



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS

**RECONSTRUCCIÓN POTENCIAL DE LA HISTORIA DEL FUEGO EN EL
BOSQUE DE *PINUS COULTERI* LAMB. EX D. DON, EN SIERRA BLANCA,
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

PRESENTA

MARÍA ISABEL ALMAZÁN TORRES

DIRECTOR DE TESIS

DR. HIRAM RIVERA HUERTA

ENSENADA, B.C.

DICIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS

**RECONSTRUCCIÓN POTENCIAL DE LA HISTORIA DEL FUEGO EN
EL BOSQUE DE *PINUS COULTERI* LAMB. EX D. DON, EN SIERRA
BLANCA, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA:

MARÍA ISABEL ALMAZÁN TORRES

APROBADA POR:



DR. HIRAM RIVERA HUERTA

DIRECTOR DE TESIS



DR. JOSÉ DELGADILLO RODRÍGUEZ

SINODAL DE TESIS



DR. JUANA CLAUDIA LEYVA AGUILERA

SINODAL DE TESIS

Resumen de la tesis de María Isabel Almazán Torres presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Biología. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2021.

RECONSTRUCCIÓN POTENCIAL DE LA HISTORIA DEL FUEGO EN EL
BOSQUE DE *PINUS COULTERI* LAMB. EX D. DON, EN SIERRA BLANCA,
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Resumen aprobado



Dr. Hiram Rivera Huerta

Nombre del Director

RESUMEN GENERAL

Sierra Blanca es un sistema montañoso ubicado en el municipio de Ensenada al suroeste del Valle de Guadalupe en Baja California. *Pinus coulteri* es una especie relictica que se localiza en esta sierra, así como en otras localidades de Sierra de Juárez y Sierra San Pedro Mártir. En los últimos años la población de esta especie en Sierra Blanca está disminuyendo, las causas son desconocidas. Sin embargo, uno de los motivos asociados a la problemática podrían ser los incendios forestales. Por el interés en el conocimiento de la historia del fuego del sitio de estudio se realizó el presente trabajo con apoyo de la percepción remota, como herramienta fundamental. Utilizando imágenes satelitales Landsat obtenidas de la base de datos del Sistema Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), se calculó el área de los polígonos de cada incendio y se evaluó la severidad de los incendios que afectaron directamente al bosque, también se compararon las áreas del bosque correspondientes a los años de 1993, 2006 y 2017. El periodo de la búsqueda abarcó de 1984-2019 y dentro de ese lapso se encontraron ocho incendios en los años 1984, 1987a y b, 1989a y b, 1990, 1997 y 2006. Los resultados indican que solo dos siniestros afectaron el bosque, 1989b y el del 2006, mismos a los que se les estimó la severidad la cual resultó ser moderada-baja para ambos según la escala de Key y Benson (2006). En cuanto a la reducción de arbolado adulto en el bosque se observó que a partir del 2006 hasta el 2019 se redujo en un 74.47%, mucho más de la mitad. Los resultados de este trabajo pueden servir como base para futuros estudios sobre la especie, así como para promover la conservación del bosque.

ABSTRACT

Sierra Blanca is a mountainous system located in the municipality of Ensenada in the southwest of Valle de Guadalupe in Baja California. *Pinus coulteri* is a relict species that is located in this mountain range, as well as in other localities of Sierra de Juárez and Sierra San Pedro Mártir. In recent years the population of this species in Sierra Blanca has decreased, the causes are unknown, however, one of the reasons associated with the problem could be forest fires. Due to the interest in the knowledge of the fire history of the study site, the present work was carried out with the support of remote perception, as a fundamental tool. Using Landsat satellite images obtained from the United States Geological System (USGS) database, the area of the polygons of each fire was calculated and the severity of the fires that directly affected the forest was evaluated, the forest areas corresponding to the years 1993, 2006 and 2017 were also compared. The search period spanned 1984-2019 and within that period eight fires were found in the years 1984, 1987a and b, 1989a and b, 1990, 1997 and 2006. The results indicate that only two incidents affected the forest, 1989b and 2006, which were estimated to have a moderate severity-low for both according to the scale of Key and Benson (2006). Regarding the reduction of adult trees in the forest, it was observed that from 2006 to 2019 it was reduced by 74.47%, much more than half. The results of this work can serve as a basis for future studies on the species, as well as to promote forest conservation.

DEDICATORIA

A Pinus coulteri, y en general a todos los pinos mexicanos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por permitirme lograr mis sueños, a mi familia por el apoyo, en especial a mi mamá por creer en mí e impulsarme en mis proyectos.

Al Dr. Hiram Rivera Huerta porque desde el primer instante en que me acerqué a él para realizar este trabajo me apoyó, me guió, asesoró y brindó las herramientas necesarias para culminar mi tesis, sin duda alguna, su ayuda fue fundamental en este proyecto.

A la Dra. Claudia Leyva y al Dr. José Delgadillo por aceptar ser parte de mis sinodales y por su apoyo durante mi etapa universitaria.

A la persona más bonita que tengo en mi vida y quien alegra mis días, Sergio Enrique, por estar conmigo en los momentos difíciles, por su amor, su paciencia y apoyo en todos los sentidos.

A mi perrita Ráfaga por ser mi compañera y por su amor incondicional.

Por último, pero no menos importante, a mi compañero de licenciatura Tona quien me motivó a trabajar con pinos y creyó en mi capacidad para realizar mi tesis y a mis compañeros Cynthia, Alexia y Víctor por brindarme su amistad durante nuestra carrera.

A todos muchísimas gracias por estar ahí para mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	iv
ABSTRACT.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
I INTRODUCCIÓN	18
II JUSTIFICACIÓN	21
III OBJETIVOS	23
3.1 Objetivo general.....	23
3.2 Objetivos específicos	23
IV HIPÓTESIS.....	24
V REVISIÓN DE LITERATURA	25
5.1 Concepto de incendio forestal.....	25
5.2 Tipos de incendios forestales.	26
5.3 Concepto de historia o régimen de fuego	26
5.4 Concepto de severidad de fuego	27
5.5 Estudios referentes a la ecología del fuego de <i>P. coulteri</i> en Baja California, México	28
5.6 Estudios referentes a la ecología del fuego de <i>P. coulteri</i> en California, Estados Unidos	30
5.7 Características generales de la especie	32
5.7.1 Nomenclatura	32

5.7.2 Taxonomía.....	32
5.7.3 Descripción botánica de la especie <i>Pinus coulteri</i> Lamb. ex D. Don	33
5.7.4 Distribución natural.....	36
5.7.5 Importancia ecológica	36
5.7.6 Importancia cultural	36
5.8 Percepción remota.....	37
5.8.1 Uso de la percepción remota en estudios de vegetación	39
5.8.2 Uso de satélites Landsat para estudios de vegetación	41
5.8.3 Imágenes satélites.....	43
5.8.4 Índices NBR y dNBR para análisis de severidad de incendios forestales.....	46
5.8.5 Limitaciones de las imágenes satelitales para monitoreo de severidad de incendios.....	50
 VI DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	 52
6.1 Ubicación.....	52
6.2 Topografía y geología.....	54
6.3 Suelos.....	54
6.4 Clima.....	54
6.5 Vegetación	55
6.6 Descripción Biogeográfica del sitio.....	59
 VII MATERIALES Y MÉTODOS.....	 61
7.1 Origen del material	61
7.1.1 Ortoimágenes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	61

7.1.2 Imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).....	62
7.1.3 Búsqueda de incendios forestales recientes con el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	63
7.1.4 Corrección atmosférica de las imágenes satelitales Landsat.....	63
7.1.5 Corrección del error Scan Line Corrector en las bandas de las imágenes de Landsat 7 obtenidas de la base de datos del USGS.	63
7.1.6 Composición RGB 7-4-3 imágenes satelitales	64
7.1.7 Digitalización a percepción de los polígonos de cada incendio	64
7.2 Estimación de la severidad del incendio de Sierra Blanca en 2006.....	65
7.2.1 Metodología del programa Monitoring Trends in Burn Severity (MTBS) del Sistema Forestal de los Estados Unidos (USFS)	65
VIII RESULTADOS.....	68
8.1 Polígono del incendio ocurrido en 1984 cerca de Sierra Blanca	68
8.2 Polígonos del incendio de 1987 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.	70
8.3 Polígonos del incendio de 1989a en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.	73
8.4 Polígonos del incendio de 1989b en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.	76
8.5 Polígonos del incendio de 1990 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.	80
8.6 Polígonos del incendio de 1997 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.	83
8.7 Polígonos incendio del 2006 en Sierra Blanca, Ensenada, B. C.....	86
8.8 Severidad del incendio de 1989b en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.....	91
8.9 Severidad del incendio en 2006 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.....	94
8.10 Polígono del bosque de <i>P. coulteri</i> del año de 1993.....	97
8.11 Polígono actual del bosque de <i>P. coulteri</i> en Sierra Blanca 2017	99

IX DISCUSIÓN	103
X CONCLUSIONES	112
LITERATURA CITADA	114
ANEXOS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Mapa de distribución de <i>P. coulteri</i> (Elbert y Little, 1971).	19
Figura 2.- Mapa de distribución de <i>P. coulteri</i> en Baja California, en rojo Sierra Blanca (modificado de Minnich, 1987).	19
Figura 3.- Triángulo del fuego. Fuente: Asociación Española de Laboratorios de Fuego.....	25
Figura 4.- Descripción botánica de <i>P. coulteri</i> (Matt Strieby, 2018).	35
Figura 5.- Espectro electromagnético (Quirós, 2015).....	38
Figura 6.- Elementos de un sistema de percepción remota (Pérez, 2014).	39
Figura 7.- Comportamiento espectral de la vegetación.	40
Figura 8.- Ejemplo de imágenes multiespectrales e índices cuantitativos derivados (Sebastián <i>et al.</i> , 2013).....	43
Figura 9.- Bandas espectrales empleadas por distintos satélites, entre ellos Landsat 7 ETM +.	45
Figura 10.- Respuesta espectral de la vegetación sana vs vegetación quemada en el infrarrojo de onda corta y el infrarrojo cercano	46
Figura 11.- Representación de la estimación del dNBR a partir del pre NBR y el post NBR considerando el tiempo y densidad de cobertura.	48
Figura 12.- Método MTBS (Monitoring Trends in Burn Severity) mediante el índice NBR y el índice dNBR.	49
Figura 13.- Limitaciones de las imágenes satelitales para el monitoreo de vegetación (modificado de Miller, 2013).	50

