en particular de las paredes de celulosa hidratada (Knipling, 1970).
- La presencia de plagas y/o enfermedades en la planta tiene una serie de consecuencias que afectan directa o indirectamente al transporte de agua en diferentes zonas de la planta, según sea el caso (Agrios, 2005).
- La presencia de plagas y/o enfermedades en la planta resulta en una disminución en la reflectancia foliar del espectro infrarrojo (Reid, 1987; Essery & Morse, 1992).

Teniendo las premisas anteriores se infirió que la presencia de plagas forestales, en particular los descortezadores, afectan de manera directa o indirecta el transporte de agua dentro del árbol, resulta lógico pensar que las zonas más afectadas son las que se encuentren más distales de la fuente de agua, en este caso, las hojas. A su vez esta pérdida de hidratación dentro de la estructura foliar ocasiona una reducción en la reflectancia del infrarrojo, lo

cual concuerda con las observaciones de (Reid, 1987; Essery & Morse, 1992; Murtha & Cozens, 1985; Franklin, 2001; entre otros).

Es por esa inferencia también que se eligió usar el término “estrés hídrico” en esta tesis, porque en la fotografía aérea no se puede ver la plaga ni el patógeno directamente, lo que se observa es el efecto que tienen estos sobre el árbol, es decir, la pérdida de hidratación en la hoja que deriva en la disminución del infrarrojo reflejado. Entonces cuando se menciona el “estrés” en este trabajo, se refiere al estrés hídrico foliar, derivado de la presencia de una plaga o enfermedad forestal.

Material fotográfico

Uno de los primeros problemas que se presentaron durante el procesamiento de las fotografías fue al momento de unir las imágenes visibles con las infrarrojas, ya que éstas, al haber sido tomadas con cámaras y objetivos distintos presentaban geometrías internas diferentes, lo que derivó en que estas imágenes no pudieran ser sobrepuestas a la perfección, provocando en muchos casos un desfase o “fantasma” entre la imagen visible y la IR. La condición anterior pudo haber afectado de manera considerable a las clasificaciones espectrales realizadas, explicando (en parte) la poca eficacia que tuvieron estas técnicas al intentar separar la vegetación sana de la estresada. Esta situación fue compensada al momento de utilizar un método visual (manual) de interpretación, ya que, como bien mencionan Lilesand & Kiefer (1994), al observar algún punto en la fotografía, el cerebro humano de manera contextual puede “corregir” o compensar defectos en la imagen, como es el desfase entre las fotografías visibles e infrarrojas.

Área de muestreo

Como se mencionó en el capítulo anterior, la selección del sitio de muestreo se realizó buscando economizar recursos, especialmente el tiempo. Solamente la georreferencia de todas las 668 fotografías hubiera requerido de tres a seis meses más de trabajo con el método usado (ArcGIS). Evidentemente también se hubiera prolongado la fase de interpretación y la verificación en campo tendría que haber sido más extensa, y por tanto más costosa.

Aun así, el área seleccionada dio buenos resultados en el muestreo, ya que se localizó una cantidad considerable de árboles dañados (156). Y en general la geografía de la zona resultó favorable en diferentes aspectos: en primer lugar la vegetación en su mayoría se trata de bosque de Oyamel, el objeto de estudio. También resultó conveniente que una parte de la superficie se encontrara dentro de la zona núcleo de la reserva, ya que así se pudieron realizar comparaciones entre zona núcleo vs. amortiguamiento. Así mismo la relativa accesibilidad del terreno (presencia de carretera, terracerías y caminos) facilitó en parte la verificación en campo, y se recalca la relatividad de esta facilidad porque, la topografía y vegetación de la zona hizo imposible realizar el muestreo al 100% de lo planeado.

Clasificación espectral

Las clasificaciones espectrales, como ya se mencionó en los resultados, no resultaron muy útiles para esta investigación. Ya sea que presenten demasiada o muy poca resolución, ninguna pudo distinguir claramente entre los árboles sanos de los plagados. Esto no quiere decir que estos métodos no sean apropiados para la detección del estrés foliar causado por plagas, al

contrario, en muchas situaciones es el mejor procedimiento a seguir, como son ejemplo los trabajos de Luther *et al.* (1991), Franklin *et al.* (1995) o Cohen & Fiorella (1999) entre otros.

Aquí se presenta una cuestión de escala, los trabajos mencionados tratan con infecciones que abarcan de cientos a cientos de miles de hectáreas, mientras que en la RBMM las infecciones suelen ser puntuales, es decir, de uno a cinco árboles infectados, y excepcionalmente hasta 200 árboles en los casos extremos como reporta CONAFOR (2009). Y es por eso que las imágenes de satélite disponibles, teniendo resoluciones espaciales muy generalizadas (de entre 10 y 30 metros por pixel) no fueron capaces de percibir las propiedades espectrales árbol por árbol.

Por otro lado, las fotografías aéreas que cuentan con un tamaño de pixel de menos de un metro, fácilmente pueden registrar las propiedades espectrales por cada árbol, pero son susceptibles a otros defectos como variaciones en la exposición (luminosidad) y el desfase entre las bandas visibles y la IR. Estos defectos, sumados al “exceso” de resolución, provocó que las clasificaciones derivadas de fotografías aéreas resultaran en imágenes caóticas, donde ninguna de las categorías de clasificación formaba continuos homogéneos, y muchas veces asignaba un tipo de vegetación a diferentes categorías o viceversa.

Clasificación visual

Este método resultó el más efectivo al momento de interpretar las fotografías aéreas, a pesar de la heterogeneidad lumínica y el desfase de bandas presente en el compuesto VIR. La respuesta espectral de los árboles dañados resultó ser bastante aparente y con las características reportadas en la

bibliografía (Reid, 1987; Miller *et al.*, 1991; Essery & Morse, 1992). La interpretación fue directa en pantalla y aunque la tarea fue relativamente simple, en ocasiones fue difícil distinguir entre árboles muertos y suelo desnudo visible entre el dosel del bosque, es probable que usando un método estereoscópico se reduzcan estas dificultades, e incluso se optimice la veracidad de la fotointerpretación.