Figura 14.- Área de estudio, Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México.....	53
Figura 15.- Bosque de <i>P. coulteri</i> asociado con vegetación de tipo chaparral, Ensenada, Baja California. Fuente: Hiram Rivera Huerta (2017).	56
Figura 16.- Ubicación de la vegetación de bosque de coníferas y encinos en México. Fuente: INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V.	57
Figura 17.- Bosque de <i>P. coulteri</i> asociado con vegetación de tipo chaparral, Ensenada, Baja California. Fuente: Hiram Rivera Huerta (2017).	58
Figura 18.- Ubicación de la vegetación de tipo chaparral en México. Fuente: INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V.....	59
Figura 19.- Regiones biogeográficas del Noroeste de México, en morado se observa la región California compartida por Baja California, México y California, Estados Unidos (León de la Luz <i>et al.</i> , 2018).	60
Figura 20.- Polígono del incendio de 1984 en el arroyo El Barbón cerca de Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 120 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.	69
Figura 21.- Polígonos digitalizados del incendio de 1987a en rojo y el incendio 1987b en azul en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.	71
Figura 22.- Polígonos vectorizados del incendio de 1987a en rojo y el incendio 1987b en azul en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.	72

Figura 23.- Polígono digitalizado del incendio de 1989a en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	74
Figura 24.- Polígono vectorizado del incendio de 1989a en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	75
Figura 25.- Polígono digitalizado del incendio de 1989b en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	77
Figura 26.- Polígono vectorizado del incendio de 1989b en Sierra Blanca. Escala 1: 30 00, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	78
Figura 27.- Polígonos de los incendios de 1989a y b vectorizados ocurridos en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.....	79
Figura 28.- Polígonos digitalizados del incendio de 1990 en Sierra Blanca. Escala 1: 50 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	81
Figura 29.- Polígonos vectorizados del incendio de 1990 en Sierra Blanca. Escala 1: 50 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	82
Figura 30.- Polígono digitalizado del incendio de 1997 en Sierra Blanca. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	84

Figura 31.- Polígono vectorizado del incendio de 1997 en Sierra Blanca. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	85
Figura 32.- Polígono digitalizado del incendio de 2006 en el bosque de <i>P. coulteri</i> , Sierra Blanca. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	87
Figura 33.- Polígono vectorizado del incendio de 2006 en el bosque de <i>P. coulteri</i> , Sierra Blanca. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	88
Figura 34.- Historia de los incendios forestales ocurridos en Sierra Blanca y sitios cercanos durante el período de 1984-2019. Escala 1: 120 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	90
Figura 35.- Severidad del incendio total y del bosque ocurrido en Sierra Blanca en 1989b Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	93
Figura 36.- Severidad del incendio forestal del 2006 en el bosque de <i>P. coulteri</i> , Sierra Blanca, Ensenada, B.C. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.	95
Figura 37.- Polígono del bosque de <i>P. coulteri</i> (verde), Sierra Blanca, Baja California México en 1993. Escala 1: 13 000, WGS84/ UTM zone 11N. Fuente: INEGI.	98
Figura 38.- Polígonos del bosque de <i>P. coulteri</i> (verde), parche 1 (superior) y parche 2 (inferior), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017, en azul de encierran algunos pinos aislados. Fuente: Google Earth Pro.	99

Figura 39.- Polígono parche superior del bosque de <i>P. coulteri</i> (verde), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017. Fuente: Google Earth Pro.	100
Figura 40.- Polígono parche inferior del bosque de <i>P. coulteri</i> (verde), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017. Fuente: Google Earth Pro	101
Figura 41.- Brinzales de <i>P. coulteri</i> en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California. Foto: Hiram Rivera Huerta (2017).	108
Figura 42.- Brinzales de <i>P. coulteri</i> mezclados con vegetación de chaparral en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California. Foto: Hiram Rivera Huerta (2017).....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla I.- Estudios realizados con ejemplares de <i>P. coulteri</i> de Sierra Blanca, Ensenada, Baja California.....	29
Tabla II.- Estudios referentes a la ecología del fuego de <i>P. coulteri</i> en California, Estados Unidos.....	31
Tabla III.- Áreas de los incendios ocurridos en Sierra Blanca, Ensenada, B.C., durante el período de 1984-2019. Se señalan las áreas digitalizadas y vectorizadas en hectáreas (ha), así como la diferencia entre las mismas.	91
Tabla IV.- Niveles de gravedad ordinal y rango de ejemplo de dNBR (escalado por 10^3). Los autores contemplan siete clases que se establecen con base en rangos determinados de dNBR. Fuente: Key y Benson (2006).....	92
Tabla V.- Colores correspondientes a los niveles de severidad.....	92
Tabla VI. - Severidad de los incendios de 1989b y 2006 en el bosque de <i>P. coulteri</i> tras los incendios ocurridos durante el periodo de 1984-2019. La severidad se muestra en cinco clases cada una con su respectiva área en hectáreas. *Solo se estimó severidad del incendio b de 1989.	97
Tabla VII.- Áreas del bosque de <i>P. coulteri</i> con respecto al arbolado adulto en Sierra Blanca, Ensenada, en los años en los años de 1993, 2006 y 2017.....	102

I INTRODUCCIÓN

En el mundo existen aproximadamente 120 especies de pinos y aproximadamente 49 (40%) habitan en México, de las 49 especies registradas para el país, 43 son endémicas, distribuidas en islas biogeográficas (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014), por lo que es el país con mayor diversidad de especies de este taxón a nivel mundial.

El género *Pinus* se caracteriza por ser tolerante al fuego, inclusive puesto que sus conos son duros pueden llegar a depender de este para la liberación y germinación de sus semillas (Salas *et al.*, 2002), por lo que es considerado como el componente taxonómico dominante de los ecosistemas en los que se presenta.

Particularmente, en Baja California este género se distribuye en los principales sistemas montañosos del estado que son la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, también se encuentra en pequeños relictos de bosque como en el caso del Sierra Ulloa (Bosque de los Atenuatas) y Sierra Blanca en el municipio de Ensenada. Cabe destacar, que debido a los intereses de este trabajo, solo se abordará como tema central a Sierra Blanca.

Sierra Blanca es un pequeño sistema montañoso que preserva una especie de pino relictas, el *P. coulteri* (CONAFOR, 2014), la distribución de esta especie es limitada (Fig. 1), únicamente se encuentra en California, Estados Unidos y en Baja California, México (Zobel, 1952), lo anterior se debe a que gran parte de ambos estados comparten la Provincia Florística Californiana. La distribución de este pino en Baja California fue registrada por Minnich (1987) (Fig. 2).



Figura 1.- Mapa de distribución de *P. coulteri* (Elbert y Little, 1971).

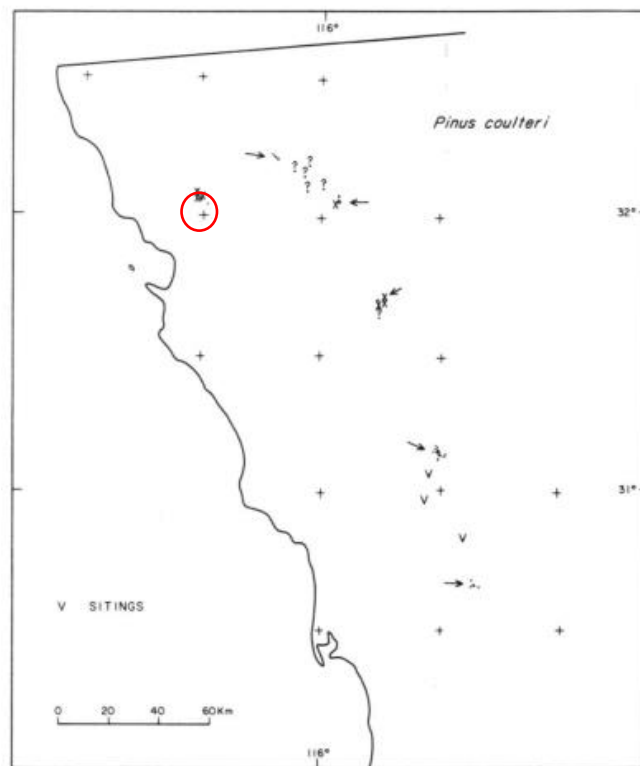


Figura 2.- Mapa de distribución de *P. coulteri* en Baja California, en rojo Sierra Blanca (modificado de Minnich, 1987).

En el estado *P. coulteri* se asocia con vegetación de tipo chaparral, característica del ecosistema mediterráneo y clasificada como vegetación dependiente del fuego. Propiamente, *P. coulteri* es una especie dependiente del fuego y es reconocido como un pino serótino que necesita de este para abrir sus conos y propagar sus semillas (Rodríguez, 2014). Aunque, otros autores han identificado que la serotinidad de *P. coulteri* es variada entre poblaciones y que incluso está relacionada con el tipo de vegetación con que se asocia, y lo describen más bien como un pino facultativamente piriscente o con serotinidad parcial (Borchert *et al.*, 2003).

En general, se conoce que los incendios en los bosques de pino en Baja California naturalmente suelen ser de baja a moderada severidad y son indispensables para algunas especies (Rivera *et al.*, 2016). La variación histórica de los incendios forestales se conoce como historia o régimen del fuego, la cual se define como el conjunto de condiciones recurrentes del fuego en un determinado ecosistema y para definirla se utilizan algunos parámetros como: severidad, frecuencia y comportamiento del fuego (Myers, 2016).

Actualmente, uno de los principales métodos para estudios sobre la historia del fuego en los bosques es la percepción remota, ya que el uso de imágenes satelitales permite hacer estimaciones de cobertura y severidad de incendios. En virtud de lo anterior y referente a *P. coulteri*, se puede utilizar esta metodología para estudiar los remanentes de esta especie considerada como única en el país. Así el presente trabajo busca contribuir al conocimiento de la ecología del fuego de la especie, en un sitio amenazado por el cambio de uso de suelo, de tal manera que los resultados puedan servir como base para futuros estudios.

II JUSTIFICACIÓN

El hecho de ser un país que posee una amplia diversidad de pinos, incluye el reconocimiento mundial, pero también un fuerte compromiso, pues es fundamental conocer los pinos mexicanos para poder implementar estrategias de conservación, manejo y aprovechamiento de este recurso forestal.

En el caso de *P. coulteri* aunque no es una especie endémica, sí es nativa del país y se encuentra en pequeñas islas biogeográficas en Sierra de Juárez, que corresponden con laderas oeste y noroeste de la Laguna Hanson, en Sierra Blanca (parte costera de Sierra Juárez), al suroeste del Rancho San Faustino y en pequeños rodales aislados en exposiciones al norte en Sierra San Pedro Mártir (Kral, 1993).

Su distribución está restringida al sector septentrional de la península, el cual incluye a las sierras de Juárez y San Pedro Mártir, así como la planicie costera del lado del Océano Pacífico; asimismo, comparte junto con California, Estados Unidos, la provincia de California, según el esquema biogeográfico de Rzedowski de 1978 (Morrone, 2005), y se asocia también con otros tipos de vegetación como el chaparral mixto (Chardon *et al.*, 2014), lo que hace que *P. coulteri* sea una especie única en el país.

Estudios como los de Fernández (2013) y Arellano (2013) han demostrado que los rodales de *P. coulteri* en la región presentan variabilidad genética, lo cual es un factor significativo para la potencial conservación de la especie, así mismo es importante mencionar que este pino se encuentra enlistado en la NOM-059-SEMARNAT-2010 para

la Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres, bajo la categoría de especie en Peligro de Extinción (CONAFOR, 2014).

Esta especie tiene importancia ecológica debido a que se ha reconocido como especie resistente al fuego (Fernández, 2013) y en general los bosques de pino son hábitat de fauna silvestre e influyen en diversos procesos funcionales de los ecosistemas como los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos y ofrecen también servicios ambientales, además de tener relevancia social y económica (Sánchez, 2008). No obstante, tanto la especie como la zona en la cual se distribuye en el país han sido poco estudiadas, en particular sobre el tema de ecología del fuego, de esta forma estudiar el régimen de fuego ayuda a comprender la estructura y composición del ecosistema y contribuye al conocimiento de la ecología y distribución de la especie.

Por lo anterior es primordial reconocer la importancia de estudiar áreas tan frágiles como Sierra Blanca ya que esto permitirá conocer, proteger y conservar parte de la biodiversidad nacional, a través del uso de herramientas como la percepción remota que ofrece una amplia cobertura espacial y temporal para este tipo de estudios.

III OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar la historia del fuego del bosque de *Pinus coulteri* D. Don en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México, a partir de imágenes satelitales y datos Landsat.

3.2 Objetivos específicos

Revisar y compilar la información en distintas bases de datos sobre los incendios ocurridos en Sierra Blanca y sitios aledaños para reconstruir la historia del fuego del bosque.

Delimitar las cicatrices del área afectada por cada incendio ocurrido en el bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca y alrededores.

Delimitar el polígono actual del remanente de pinos adultos en Sierra Blanca, Baja California, México.

Estimar la severidad del fuego de los incendios forestales que hayan afectado al bosque de *P. coulteri* mediante imágenes satelitales.

IV HIPÓTESIS

Existen evidencias en distintas bases de datos sobre los incendios forestales ocurridos en el bosque de Sierra Blanca y alrededores, los cuales permiten reconstruir la historia del fuego de este sitio.

El bosque de *P. coulteri* ha disminuido su superficie en gran medida debido a los incendios forestales allí ocurridos.

V REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Concepto de incendio forestal

Un incendio forestal se define como incendios que ocurren en los diferentes tipos de ecosistemas que afectan la vegetación de bosques, pastizales, matorrales, selvas, entre otros y que se propagan libremente sin control ya sea que ocurran de manera natural o a consecuencia del hombre (Pausas, 2012), para que ocurran se requieren tres componentes fundamentales: oxígeno, combustible y calor (Fig. 3) (Agee, 1993).

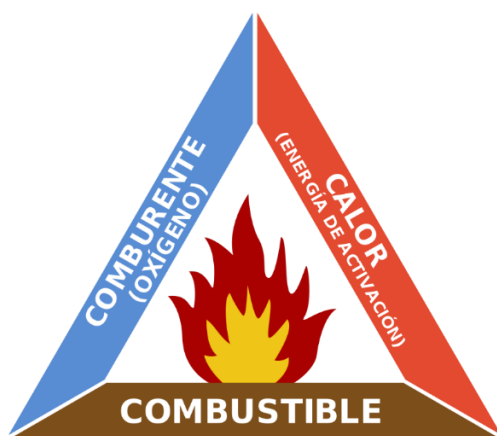


Figura 3.- Triángulo del fuego. Fuente: Asociación Española de Laboratorios de Fuego.

Se piensa que estos incendios no están sujetos al control humano y que uno de los factores que determina su magnitud es el combustible acumulado en los ecosistemas. A pesar de lo anterior, se estima que el 99% de los incendios forestales son ocasionados por el hombre principalmente por actividades agropecuarias o de urbanización, mientras que el resto son producto de fenómenos naturales como por ejemplo los rayos (CONAFOR, 2010).

5.2 Tipos de incendios forestales.

Las perturbaciones pueden ser muy variables, en el caso de los incendios, por ejemplo, pueden ocurrir por causas naturales o antropogénicas, además pueden ser pequeños e inofensivos o contrariamente algunos pueden llegar a ser devastadores, por tal motivo, en México el CENAPRED (2021) los clasifican de la siguiente manera:

Incendios superficiales: como su nombre lo dice en este tipo de incendio, el fuego se propaga de manera horizontal sobre la superficie y solamente alcanza entre 1-1.5 m de altura. Afectando combustibles tanto vivos como muertos entre ellos: hojarasca, arbustos, troncos, plántulas en regeneración, etc.

Incendios subterráneos: en este tipo de incendios el fuego se propaga de manera superficial, pero por debajo del suelo, estos incendios no suelen producir llamas y el humo que emiten es poco, por lo general afectan las raíces y la materia orgánica acumulada.

Incendio de copa o aéreo: estos se caracterizan por iniciar de manera superficial, pero posteriormente se propagan de manera vertical por la vegetación escalando hacia la copa de los árboles, son considerados como los más peligrosos y destructivos, además son los más difíciles de controlar.

5.3 Concepto de historia o régimen de fuego

Myers (2016) define el régimen de fuego como el conjunto de condiciones recurrentes del fuego en un determinado ecosistema, se mide a través de parámetros como: severidad, frecuencia, momento y tamaño de la quema, comportamiento del fuego, entre otros.

Por su parte, Agee (1993) lo define de una manera más práctica como el papel que juega el fuego en un ecosistema y se basa en las características de la perturbación como los efectos sobre la vegetación dominante, la gravedad o efectos ecológicos.

En especial, *P. coulteri* en sus límites altitudinales inferiores, donde se traslapa con el chaparral que se caracteriza por un régimen de fuego destructivo (Rodríguez, 2014).

5.4 Concepto de severidad de fuego

De manera particular, la severidad es una de las variables de mayor importancia en los incendios forestales, esta variable se correlaciona con la cantidad de biomasa consumida y aunque no tiene una única definición, algunos autores (Arellano *et al.*, 2017) mencionan que el término se usa para hacer énfasis al nivel de daño o perturbación que ocasiona el fuego en un ecosistema dado y su cálculo es fundamental para comprender la recuperación de áreas quemadas, de tal modo se considera que una severidad alta está ligada a tasas de recuperación de vegetación baja y tasas de erosión elevadas en comparación con sitios con severidad baja (Montorio *et al.*, 2014).

Otros autores (Key y Benson, 2006 en Montorio *et al.*, 2014) lo definen como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego, así mismo consideran que se puede discernir dos tipos de efectos del fuego, es decir, de primer y de segundo orden, los de primer orden se relacionan al impacto inmediato sobre el ecosistema por tanto son el resultado del proceso de combustión y se reconoce como severidad del fuego a corto plazo las mediciones correspondientes debe hacerse en un cierto periodo de tiempo ya que los efectos pueden verse afectados por condiciones meteorológicas u otros procesos biofísicos, mientras que los efectos de segundo grado se asocian con la respuesta del

ecosistema en cuanto a regeneración y la dinámica hidrogeomorfológica, se denomina también severidad a largo plazo por lo que su evaluación se puede hacer aún años después del incendio y compararse con las condiciones pre-incendio.

Por lo anterior, la elección de metodologías para estudios de severidad del fuego es crucial para planificar acciones después de los incendios. En el presente trabajo se estudiarán únicamente los efectos de primer orden, es decir, los efectos a corto plazo.

5.5 Estudios referentes a la ecología del fuego de *P. coulteri* en Baja California, México

Es preciso mencionar que *P. coulteri* fue encontrado por el botánico y explorador, Thomas Coulter, entre 1832 y 1833 cerca de Cone Peak, California, Estados Unidos, pero fue hasta 1836 que la especie fue descrita por el botánico Lamb ex David Don (Arellano, 2013).

A pesar de ello, en México y en especial en la zona de Sierra Blanca en Baja California, la especie ha sido escasamente estudiada, los registros de estudios realizados en el sitio son muy limitados. No obstante, a continuación se muestran algunos trabajos realizados en Sierra Blanca (tabla I) y estudios similares a la ecología del fuego de *P. coulteri*, llevados a cabo en California, Estados Unidos (tabla II).

Título	Objetivo	Autores y año.
Variación Morfológica de Conos y Semillas en Cinco Poblaciones de <i>P. coulteri</i> D. Don, en Baja California, México.	Estimar la magnitud de la variación morfológica de 14 variables en conos y semillas en cinco poblaciones naturales de <i>P. coulteri</i> en Baja California Norte, México.	(Fernández, 2013).
Variación Morfológica y Anatómica <i>P. Coulteri</i> D. Don de Acículas en Poblaciones Naturales de Baja California.	Determinar la variación en nueve variables morfológicas y siete anatómicas de las acículas dentro de poblaciones de la especie.	(Arellano, 2013).
Indicadores Reproductivos de Conos y Semillas de Poblaciones Naturales de <i>P. coulteri</i> D. Don en Baja California.	Comparar la producción de semillas entre dos poblaciones de <i>P. coulteri</i> , una ubicada en San Faustino y la otra en Santa Catarina, Baja California, además se estimaron eficiencia, pérdida de semillas y algunos indicadores reproductivos de las mismas.	(García, 2012).
Historia de El Niño-Oscilación Sur y precipitación en Baja California: reconstrucción usando registros de anillos de árboles.	Examinar la sensibilidad a la precipitación de diferentes especies de pinos de Baja California, así como la evaluación del potencial de estos para desarrollar reconstrucciones climáticas regionales.	(Martijena, 2003).
La distribución de árboles forestales en el norte de Baja California, México.	Este trabajo describe características y la distribución de las especies de pinos de Baja California, (incluyendo a <i>P. coulteri</i>).	(Minnich, 1987).