Como se señala en los resultados, el 62% de los árboles dañados se encontraron en la zona núcleo, presentando ésta zona más del doble de densidad de individuos dañados en comparación con la zona de amortiguamiento. Y aunque el patrón es evidente (Mapas III, IV y V), el área de muestreo tal vez no sea lo suficientemente extensa para hacer una generalización, por lo menos en la región de Sierra Chincua es posible que esta situación se deba a las políticas de manejo forestal, la cual establece una veda muy restrictiva dentro de la zona núcleo, y no fue hasta el año 2006 que se inició un plan de saneamiento forestal (CONAFOR, 2009) en la reserva, así que probablemente esta falta de “limpieza” haya afectado la salud del bosque presente en la zona núcleo.

Sobre la verificación en campo se tiene que: de un total de 156 puntos de verificación marcados se visitaron 33, es decir, el 21% del muestreo planeado. Y evaluando la eficacia aproximada del método de identificación se tiene: 25 de 33 árboles confirmados, es decir 76% de eficacia. Pero si tomamos en cuenta los datos de saneamiento de la CONAFOR, entonces se tiene que descontar siete árboles “no verificados”, por lo que la confianza del método aumenta a 96%, que concuerda muy bien con los datos obtenidos por Beaubien & Jobin (1974) y Franklin (2001) que igualmente utilizan fotografías aéreas para la detección de plagas, con eficiencias de localización de entre el 90 y 100%.

En los resultados se menciona que los arboles estresados presentan una distribución agregada, y aunque esta información no es vital para la presente investigación, si es relevante para comprender la ecología y especialmente el modo de dispersión del patógeno o plaga causante del estrés hídrico foliar. Y mientras más información se tenga sobre estos agentes de daño forestal, se podran tomar mejores decisiones para el control de estos.

VII. Conclusión

Finalmente, se puede decir con seguridad que las fotografías aéreas demostraron ser útiles para la detección del daño forestal (estrés hídrico foliar y defoliación) causado por plagas en los bosques de *Abies religiosa* de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Es posible obtener compuestos VIR a partir de tecnología fotográfica relativamente simple y ampliamente disponible. Y el mejor método para detectar el estrés en *A. religiosa*, es la interpretación visual de la fotografía aérea la cual ofrece eficiencias de detección de más del 95%.

Así mismo, se señala que el método desarrollado en este trabajo de investigación mantiene una excelente relación costo-efectividad, especialmente comparado con el método actual de detección (sobrevuelo en helicóptero y trabajo en campo), ya que la información disponible en las fotografías aéreas es amplia y variada, por lo que un solo levantamiento puede tener diversas aplicaciones.

VIII. Literatura citada

- Agrios, G. N. 2005. *Plant Pathology*. 5° Ed. Elsevier Academic Press. Oxford.
- Allen, W. A., & A. J. Richardson. 1968, Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58: 1023-1028.
- Allen, J. L., S. Wesser, C. J. Markon & K. C. Winterberger. 2006. Stand and landscape level effects of a major outbreak of spruce beetles on forest vegetation in the Copper River Basin, Alaska. *Forest Ecology and Management*. 227: 257-266.
- Alvarado, R. L. I. de Bauer & A. Galindo. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution*. 80: 115-121.
- Alfaro, R. I. 1988. Pest damage in forestry and its assessment. *Northwest Environment Journal*, 4: 279-300.
- Ávila, G. R. 2008. *Factores ambientales que influyen en la formación de anillos de crecimiento con anomalías en Abies religiosa de los Parques Nacionales Izta-Popo y DDLL*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Beaubien, J., & L. Jobin. 1974. Forest insect damage and cover types from high-altitude color-IR photographs and ERTS-1 imagery. *Proceedings ISP VII Symposium Remote Sensing Photo Interpretation*, Banff, Alberta, Canada.
- Black B. A., D. C. Shaw & J. K. Stone. Impacts of Swiss needle cast on overstory Douglas-fir forests of the western Oregon Coast Range. *Forest Ecology and Management*. 259: 1673-1680.

- Bütler, R. & R. Schlaepfer. 2004. Spruce snag quantification by coupling colour infrared aerial photos and a GIS. *Forest Ecology and Management*. 195: 325-339.
- Castillo, M., P. Pedernera y E. Peña. 2003. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA*. 19: 3-4.
- Caylor, J. 2000. Aerial photography in the next decade. *Journal of Forestry*, 98: 17-19.
- CNIDS. 1988. Memoria económica 1987-1988. Cámara Nacional de las Industrias Derivadas de la Silvicultura. México.
- Cohen, W. B., & M. Fiorella. 1999. Comparison of methods of conifer forest change detection with Thematic Mapper imagery. Pages 89-102 in R. Lunetta and C. D. Elvidge, Eds. *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*. Taylor & Francis, London.
- CONABIO. 1998. *La diversidad biológica de México: Estudio de País*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONAFOR. 2007. *Manual de sanidad Forestal*. Comisión Nacional Forestal. México.
- CONAFOR. 2009. *Situación fitosanitaria forestal en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca*. Coordinación general de conservación y restauración. Comisión Nacional Forestal. Reporte Septiembre 2009. México.

- Cornejo-Tenorio G., y G. Ibarra-Manríquez. 2008. *Flora ilustrada de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. México.
- DGGFS. 2007. *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2007*. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. SEMARNAT. México.
- Essery, C. I., & A. P. Morse. 1992. The impact of ozone and acid mist on the spectral reflectance of young Norway spruce trees. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 3045–3054.
- FAO. 1993. *The Challenge of Sustainable Forest Management. What future for the world's forests?*. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.
- Flores, M., G., J. Jiménez L., X. Madrigal S., F. Moncayo R. & F. Takaki T. 1971. *Memoria del mapa de tipos de vegetación de la Republica Mexicana*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México.
- Franklin, S. E. 2001. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Lewis Publishers. NY, USA.
- Franklin, S. E., R. H. Waring, R. W. McCreight, W. B. Cohen, & M. Fiorella. 1995. Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21: 299–308.
- Garduño, R. 1944. *El oyamel y su aprovechamiento*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Bosques. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Gates, D. M., H. J. Keegan, J. C. Schleiter, & V. R. Weidner 1965, Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4: 11-20.

- Gómez, G. R. 2003. *Estado del conocimiento de oyamel*. Tesis de licenciatura. Febrero. Escuela Nacional de Agricultura. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México. México.
- Haara, A. & S. Nevalainen. 2002. Detection of dead or defoliated spruces using digital aerial data. *Forest Ecology and Management*. 160: 97-107.
- Heath, G. R. 1956. A comparison of two basic theories of land classification and their adaptability to regional photointerpretation key techniques. *Photogrammetric Engineering*, 22: 144–168.
- Horler, D. N. H., M. Dockray, & J. Barber. 1983. The red-edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4: 273–288.
- Knipling, E. B. 1970. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1: 155-159.
- Lachowski, H., P. Maus, & N. Roller. 2000. From pixels to decisions: digital remote sensing technologies for public land managers. *Journal of Forestry*, 98: 13–15.
- Leopold, A. S. 1950. Vegetation zones of Mexico. *Ecology* 31: 507-518.
- Lillesand, T. M., & R. W. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- López, L. M. A. 1993. *Evaluación nutrimental de Abies religiosa en el Desierto de los Leones, Distrito Federal*. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Montecillos. México.

- Luther, J., S. E. Franklin, & J. Hudak. 1991. Satellite remote sensing of current year defoliation by forest pests in western Newfoundland. Pages 192–198 in *Proceedings, XIV Canadian Symposium on Remote Sensing*. Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa.
- MacLean D. A. & P. Ebert. 1999. The impact of hemlock looper (*Lambdina fuscicornis* (Guen.)) on balsam fir and spruce in New Brunswick, Canada. *Forest Ecology and Management*. 120: 77-87.
- Madrigal, S. X. 1964. Contribución al conocimiento de la ecología de bosques de oyamel (*Abies religiosa* (HB.K.) Schl & Cham., en el Valle de México. Tesis de Licenciatura. México. Distrito Federal. Instituto Nacional de Ciencias Biológicas.
- Madrigal, S. X. 1967. Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel (*Abies religiosa* (HBK.) Schl. & Cham.) en el Valle de México. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Boletín Técnico 18*. México.
- Mason R. R. & B. E. Wickman. 1991. Integrated pest management of the Douglas-fir tussock moth. *Forest Ecology and Management*. 39: 119-130.
- Matthews, E., R. Payne, M. Rohweder y S. Murray. 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Forest Ecosystems*. WRI. Washington, D. C.
- Miller, J., J. Wu, M. G. Boyer, M. Belanger, & E. W. Hare. 1991. Seasonal patterns in leaf reflectance red-edge characteristics. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1509–1523.
- Miranda, F. 1952. *La vegetación de Chiapas*. Ediciones del Gobierno del Estado. Tuxtla Gutiérrez. 2 vols.

- Mukai, Y., & I. Hasegawa. 2000. Extraction of damaged areas of windfall trees by typhoons using Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 647–654.
- Murtha, P. A. 1976. Vegetation damage and remote sensing: principal problems and some recommendations. *Photogrammetria*, 32: 147-156.
- Murtha, P. A., & R. Cozens. 1985. Color infra-red photo interpretation and ground surveys evaluate spruce beetle attack. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11: 177–187.
- Nieto de Pascual, P.C. 1995. Estudio sinecológico del bosque de oyamel de la caña de Contreras, Distrito Federal. *Ciencia Forestal en México*, vol. 20(77): 3-34.
- Parsons, K., D. Quiring, H. Piene & J. Farrell. 2003. Temporal patterns of balsam fir sawfly defoliation and growth loss in young balsam fir. *Forest Ecology and Management*. 184: 33-46.
- Pitt, D. G., R. G. Wagner, R.J. Hall, D. J. King, D. G. Leckie, & U. Runesson. 1997. Use of remote sensing for forest vegetation management: a problem analysis. *The Forestry Chronicle*, 73: 459–477.
- PNUMA. 2003. *GEO América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente 2003*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Costa Rica.
- Rabideau, G. S., C. S. French, & A. S. Holt. 1946. The absorption and reflection spectra of leaves, chloroplast suspensions, and chloroplast fragments as measured in an Ulbricht sphere. *American Journal of Botany*, 33, 769-777.

- Ramsay, E. W., III, D. K. Chappell, D. M. Jacobs, S. K. Sapkota, & D. G. Baldwin. 1998. Resource management of forest wetlands: hurricane impact and recovery mapped by combining Landsat TM and NOAA AVHRR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64: 733–738.
- Reid, N. J. 1987. Remote sensing and forest damage. *Environmental Science and Technology*, 21: 428–429.
- Rock, B. N., J. E. Vogelmann, D. L. Williams, A. F. Vogelmann, & T. Hoshizaki. 1986. Remote detection of forest damage. *BioScience*, 36: 439–445.
- Rzedowski, J. 1983. *Vegetación de México*. Limusa. México.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sader, S. A., & S. Vermillion. 2000. Remote sensing education: an updated survey. *Journal of Forestry*, 98: 31–37.
- SEMARNAT. 2003. *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales 2002*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- SEMARNAT. 2005. *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Spurr, S. A. 1960. *Photogrammetry and Photo-interpretation*. 2nd ed. Ronald Press, New York.

- Steninman J. R. & D. A. MacLean. 1994. Predicting effects of defoliation on spruce-fir stand development: a management-oriented growth and yield model. *Forest Ecology and Management*. 69: 283-298
- Tømmervik, H., M. E. Johnson, J. P. Pedersen, & T. Gunerisussen. 1998. Integration of remote sensing and in situ data in an analysis of air pollution effects on terrestrial ecosystems in the border area between Norway and Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 49: 51–85.
- Wainhouse, D. 2005. *Ecological Methods in Forest Pest Management*. Oxford University Press. Oxford.
- Wulder, M. A., C. C. Dymond, J. C. White, D. G. Leckie & A. L. Carroll. 2006. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest Ecology and Management*. 221: 27-41.