Tabla I.- Estudios realizados con ejemplares de *P. coulteri* de Sierra Blanca, Ensenada, Baja California.

5.6 Estudios referentes a la ecología del fuego de *P. coulteri* en California, Estados Unidos

Aunque han sido pocos los estudios realizados con *P. coulteri* en la región y prácticamente nulos en cuestión de ecología del fuego, la existencia de estudios afines (tabla II) con la misma especie, pero en California, Estados Unidos, permiten de alguna manera contrastar y guiar la presente tesis.

Título	Objetivo	Autores y año.
Early postfire seed dispersal, seedling establishment and seedling mortality of <i>P. coulteri</i> (D. Don) in central coastal California, USA	Evaluar la severidad del bosque de <i>P. coulteri</i> a consecuencia de un incendio forestal ocurrido en septiembre de 1996 en 760 ha del Área Natural de Investigación Cañón Americano. Además, cuantificar la supervivencia y mortalidad de plántulas después de un año del incendio.	(Borchert <i>et al.</i> , 2003).
Predicting Postfire Survival in Coulter Pine (<i>P. coulteri</i>) and Gray Pine (<i>Pinus sabiniana</i>) after Wildfire in Central California	Desarrollar modelos para predecir los efectos en la supervivencia de <i>P. coulteri</i> y <i>P. sabiniana</i> a causa del fuego.	(Borchert <i>et al.</i> , 2002).
Serotiny and cone-habit variation in populations of <i>Pinus coulteri</i> (Pinaceae) in the southern coast ranges of California	Describir la serotinia y la variación del hábito del cono de <i>P. coulteri</i> con relación a los factores que influyen en la retención de semilla, así como los tipos de comunidades donde se encuentra esta especie en las cordilleras costeras del sur de California.	(Borchert, 1985).
<i>P. coulteri</i> and wildfire on Mount Diablo, California.	Determinar los efectos en tres rodales de <i>P. coulteri</i> tras dos incendios ocurridos uno en julio de 1931 y el otro en 1977 en Mount Diablo, California.	(Vale, 1979).

Tabla II.- Estudios referentes a la ecología del fuego de *P. coulteri* en California, Estados Unidos

5.7 Características generales de la especie

5.7.1 Nomenclatura

Reino: Plantae

División: Pinophyta

Clase: Pinopsida

Orden: Pinales

Familia: Pinaceae

Nombre científico: *Pinus coulteri* Lamb. ex D. Don

Nombres comunes: en su área de distribución natural se le conoce como pino Coulter o pino de brea.

5.7.2 Taxonomía

Pinus coulteri es reconocido por algunos autores (Rodríguez, 2014) como una especie serótina, formando parte del grupo de los pinos seróticos al igual que especies como: *P. contorta*, *P. attenuata*, *P. muricata*, *P. radiata*.

La serotinia es una adaptación que presentan algunas plantas (entre ellas los pinos) como respuesta al fuego, consiste en el mantenimiento cerrado de los conos después de su maduración, puesto que la liberación de la semilla depende del fuego o condiciones xeriscentes (Campos, 2010), a pesar de ello, dicha característica también puede verse influenciada por otros factores fisiológicos o ambientales como: el aumento de temperatura, sequías o incendios, e incluso la serotinidad puede ser variable no solo entre especie sino también entre poblaciones de la misma especie (Martín *et al.*, 2017).

Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, otros autores (Borchert *et al.*, 2003) han probado que la serotinia de *P. coulteri* varía dependiendo el tipo de vegetación con el que se asocia, pues resulta que este pino se comporta como una especie facultativamente piriscente, es decir, si la presencia de fuego es nula, las semillas del cono igual se liberaran aunque bajo otras características como un periodo de tiempo de pocos años al madurar, periodo de tiempo muy corto en comparación con rodales de ese mismo pino pero asociado por ejemplo a chaparral, donde prácticamente la especie depende del fuego para liberar sus semilla, bajo esas condiciones el tiempo de retención de semilla aumenta radicalmente.

Por su lado, Rodríguez (2014) menciona que por lo regular los bosques de pinos serótinicos presentan un régimen de incendios de copas o regímenes mixtos, con reemplazo de nuevos individuos a partir de la semilla de sus progenitores resguardada en los conos serótinicos. De igual modo, se ha observado que los pinos serótinicos mexicanos prosperan sobre sitios incendiados moderadamente e incluso sitios con gran severidad. Referente a *P. coulteri*, este se ha caracterizado por un régimen destructivo en sus límites altitudinales donde se traslapa con el chaparral.

5.7.3 Descripción botánica de la especie *Pinus coulteri* Lamb. ex D. Don

Delgadillo y Camacho (2004) describen en su actualización de las especies de plantas incluidas en la NOM-059-ECOL-2000 al *P. Coulteri* (Fig. 4) de la siguiente manera:

Árbol

P. coulteri es un árbol conífero de tronco recto o torcido en el base alcanzado de entre 15-25 m de altura total y 1 m de diámetro de altura al pecho (d.a.p.), las ramas inferiores

del árbol suelen ser largas y generalmente crecen de manera ascendente, la corteza es gruesa y escamosa color café oscuro con placas largas y fisuras irregulares negras.

Hojas

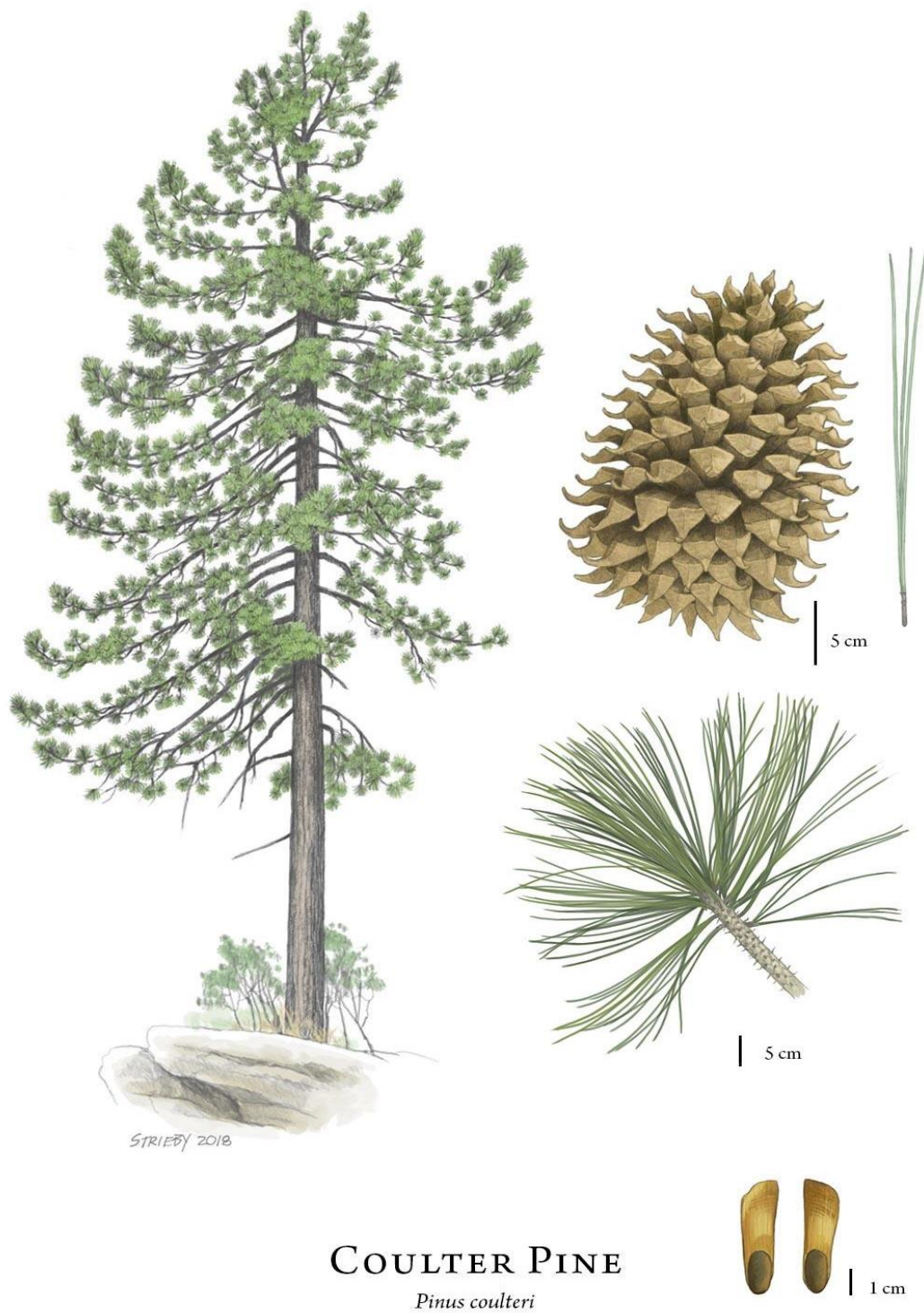
Presenta hojas aciculares rectas o curvas, rígidas y comúnmente resinosas se encuentran organizadas en fascículos de 3 y su longitud varía entre 15-25 cm y 1.9-2.2 mm de ancho formando una copa ancha e irregular.

Conos

Los conos de *P. coulteri* son asimétricos en la base y de forma ovoide-cilíndrico al abrirse, su color es marrón amarillo pálido, sostenidos de un pedúnculo robusto de 3 cm de largo (Kral, 1993), pueden llegar a medir entre 20-35 cm de largo y 15-20 cm de ancho, crecen solitarios o en pares y cuando se abren suelen ser muy resinosos.

Semillas

Las semillas son de forma ovoide color marrón oscuro mide de 10-18 mm de largo y 7-10 mm de ancho, su ala es articular de color café y mide 18-30 mm de largo y entre 12-16 mm de ancho.



© 2018 Matt Strieby

Figura 4.- Descripción botánica de *P. coulteri* (Matt Strieby, 2018).

5.7.4 Distribución natural

Pinus coulteri es una especie con distribución limitada, crece desde los 300 a 2,100 m sobre el nivel del mar, sobre laderas rocosas, llanuras, entre la transición de distintos tipos de vegetación, por ejemplo: bosque roble y chaparral; su rango de resistencia al frío es de -12.1° y -6.7°C y su distribución natural se restringe a los Estados Unidos, se encuentra en las sierras costeras de California hasta la frontera de México, donde únicamente se encuentra de manera aislada en la parte costera de la Sierra de Juárez, conocida como Sierra Blanca y de modo disperso en pequeñas colonias en el interior de Sierra de Juárez y Sierra San Pedro Mártir en Baja California (Kral, 1993).

5.7.5 Importancia ecológica

Generalmente, los pinares proveen una amplia variedad de servicios ambientales, entre ellos la captura de carbono, producción de oxígeno, recarga de acuíferos, propician un lugar para la degradación y reciclaje de desechos orgánicos, proveen refugio para especies animales, fungen como banco genético de semillas, permiten la polinización de plantas, controlan la erosión del suelo, entre muchas otras (PROFEPA, 2020).

En especial, *P. coulteri* es una conífera muy distintiva del resto debido al gran tamaño de su cono, el cual es considerado como el más grande de todos los pinos (Delgadillo, 2004).

5.7.6 Importancia cultural

Sierra Blanca es considerada por la comunidad indígena Kumiai, habitantes de San Antonio Necua, Ensenada, Baja California, como una montaña sagrada en su cosmovisión, los pinos son considerados como “guerreros que marchan sobre la sierra”,

incluso son vistos como guardianes de su territorio, además, los indígenas kumiai subían al bosque para recolectar las acículas secas de los pinos, con las cuales las mujeres de la comunidad elaboran canastos, medallones y otras artesanías (CONAFOR, 2019), por lo que representan parte de la identidad de la cultura kumiai.

A pesar de que este pino no tiene valor comercial como especie maderable, ni sus semillas se recolectan para consumo, su importancia cultural es especial para grupos nativos como los kumiai, los kiliwas y los paipai (Arellano, 2013).

5.8 Percepción remota

Todos los cuerpos sobre la Tierra pueden emitir y/o reflejar energía electromagnética a causa de su interacción con la energía radiante del sol, de modo que cada objeto posee una respuesta espectral propia (Villegas, 2008). La percepción remota es un conjunto de técnicas que utilizan este fenómeno, para obtener imágenes de la superficie terrestre mediante sensores satelitales ubicados en plataformas espaciales, en consecuencia, estas imágenes son el resultado de la interacción electromagnética entre la Tierra, el sensor y el sol, usado la mayoría de las veces como fuente de radiación, o en su defecto por un haz energético artificial (Sobrino, 2014).

El principio empleado en este conjunto de técnicas está fundamentado en dos teorías, inicialmente contrapuestas, la primera es la teoría ondulatoria de Huygens-Maxwell en la que describe que cualquier partícula genera una vibración tipo “ondas”, las cuales se desplazan en un campo eléctrico y magnético que las rodea actuando como una fuente de radiación; la segunda, la teoría cuántica de la luz de Planck-Einstein, en esta se considera que todos los cuerpo emiten energía electromagnética en forma discreta y no continua

medida a través de cuantos o fotones (Hernández, 2011), aunque actualmente se sabe que la luz puede comportarse de ambas maneras.

Por lo tanto, la energía electromagnética es uno de los principales cimientos de la percepción remota, cuando la energía intercepta algún objeto pueden ocurrir modificaciones en su propagación, es decir, además de absorberse y/o emitirse, también se puede dispersar, refractar o reflexionar (Catuna, 1995). Por otra parte, esta energía suele organizarse en bandas con rangos de valores específicos de longitudes de onda donde la radiación manifiesta un comportamiento similar, este conjunto de radiación electromagnética se le conoce como espectro electromagnético (Fig. 5), va desde longitudes de onda menores como los rayos cósmicos, gamma, x, seguido de los ultravioleta, los visibles, infrarrojos hasta las ondas de radio (SEMAR, 2009).

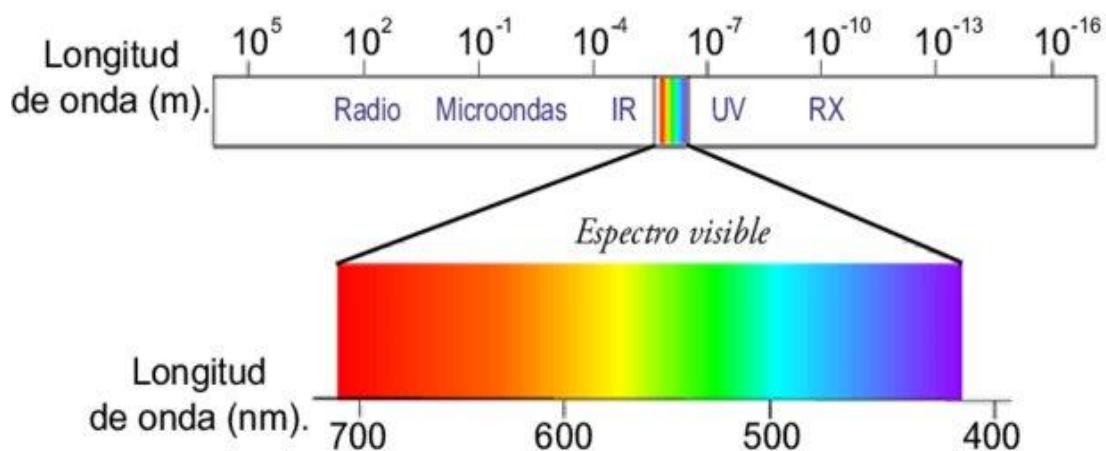


Figura 5.- Espectro electromagnético (Quirós, 2015).

Según Pérez (2014), en general un sistema de teledetección remota está compuesto por tres elementos básicos (Fig. 6): una fuente de energía que proporciona el flujo energético

que recibe el sensor, la fuente más típica es el sol que ilumina la superficie terrestre; el objeto observado que refleja o absorbe parte de la energía dependiendo de sus propiedades físicas y químicas y un sensor el cual capta la energía procedente de los objetos en la superficie terrestre después la codifica, graba y envía a un sistema de recepción terrestre.

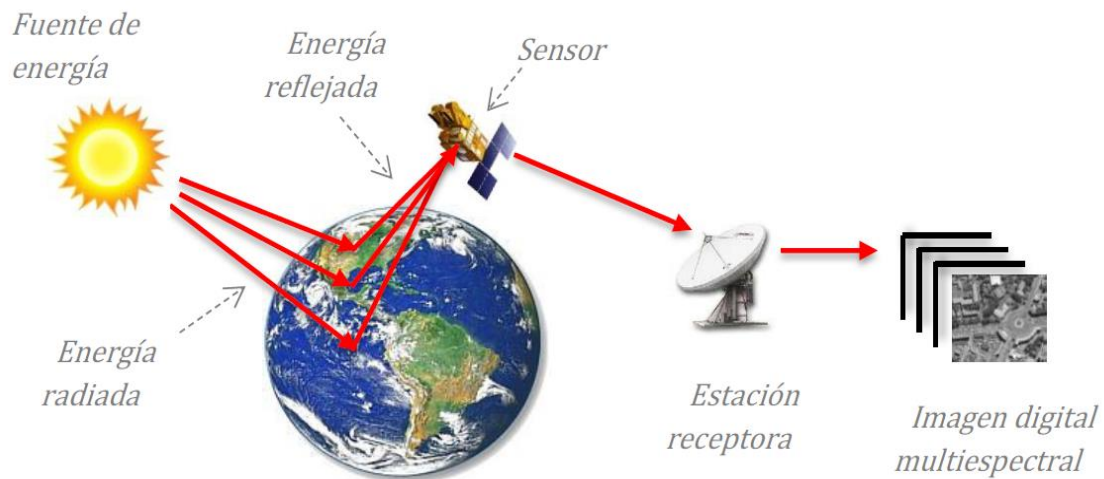


Figura 6.- Elementos de un sistema de percepción remota (Pérez, 2014).

5.8.1 Uso de la percepción remota en estudios de vegetación

La percepción remota es muy útil en estudios de vegetación, ya que al igual que los cuerpos sobre la Tierra, la vegetación también presenta una reflectancia peculiar en presencia de longitudes de onda específicas, esto se debe a la manera en que las plantas llevan a cabo la fotosíntesis pues existe una fuerte correlación entre este proceso y la energía radiante, así como también entre las estructuras celulares y sistema vascular compuesto mayormente por agua (Villegas, 2008). Además, los cambios en la reflectividad también están vinculados con la eliminación total o parcial de la vegetación,

el cambio en el contenido de humedad de la misma, la exposición al suelo y la aparición de cubiertas como las cenizas (Montorio *et al.*, 2014).

Gran parte de la información relativa de la vegetación está comprendida en el rango espectral va desde una elevada reflexión en el infrarrojo cercano (0.78-1.4 μm) hasta la absorción en el rojo (0.63-0.70 μm) (Castillo, 2002). Sin embargo, en la región visible (0.4-0.7 μm) la reflectividad es baja (Fig.7), esto se debe a que durante la fotosíntesis los pigmentos fotosintéticos contenidos en el cloroplasto, como la clorofila, absorben la energía, aunque en menor cantidad en la región verde del espectro (Manzo y Meave, 2003) por lo que a simple vista la vegetación presenta ese color.