Apéndice

Apéndice I: Clave dicotómica de la clasificación de Murtha (1976) para el daño forestal

1a. Morfología: Un cambio en la forma es una característica prominente del daño forestal.	2
2a. <i>Daño de tipo I:</i> los árboles están completa o casi completamente defoliados.	3
3a. Ramas ausentes, solo el tronco principal remanece.	I-A
3b. Ramas presentes.	4
4a. Conífera.	5
5a. Individuos dispersos.	I-B
5b. Grupos extensos.	I-C
4b. Angiosperma.	6
6a. Individuos dispersos.	I-D
6b. Grupos extensos.	I-E
2b. <i>Daño de tipo II:</i> los árboles presentan defoliación mediante la presencia de ramas desnudas u otra deformación.	7
7a. Ramas defoliadas concentradas en la punta del árbol.	8
8a. Conífera.	II-A
8b. Angiosperma.	II-B
7b. Ramas defoliadas dispersas en todo el árbol, con o sin pérdida de ramas, deformaciones pueden presentarse.	9
9a. Conífera.	10
10a. Deformaciones o pérdida de ramas presente.	II-C
10b. Deformaciones o pérdida de ramas ausente.	11
11a. Follaje del año actual ausente.	II-D
11b. Follaje 2° año ausente.	II-E
9b. Angiosperma.	12
12a. Pérdida de ramas o deformaciones.	II-F
12b. Sin pérdida de ramas.	II-G
1b. Fisiología: Cambio en la reflectancia espectral indica un cambio en coloración de follaje, indicio del daño forestal.	13
13a. <i>Daño de tipo III:</i> Follaje es de color distinto comparado con follaje normal, usando fotografías a color o falso-color (VIR).	14
14a. Fotografías aéreas a color.	15
15a. Follaje tornando a colores amarillos.	16
16a. Conífera.	17
17a. Pocas ramas afectadas.	III-A
17b. Todas ramas afectadas.	III-B
16b. Angiosperma.	18
18a. Pocas ramas afectadas.	III-C

18b. Todas ramas afectadas.	III-D
15b. Follaje tornando a colores pardos o rojizos.	19
19a. Conífera.	20
20a. Follaje actual afectado.	21
21a. Todo follaje afectado.	22
22a. Daño asociado a patrón topográfico.	III-E
22b. Follaje anterior verde, pardo o ausente.	23
23a. Follaje anterior verde o pardo.	24
24a. Verde.	III-F
24b. Pardo.	III-G
23b. Follaje ausente.	III-H
21b. Solo parte follaje afectado.	25
25a. Punta afectada.	III-I
25b. Laterales afectados.	III-J
20b. Follaje anterior afectado, actual sano.	26
26a. Todas ramas afectadas.	III-K
26b. Pocas ramas afectadas.	III-L
19b. Angiosperma.	27
27a. Pocas ramas afectadas.	III-M
27b. Todas ramas afectadas.	III-N
14b. Fotografías aéreas falso-color (VIR).	28
28a. Follaje del afectado con tonos rojos más oscuros o claros que el follaje normal.	III-O
28b. Follaje del afectado sin tonos rojos.	29
29a. Follaje con tonos lilas o amarillos, si tonos lilas ir a 15a, si tonos amarillos ir a 15b.	15a/15b
29b. Follaje con tonos azules, azul-verdoso, o grises indican defoliación, ver ítem 2a.	2a
13b. <i>Daño de tipo IV</i> : Árboles sin daño aparente, pero se pueden medir variaciones en la densidad óptica.	
30a. Densidad óptica con filtro rojo es alta comparando con follaje normal. . . .	IV-A
30b. Densidad óptica con filtro rojo es baja comparando con follaje normal. . . .	IV-B

Saneamiento 2006

Michoacán

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL AUTORIZADO (m ³) Oyamel		VOL AUTORIZADO (m ³) Pino	
			ZONA		ZONA	
			NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO	NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO
Santa Ana	Ocampo	2006	251.66	0.00	7.85	0.00
Los Remedios	Ocampo	2006	310.90	0.00	0.00	0.00
Jesús de Nazareno	Anganguao	2006	93.66	0.00	0.00	0.00
Cerro Prieto	Ocampo	2006	206.04	0.00	0.00	0.00
SUBTOTAL 2006			862.25	0.00	7.85	0.00

Estado de México

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL UMEN TOTAL (m ³) EN PINO
Ejido Los Sacos Dotación y Ampliación	Amanalco de Becerra	2006	225.474
de Santa María y sus Barrios	Villa de Allende	2006	226.039
SUBTOTAL 2006			451.513

Saneamiento 2007

Michoacán

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL AUTORIZADO (m ³) Oyamel		VOL AUTORIZADO (m ³) Pino	
			ZONA		ZONA	
			NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO	NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO
Santa Ana	Ocampo	2007	47.65	0.00	7.39	0.00
Los Remedios	Ocampo	2007	207.64	0.00	8.89	0.00
Jesús de Nazareno	Angangueo	2007	135.15	0.00	28.00	0.00
Cerro Prieto	Ocampo	2007	0.00	0.00	0.00	0.00
SUBTOTAL 2007			390.44	0.00	44.28	0.00

Estado de México

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL UMEN TOTAL (m ³) EN PINO
Ejido Santa Cruz Miahuatlan	Ixtapan del Oro	2007	164.812
Ejido El Capulín	Donato Guerra	2007	445.065
Bienes Comunales de San Juan Xocunusco	Donato Guerra	2007	1054.919
Bienes Comunales de Santa María y sus Barrios	Villa de Allende	2007	201.846
Bienes Comunales de Santa Cruz Miahuatlan	Ixtapan del Oro	2007	537.925
SUBTOTAL 2007			2404.567

Saneamiento 2008

Michoacán

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL AUTORIZADO (m ³) Oyamel		VOL AUTORIZADO (m ³) Pino	
			ZONA		ZONA	
			NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO	NUCLEO	AMORTIGUAMIENTO
Santa Ana	Ocampo	2008	258.60	4.29	29.04	0.00
Los Remedios	Anganguero y Ocampo	2008	175.54	62.96	0.00	0.00
Jesús de Nazareno	Anganguero	2008	0.00	0.00	30.90	0.00
Ocampo	Ocampo	2008	0.00	0.00	0.00	110.13
Calabozo II	Senguio	2008	149.80	0.00	395.65	0.00
Senguio	Senguio	2008	0.00	52.79	0.00	149.22
El Rosario	Ocampo	2008	1330.41	33.98	16.21	0.00
Cerro Prieto	Ocampo	2008	385.50	188.64	0.00	9.90
El Asoleadero	Ocampo	2008	385.50	264.32	0.00	49.29
Chincua	Senguio	2008	61.33	0.00	55.80	0.00
Zona Federal RBMM	Senguio	2008	0.00	0.00	0.00	0.00
SUBTOTAL 2008			2746.69	606.98	527.61	318.53

Estado de México

EJIDO	MUNICIPIO	AÑO	VOL UMEN TOTAL (m ³) EN PINO
Ejido Los Saucos Dotación y Ampliación	Amanalco de Becerra	2008	88.975
Ejido El Capulín	Donato Guerra	2008	86.919
SUBTOTAL 2008			175.894