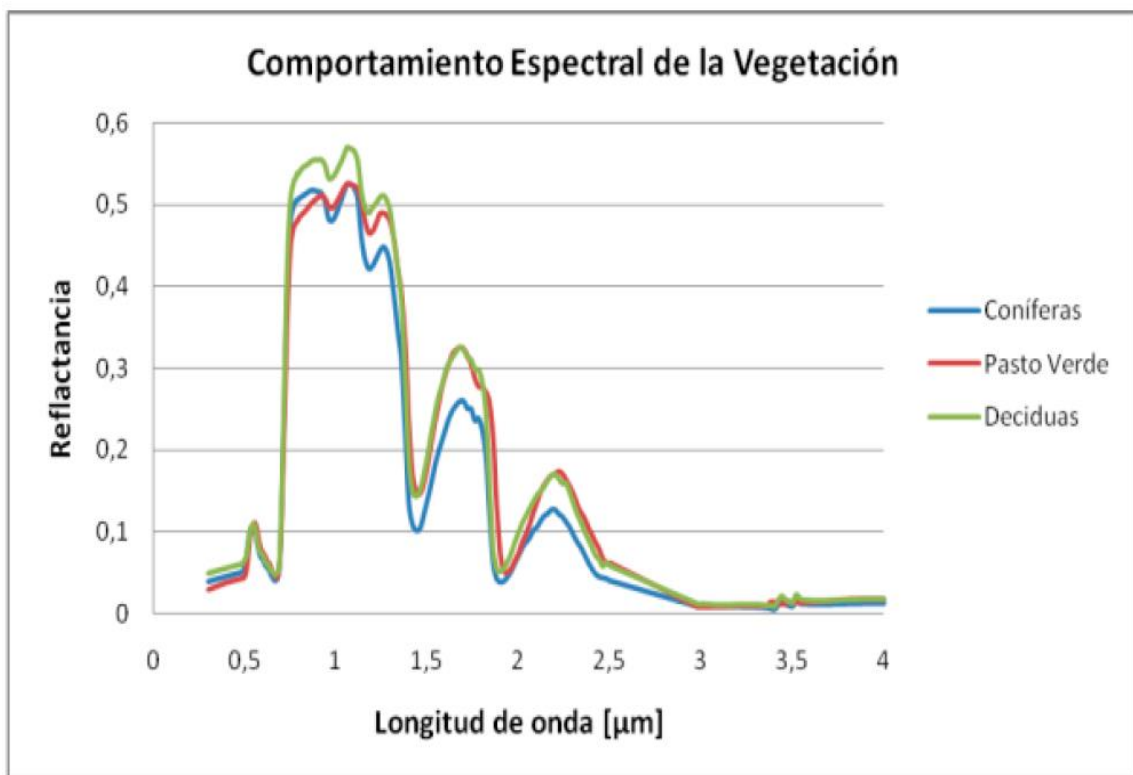


Figura 7.- Comportamiento espectral de la vegetación.

Por su parte, la prominente reflectancia en el infrarrojo cercano que desciende en el infrarrojo medio (Fig.7), la causa se debe a los pigmentos, como la clorofila la cual es inestable en ciertas temperaturas, como protección termal a la planta ocurre la reflexión gracias al brillo de la parte dorsal de las hojas y al mesófilo (tejido interno) que dispersa la energía (Martínez y Solís, 2017) estas particularidades son de gran importancia para el monitoreo de vegetación.

Existen otras cualidades como la cantidad de agua, estructura morfológica (grosor, forma y disposición de las hojas) y el estado fenológico que ayudan a discernir el estado de la vegetación; el uso estas características junto con las herramientas de percepción remota permiten analizar la extensión, densidad, número de individuos en una comunidad vegetal, etc (Vera, 2020).

5.8.2 Uso de satélites Landsat para estudios de vegetación

Los estudios de vegetación mediante técnicas de percepción remota tuvieron mayor auge con el lanzamiento del satélite Landsat en 1972 (Muñoz, 2013), después del lanzamiento del primer satélite, se comenzaron a lanzar más (Landsat 1,2,3,4,5,6,7 y 8) y por lo regular, estos satélites son de los más utilizados para distintos tipos de análisis de recursos costeros, usos de suelo, monitoreos ambientales, aplicaciones agrícolas y forestales, entre otros (Fernández y Herrero, 2001). De la variedad de satélites Landsat, en el presente trabajo únicamente se utilizaron las versiones 4, 5 y 7.

Satélite Landsat 4

La versión 4 de esta familia de satélites, se lanzó el 16 de julio de 1982 y terminó de operar el 14 de diciembre de 1993, mientras que la versión 5 fue lanzada el 01 de marzo

de 1984, ambos satélites capturaron imágenes cada 16 días, Landsat 4 se equipó con un sensor llamado Multiespectral Scanner (MSS) a petición del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para fines de estudios agrícolas (INEGI, 1993).

Satélite Landsat 5

El satélite Landsat 5 desarrollado por la NASA (National Space and Space Administration, por sus siglas en inglés), ofreció imágenes durante 29 años hasta que dejó de operar el 5 de junio del 2013, a este satélite se le instaló un sensor Thematic Mapper (TM) con el que aportaba una mayor resolución espacial, estaba compuesto por siete bandas espectral entre ellas el visible, infrarrojo cercano, medio y el termal, tenía 30 metros de resolución en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la del infrarrojo termal (USGS, s/f).

Satélite Landsat 7

Landsat 7 fue lanzado en 1999, en la actualidad continúa operando y es administrado por la NASA mientras que las imágenes obtenidas son manejadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), este satélite tiene la capacidad de recolectar y transmitir hasta 532 imágenes en un día, logrando capturar toda la superficie terrestre en 15 días pues gira en órbita Heliosincrónica, es decir, que pasa por un determinado lugar en hora particular (INEGI, 1993)

Una propiedad de Landsat 7 es que tienen incorporado un sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper), además de que se conserva el sensor TM (instalado en versiones antiguas), desde su lanzamiento ha enviado información de manera casi ininterrumpida, no obstante, desde junio de 2003 presenta una falla llamada Scan Line Corrector, que da

como resultado pérdida de píxeles en las imágenes obtenidas (Vera, 2020), a pesar de ello, existen métodos para corregir cierto porcentaje de dicha falla.

5.8.3 Imágenes satélites

Una imagen satelital es una representación digital compuesta por varias bandas debido a que el sensor logra detectar diferentes intervalos de longitud de onda, por lo que algunas imágenes son multiespectrales (Fig. 8), además se componen también por un malla o red (ráster), donde cada celda de esta se denomina pixel, su tamaño oscila entre 10-1000 metros por lado dependiendo del satélite y su valor (en bits) es el promedio de la reflectividad espectral de la superficie en distintas longitudes de onda (Manzo y Meave, 2003). Asimismo, cada pixel presenta un atributo numérico que indica su nivel de gris, el cual varía desde negro a blanco, el color dado en cada celda representa la intensidad de la energía electromagnética que es reflejada o emitida por algún cuerpo en la superficie terrestre, la cual a su vez es medida por el sensor (Pérez, 2014).

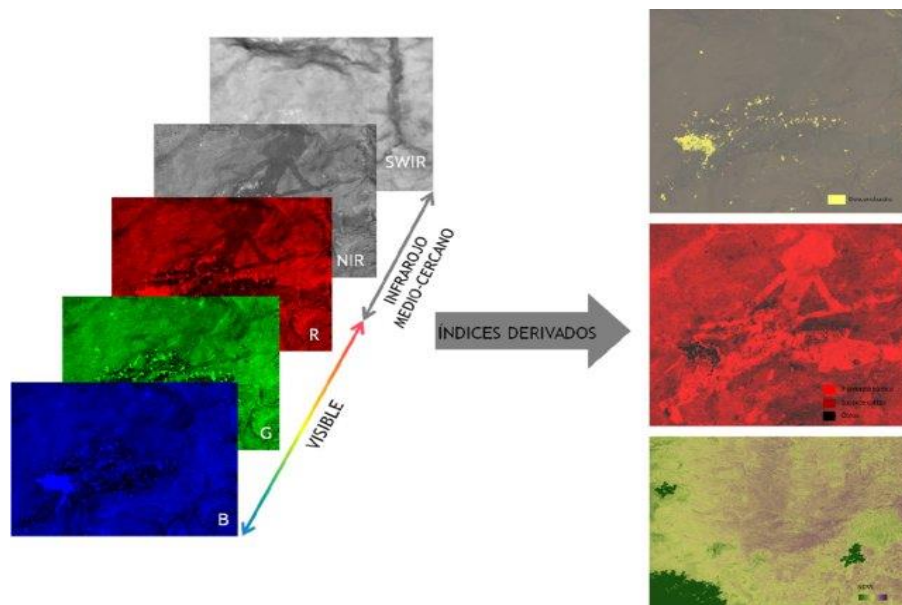


Figura 8.-Ejemplo de imágenes multiespectrales e índices cuantitativos derivados (Sebastián *et al.*, 2013).

Por otro lado, gracias a que el satélite gira en torno al planeta (satélite polar) o sea estacional en algunos casos, se pueden obtener imágenes de un mismo sitio de la Tierra en distintos periodos de tiempo (Manzo y Meave, 2003), esto es clave para estudios ambientales, ya que permite comparar cómo era un sitio antes y después de una determinada situación.

El análisis visual de las imágenes satelitales se usa aplicando tres bandas del sensor con apoyo de monitores que presentan los colores rojo, verde y azul, de ahí su nombre en inglés monitores RGB (Red, Green y Blue), estos colores básicos pueden dar lugar al resto de los colores, de este modo se pueden hacer diferentes combinaciones para la visualizar las imágenes (Fig. 8) (Fernández y Herrero, 2001).

Específicamente, las imágenes capturadas por el satélite Landsat 7 ETM+ se componen por ocho bandas espectrales detectadas por el sensor ETM+, que fueron seleccionadas especialmente para monitorear vegetación, recursos naturales o para estudios geológicos, ya que al combinarse producen imágenes a color que realzan sus ventajas para un tipo de investigaciones (Fernández y Herrero, 2001).

Particularmente, para los objetivos de este trabajo, en las imágenes satelitales usadas solo se combinaron las bandas 3, 4 y 7 de los satélites por lo siguiente:

En Landsat 5 la banda 3 corresponde al rojo ($0.63\text{-}0.69\ \mu\text{m}$) se usa para discriminación de especies de plantas y límites de suelos, la banda 4 es del infrarrojo cercano 1 ($0.76\text{-}0.90\ \mu\text{m}$) se emplea para estimar la cantidad de biomasa en un área y contrasta el suelo con la vegetación, por último, la banda 7 es del infrarrojo medio ($2.08\text{-}2.35\ \mu\text{m}$) discrimina tipos de suelo y además la humedad entre el suelo y la vegetación (Vargas, 2016).