Saneamiento 2009

Michoacán

EJIDO	MUNICIPIO	VOL. NOTIFICADO A SANEAR (m ³)			SUPERFICIE AFECTADA (Ha)	SUPERFICIE DIAGNOSTICADA (Ha)	ESPECIE HOSPEDANTE	ESPECIE DE PLAGA
		Oyamel (<i>Abies religiosa</i>)	Pino (<i>Pinus pseudostrobus</i>)	Total				
El Rosario	Ocampo	2459.07	23.49	2482.56	5.47	971.00	<i>Abies religiosa</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	<i>Scolytus mundus</i> y <i>D. mexicanus</i>
Cerro Prieto	Ocampo	978.39	0.00	978.39	2.50	265.00	<i>Abies religiosa</i>	<i>Scolytus mundus</i>
Santa Ana	Ocampo	1059.32	35.14	1094.47	11.74	199.61	<i>Abies religiosa</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	<i>Scolytus mundus</i> y <i>D. adjunctus</i>
Los Remedios	Ocampo	945.43	0.00	945.426	2.52	106.98	<i>Abies religiosa</i>	<i>Scolytus mundus</i>
Calabozo I	Senguio	843.01	162.18	1005.19	7.70	7.70	<i>Abies religiosa</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	<i>Scolytus mundus</i> y <i>D. mexicanus</i>
Calabozo II	Senguio	110.76	26.86	137.63	1.00	1.00	<i>Abies religiosa</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	<i>Scolytus mundus</i> y <i>D. mexicanus</i>
Chincua	Senguio	32.09	23.74	55.83	0.50	0.50	<i>Abies religiosa</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	<i>Scolytus mundus</i> y <i>D. mexicanus</i>
Zona Federal	Angangueo	2462.20	0.00	2462.20	14.00	14.00	<i>Abies religiosa</i>	<i>Scolytus mundus</i>
El Asoleadero	Ocampo	919.07	0.00	919.07	15.00	15.00	<i>Abies religiosa</i>	<i>Scolytus mundus</i>
TOTAL		9809.33	271.42	10080.75	60.43	1580.79		

Cartografía

Genero Abies en México

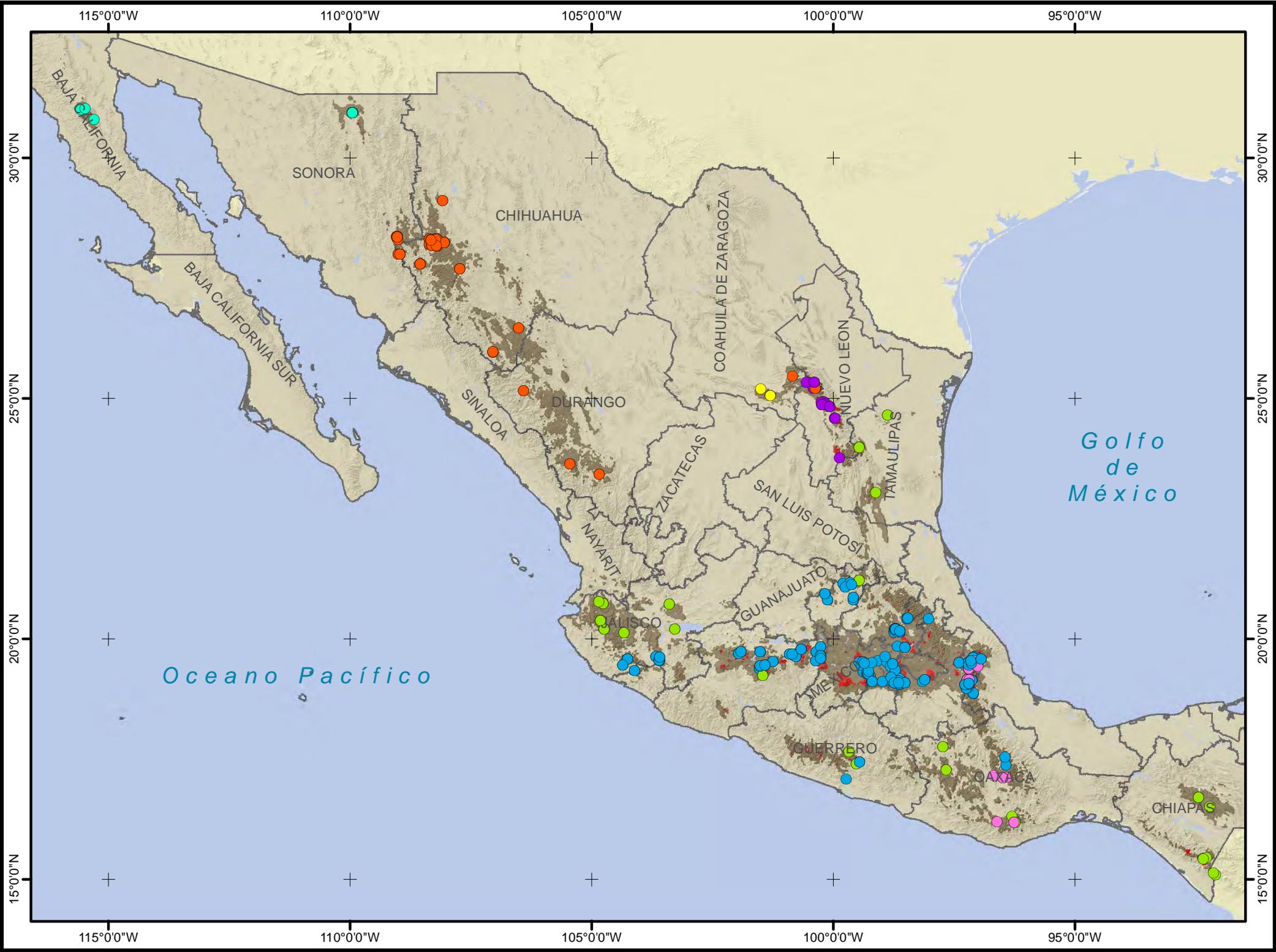
Simbología

Localización bosques de Abies:

- Distribución CONABIO
- Distribución potencial

Registro en herbario:

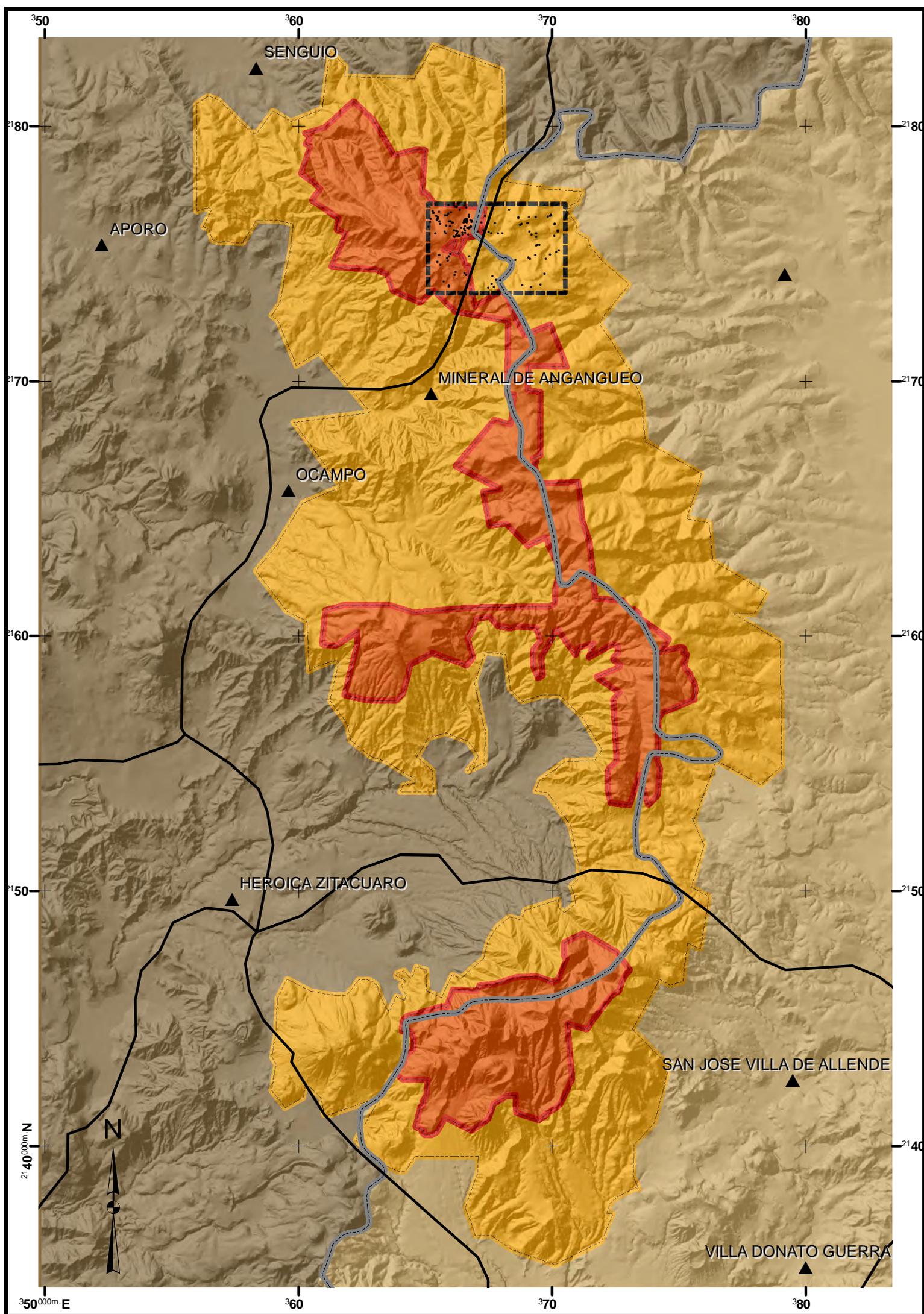
- *Abies coahuilensis*
- *Abies concolor*
- *Abies durangensis*
- *Abies guatemalensis*
- *Abies hickelii*
- *Abies religiosa*
- *Abies vejari*



La cartografía está proyectada en las coordenada geográficas usando el datum NAD 1927.

Fuentes: GBIF, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.





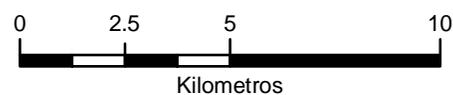
Localización regional del área de muestreo

La cartografía está proyectada en las coordenadas UTM zona 14 usando el datum NAD 1927, las curvas de nivel se dibujan cada 20 metros (maestras cada 200).

Fuentes: Personal, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.

Simbología

- Puntos de verificación
- ▲ Cabeceras municipales
- Carreteras
- ⚡ Límite estatal
- ⬜ Área de muestreo
- Zona núcleo
- Zona amortiguamiento



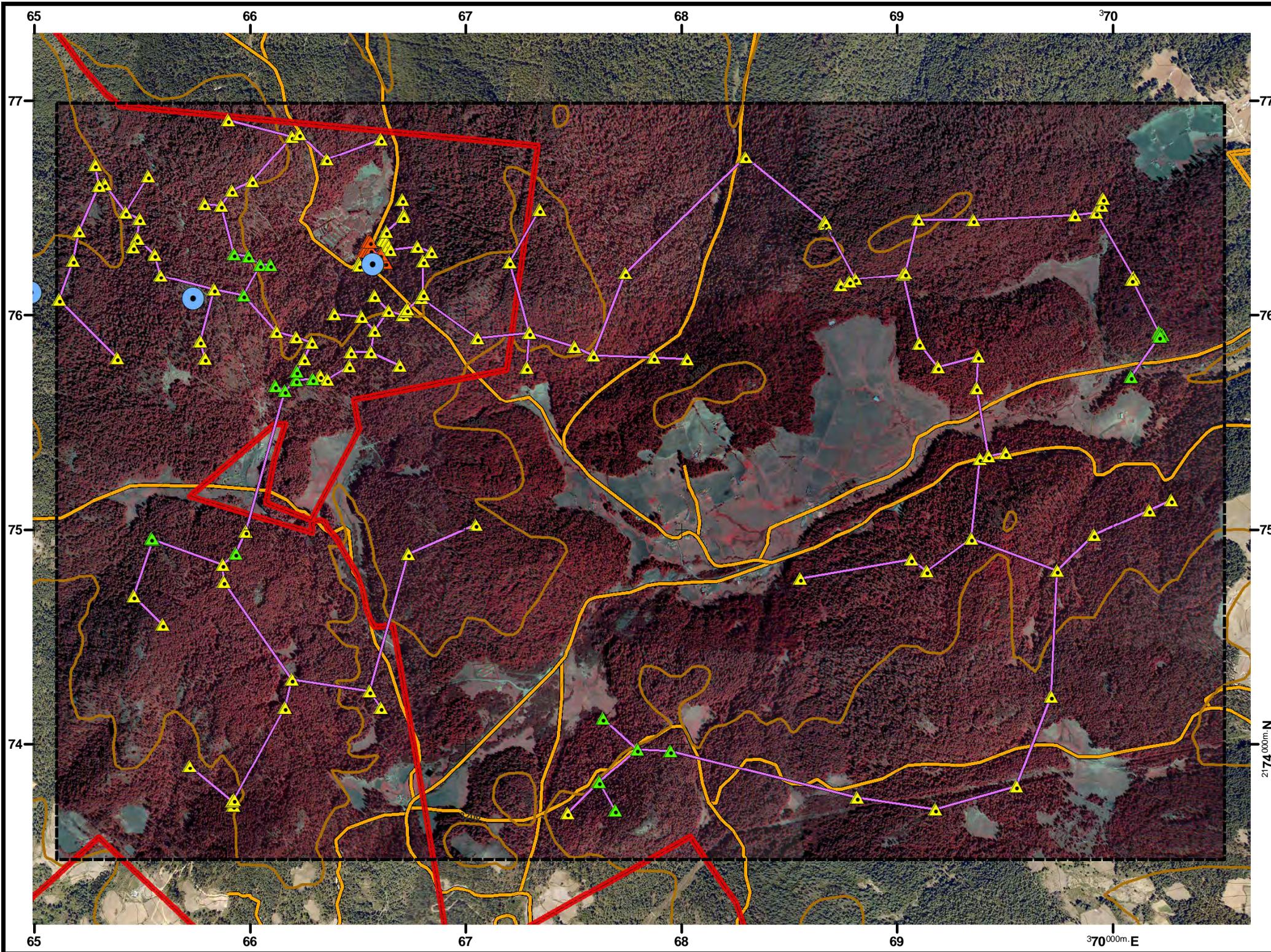
Mosaico VIR; Verificación en campo

Simbología

- Área de muestreo
- Zona amortiguamiento
- Zona núcleo
- Curva nivel (maestra)
- Curva nivel
- Vía de comunicación

Verificación en campo

- Visitado / Verificado
- No visitado
- Ausente
- Saneamiento CONAFOR
- Árbol tendido mínimo



La cartografía está proyectada en las coordenadas UTM zona 14 usando el datum NAD 1927, las curvas de nivel se dibujan cada 20 metros (maestras cada 200).

Fuentes: Personal, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.

0 250 500 1,000
Metros

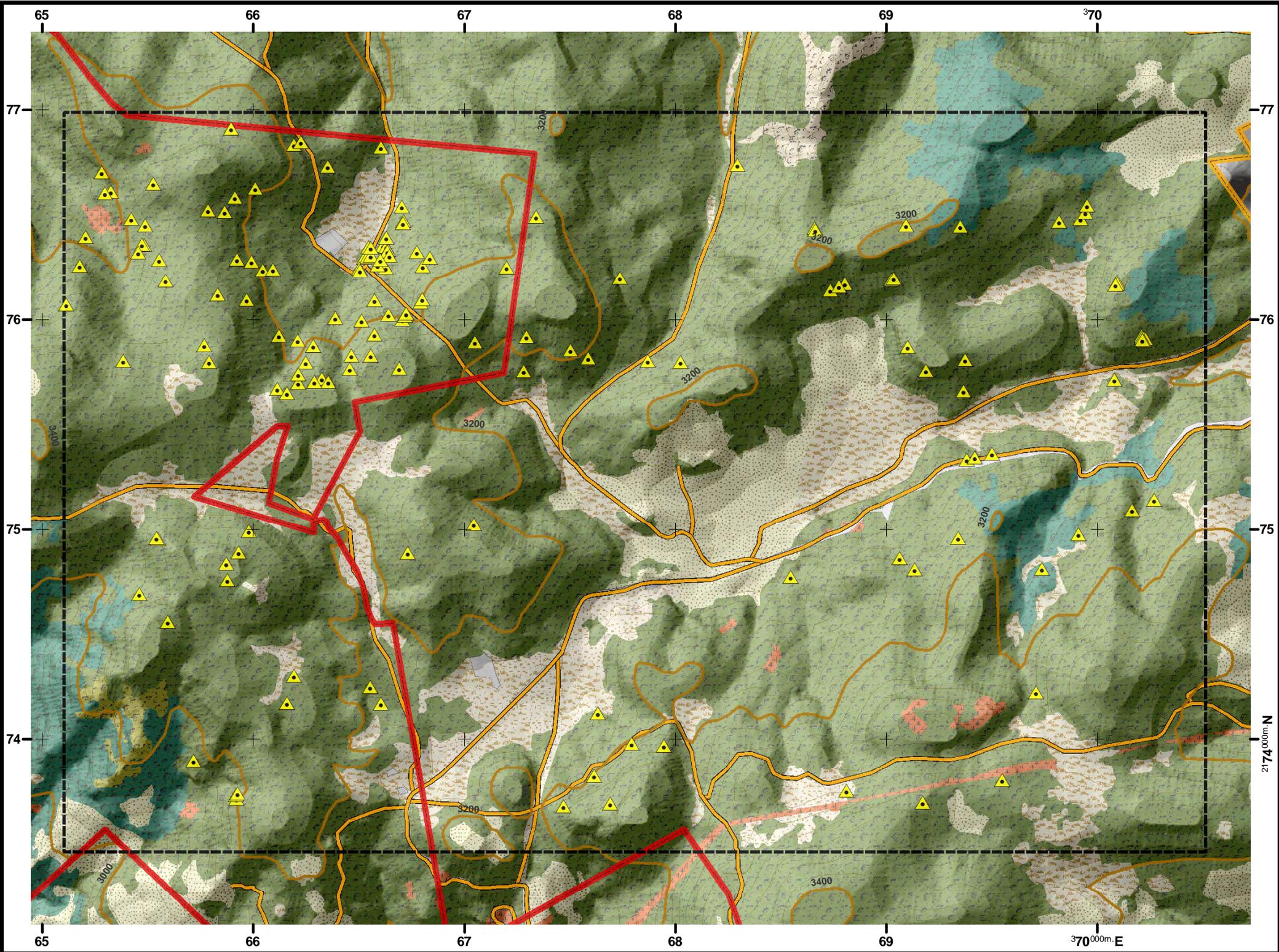
Vegetación y uso de suelo

Simbología

-  Puntos de verificación
-  Área de muestreo
-  Zona amortiguamiento
-  Zona núcleo
-  Curva nivel (maestra)
-  Curva nivel
-  Vía de comunicación