Mientras que en el caso de Landsat 7 (Fig. 9), la banda espectral 3 con intervalo de 0.63-0.90 μm (rojo), se aplica para lo relacionado a absorción de clorofila, diferenciación de especies vegetales, entre otros; mientras que la banda espectral 4 que va de 0.76-0.90 μm (infrarrojo cercano) es sensible al contenido de clorofila de la vegetación viva y sirve para identificación de áreas de incendios lo cual es gran utilidad en este estudio y por último la banda espectral 7 con intervalo de 2.08-2.35 μm (infrarrojo medio/infrarrojo de onda corta) se emplea para identificación de minerales, contenido de agua en el suelo y vegetación y otras aplicaciones (INEGI, 1993).

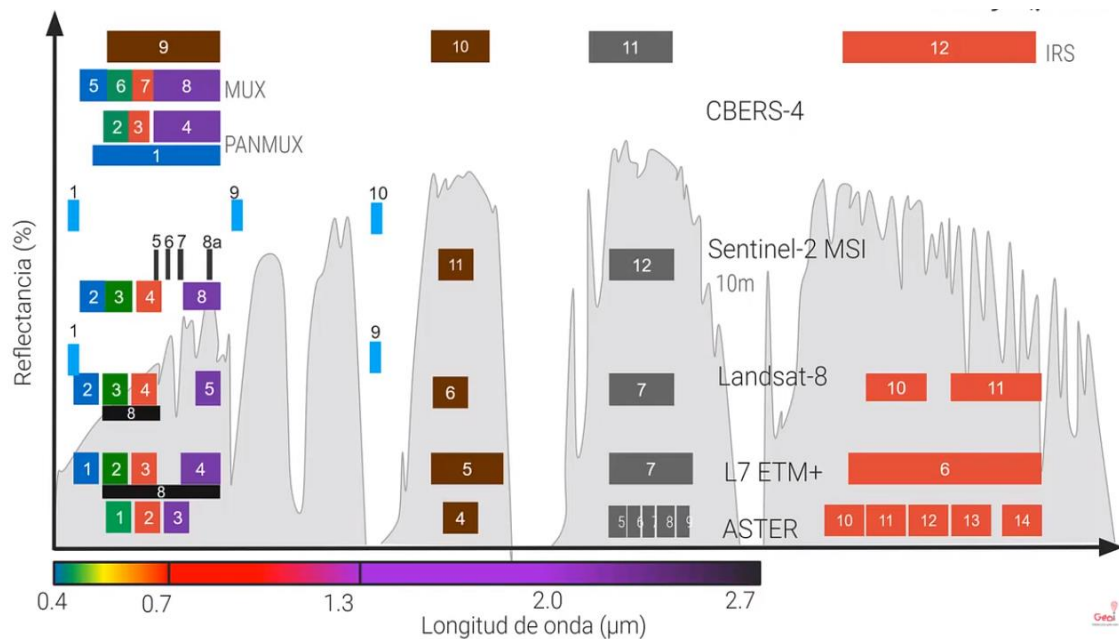


Figura 9.- Bandas espectrales empleadas por distintos satélites, entre ellos Landsat 7 ETM +.

De tal modo que la combinación de estas bandas destaca las características del área de estudio, además según (Geoinformación, 2020) son las que se emplea cuando se usa Landsat 7 ETM+ para llevar a cabo la estimación de la severidad de un incendio, así mismo como respaldo de lo anterior, se encontró que otros estudios (Borini *et al.*, 2016,

Pérez y De La Riva, 1998) también utilizaron la combinación RGB 7-4-3 para detectar áreas incendiadas a partir de imágenes Landsat, por estos motivos dicha combinación fue seleccionada también para este trabajo.

5.8.4 Índices NBR y dNBR para análisis de severidad de incendios forestales

La severidad de un incendio se relaciona con dos variables imprescindibles, la intensidad y la duración del fuego, existen maneras de calcular cuantitativamente el impacto del fuego a partir del consumo de biomasa (Fig. 10), los modelos más usados utilizan la reflectancia del dosel empleando diferentes longitudes de onda con distintas propiedades de absorción y refracción (Chuvieco *et al.*, 2006).

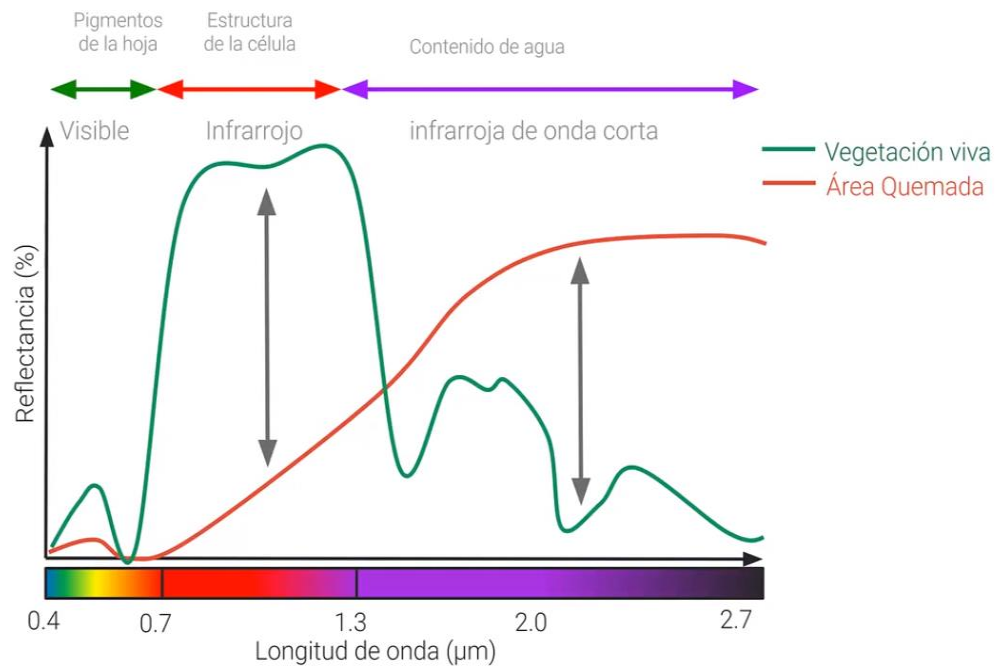


Figura 10.- Respuesta espectral de la vegetación sana vs vegetación quemada en el infrarrojo de onda corta y el infrarrojo cercano

El índice dNBR (relación de combustión normalizada diferenciada) es uno de los índices más utilizados para estimar la severidad de un incendio forestal está basado en el

índice NBR (Normalized Burn Ratio), fue propuesto en 1991 por López y Caselles y tiempo después en 2005 fue replanteado por Key y Benson (Arellano *et al.*, 2017).

Este índice de detección de cambio absoluto es básicamente la resta de la proporción de quema normalizada de una imagen anterior y una posterior al incendio y da como resultado una imagen conocida también como dNBR, el fundamento de este método es la cantidad de clorofila previa en la vegetación antes del incendio, lo anterior se debe gracias a que las imágenes captadas por los satélites Landsat registran longitudes de onda como el infrarrojo cercano que es sensible a los cambios de clorofila, contenido de agua, cobertura de ceniza y sustrato del suelo (Miller, 2013).

Como se mencionó antes, el índice NBR es la base para el cálculo del dNBR, el NBR utiliza dos bandas espectrales que contrastan los efectos del fuego, una de ellas es el NIR (Near-infrared) Infrarrojo cercano (0,85-0,88 μm) y el SWIR (Short Wave Infrared) infrarrojo de onda corta (2,11-2,29 μm), el NIR por su parte muestra la disminución de la reflectividad a causa de la vegetación incendiada, mientras que el SWIR por el contrario evidencia el aumento de reflectividad debido a la pérdida de humedad y exposición del suelo (Delegido *et al.*, 2017), la fórmula es la siguiente:

$$\text{NBR} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}})$$

Donde ρ_i es la reflectividad de la banda i .

Es importante aclarar que el índice NBR se calcula tanto para la imagen antes del incendio (PreNBR) como para la imagen posterior al incendio (PostNBR), pues a partir de esto se calcula la diferencia entre ambas imágenes, conocido como dNBR (Fig. 11) (Arellano *et al.*, 2017), la fórmula se muestra a continuación:

$$dNBR = \text{PreNBR} - \text{PostNBR}$$

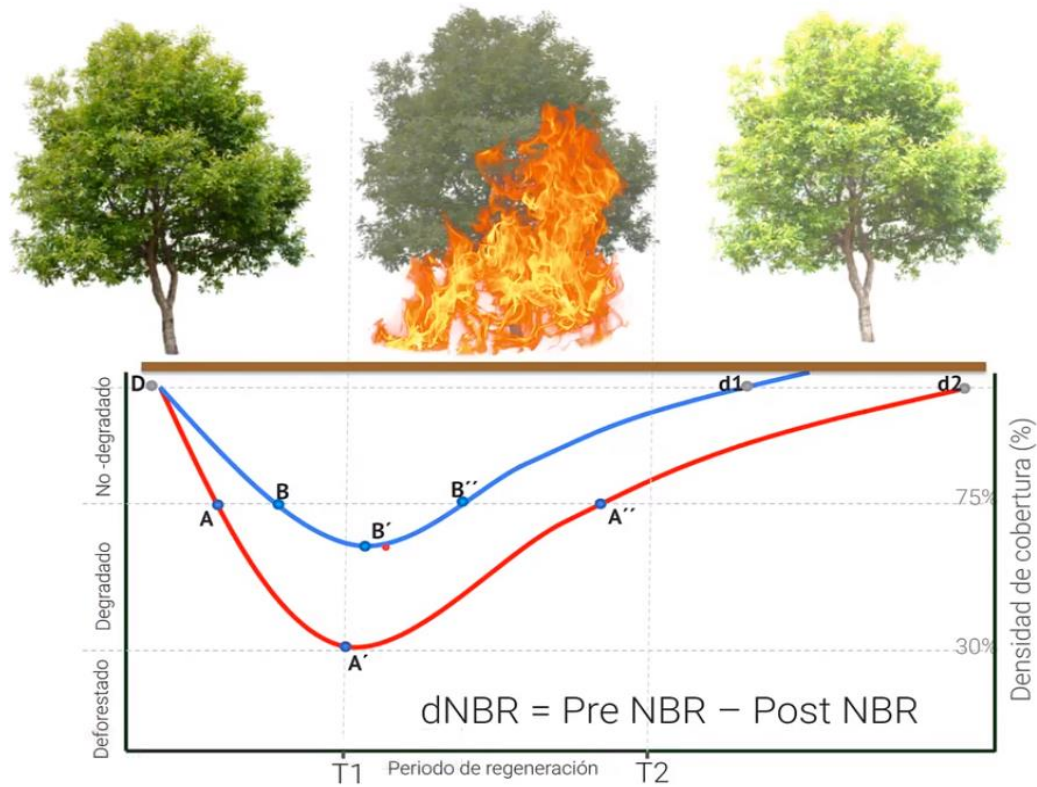


Figura 11.- Representación de la estimación del dNBR a partir del pre NBR y el post NBR considerando el tiempo y densidad de cobertura.