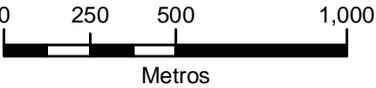
Vegetación / Uso de suelo

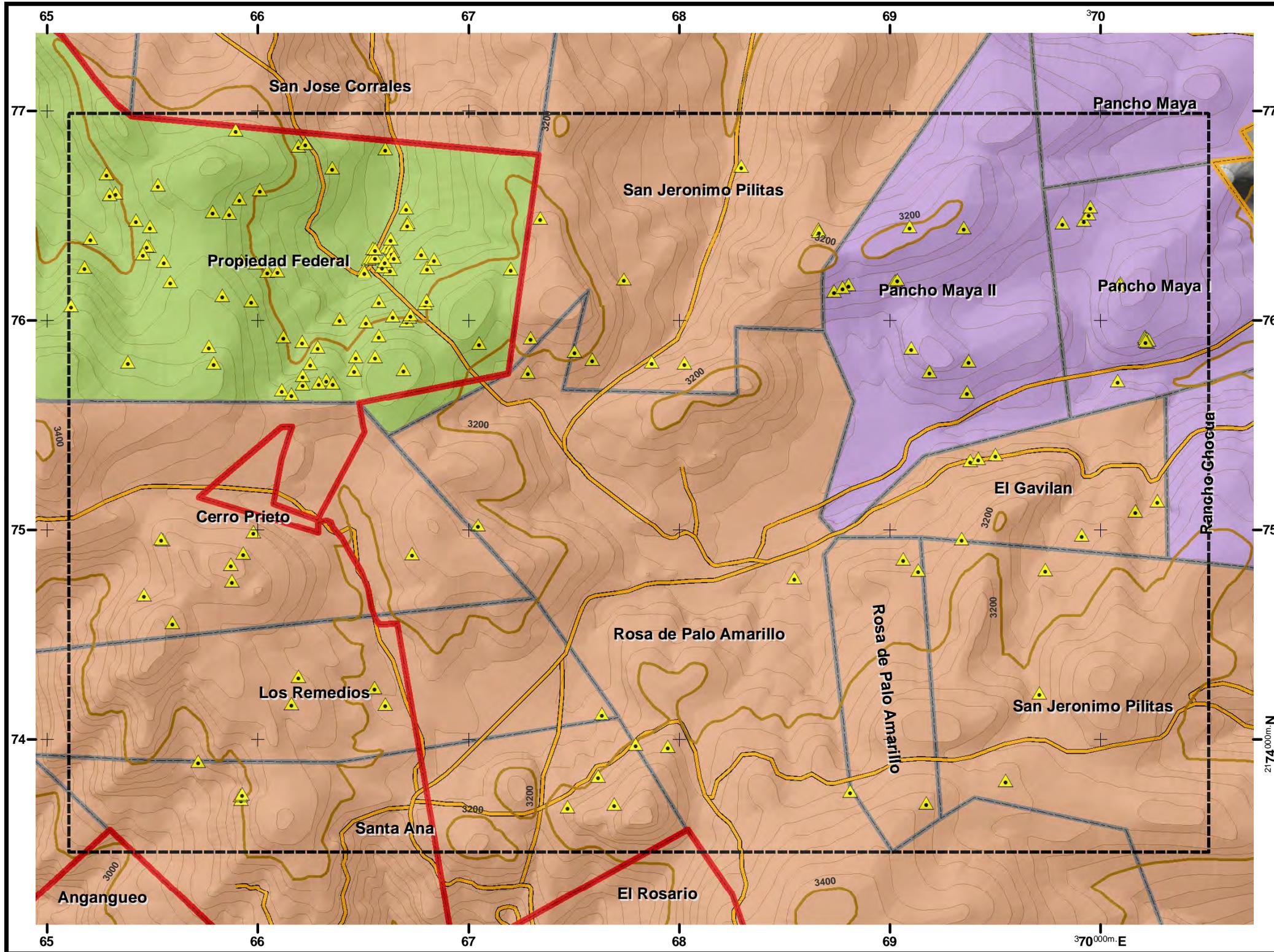
-  Bosque de Oyamel
-  Bosque de Pino
-  Bosque de Encino
-  Deforestado
-  Matorral
-  Pastizal
-  Agrícola
-  Infraestructura



La cartografía está proyectada en las coordenadas UTM zona 14 usando el datum NAD 1927, las curvas de nivel se dibujan cada 20 metros (maestras cada 200).

Fuentes: Personal, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.





Categoría de tenencia del suelo

Simbología

-  Puntos de verificación
-  Área de muestreo
-  Zona amortiguamiento
-  Zona núcleo
-  Curva nivel (maestra)
-  Curva nivel
-  Vía de comunicación

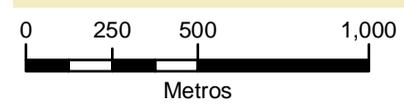
Categoría de tenencia

-  Ejido
-  Pequeña Propiedad
-  Propiedad Federal



La cartografía está proyectada en las coordenadas UTM zona 14 usando el datum NAD 1927, las curvas de nivel se dibujan cada 20 metros (maestras cada 200).

Fuentes: Personal, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.

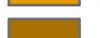


Clasificación espectral; diez categorías

Simbología

-  Puntos de verificación
-  Área de muestreo
-  Zona amortiguamiento
-  Zona núcleo
-  Curva nivel (maestra)
-  Curva nivel
-  Vía de comunicación

Categoría de clasificación

-  Bosque 1
-  Bosque 2
-  Bosque / Pastizal
-  Pastizal
-  Pastizal / Suelo desnudo
-  Juniperus / Pastizal
-  Juniperus
-  Juniperus / Matorral
-  Sombra / Juniperus
-  Sombra



La cartografía está proyectada en las coordenadas UTM zona 14 usando el datum NAD 1927, las curvas de nivel se dibujan cada 20 metros (maestras cada 200).

Fuentes: Personal, Instituto de Geografía, CONABIO e INEGI.
Elaboración: Pablo Leautaud Valenzuela.