La importancia de utilizar una imagen previa y una posterior al incendio es para poder detectar los cambios a consecuencia de un desastre y además para no sacar conclusiones erróneas de alta severidad en sitios donde quizá había poca o nula vegetación (Miller, 2013). Además, a pesar de que el dNBR es un indicador del grado de severidad de un incendio, su aplicación puede variar dependiendo de las circunstancias del incendio, así como las condiciones geográficas y otras variables (Delegido *et al.*, 2017).

Los índices, es decir, el NBR y el dNBR son cálculos para hacer una evolución de primer orden (inicial) de la severidad del fuego, por ello emplean la imagen más próxima

después del incendio, si se quisiera hacer una evaluación a largo plazo se tomaría una imagen que evidenciara tiempo después la regeneración de la vegetación.

El uso de estos índices es empleado en diversos estudios de severidad de incendios, entre ellos se encuentra el Monitoring Trends in Burn Severity (MTBS, por sus siglas en inglés), este es un programa utilizado por Estados Unidos desde 1984 hasta la actualidad para monitorear la severidad de incendios en ese país, este programa utiliza una metodología estandarizada basada en los índices mencionados anteriormente (Fig. 12), la cual se aplicó en el presente trabajo.

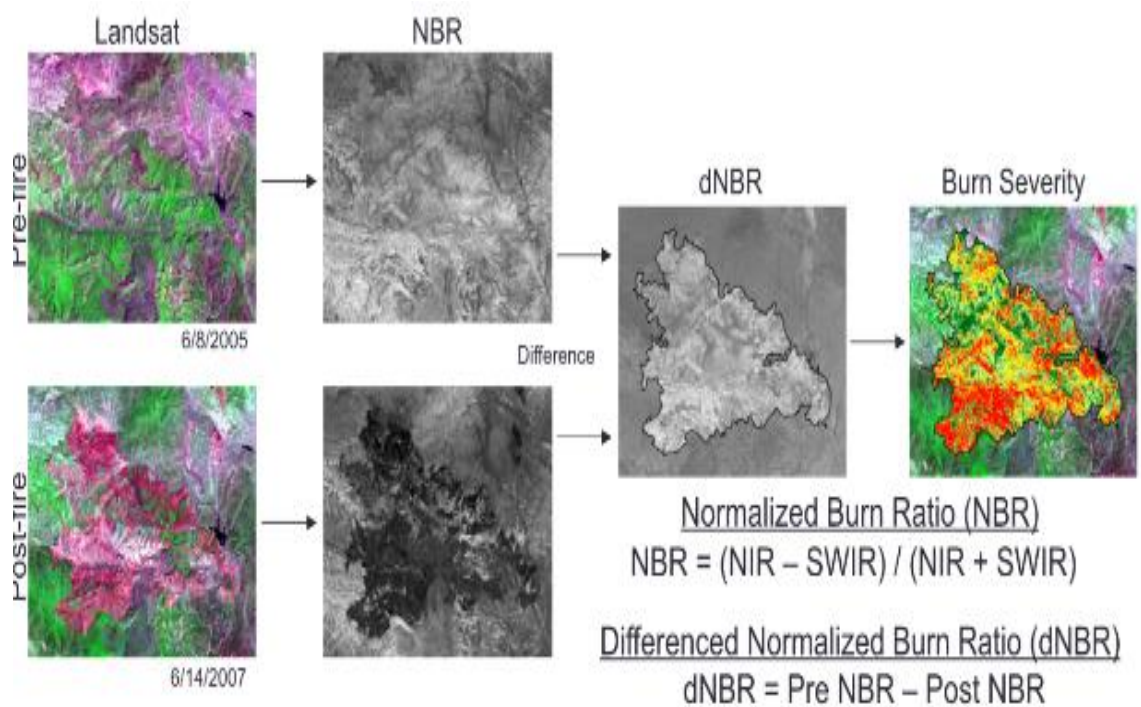


Figura 12.- Método MTBS (Monitoring Trends in Burn Severity) mediante el índice NBR y el índice dNBR.

5.8.5 Limitaciones de las imágenes satelitales para monitoreo de severidad de incendios.

Las imágenes satélites al igual que cualquier otro tipo de imágenes están limitadas por el número y tamaño de píxel del sensor, por lo tanto, hasta cierto punto estos factores son una limitante para hacer estimaciones exactas, en el caso de monitoreo de incendios forestales el píxel empleado comúnmente es de 30 m por lado (Miller, 2013), considerado hasta cierto punto demasiado grande como para visualizar un árbol o distinguir entre los efectos del fuego en el sotobosque y el piso superior (Fig.13).

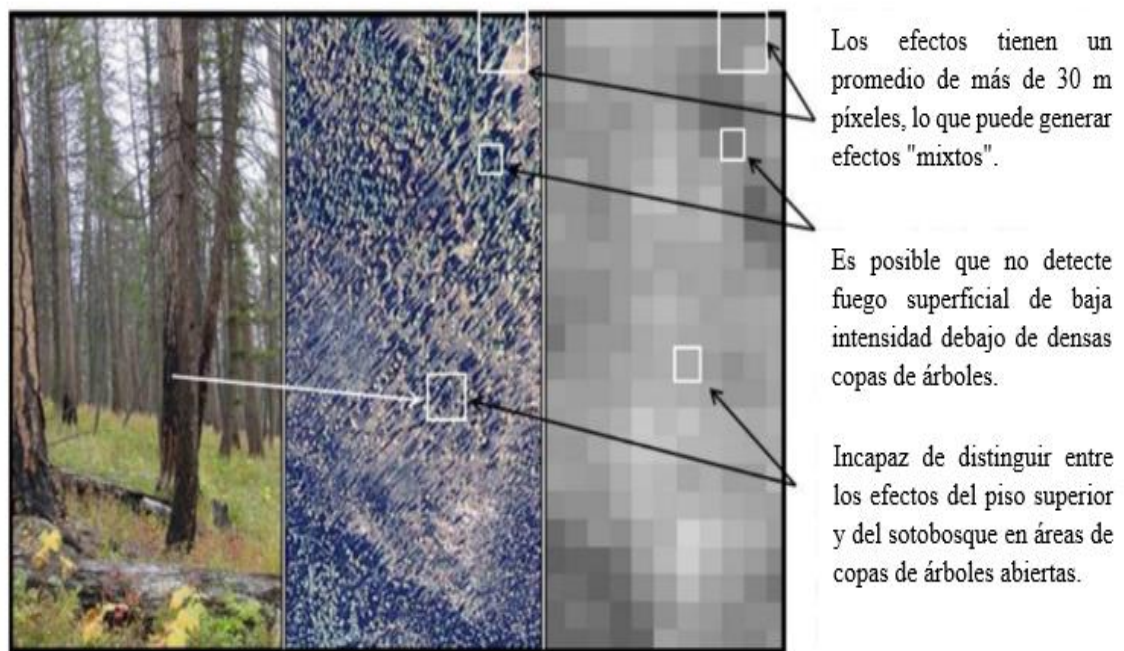


Figura 13.- Limitaciones de las imágenes satelitales para el monitoreo de vegetación (modificado de Miller, 2013).

Otra limitante es que en el caso de una comunidad donde la vegetación no sea homogénea, por ejemplo en los bosques de coníferas, la interpretación del mapeo de severidad es más compleja porque existen parches con vegetación densa y otros con poca

vegetación desde antes del incendio. Sin embargo, si toda el área experimentó un incendio de alta severidad esto se verá registrado en los píxeles (imagen), aunque el valor de dNBR no siempre se correlaciona con el mismo nivel de severidad, ya que esto es variable según las especies y la cantidad de cobertura vegetal (Miller, 2013), por estos motivos y debido a que los mapas se revisan mediante una evaluación subjetiva, es importante que el analista de la imagen tenga conocimiento previo del sitio de estudio para evitar hacer interpretaciones erróneas.

A pesar de las limitaciones del tamaño del píxel, que *grosso modo* solo permite ver el dosel de los árboles, la percepción remota sigue siendo una de las principales metodologías para estos estudios, aunque como mencionan Chuvieco *et al.* (2006) aún tiene como desafío determinar si los datos obtenidos por percepción remota son lo suficientemente sensibles para lograr distinguir los rangos de los daños causados en la vegetación a consecuencia de un incendio.

VI DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1 Ubicación

Sierra Blanca es un sistema montañoso ubicado en el municipio de Ensenada, al sureste del Valle de Guadalupe, en el estado de Baja California, este sistema es parte de la zona costera de Sierra de Juárez (Minnich, 1987). Por lo menos hasta el 2006 el bosque se ubicaba desde los 1000 a los 1320 msnm. Sin embargo, actualmente los pinos se encuentran alrededor de los 1250-1320 msnm, alejado a 30 km de la costa, por lo tanto, recibe la humedad del Océano Pacífico (CONAFOR, 2019). Algunas de las localidades colindantes a esta sierra son el poblado de San Antonio Necua, Francisco Zarco y El Porvenir.

Este sistema montañoso alberga un pequeño remanente de *P. coulteri*, el cual es el área de estudio del presente trabajo, las coordenadas geográficas del sitio son las siguientes: 32°03'03" lat. N y 116°29' 37" long. W (Fig. 14).

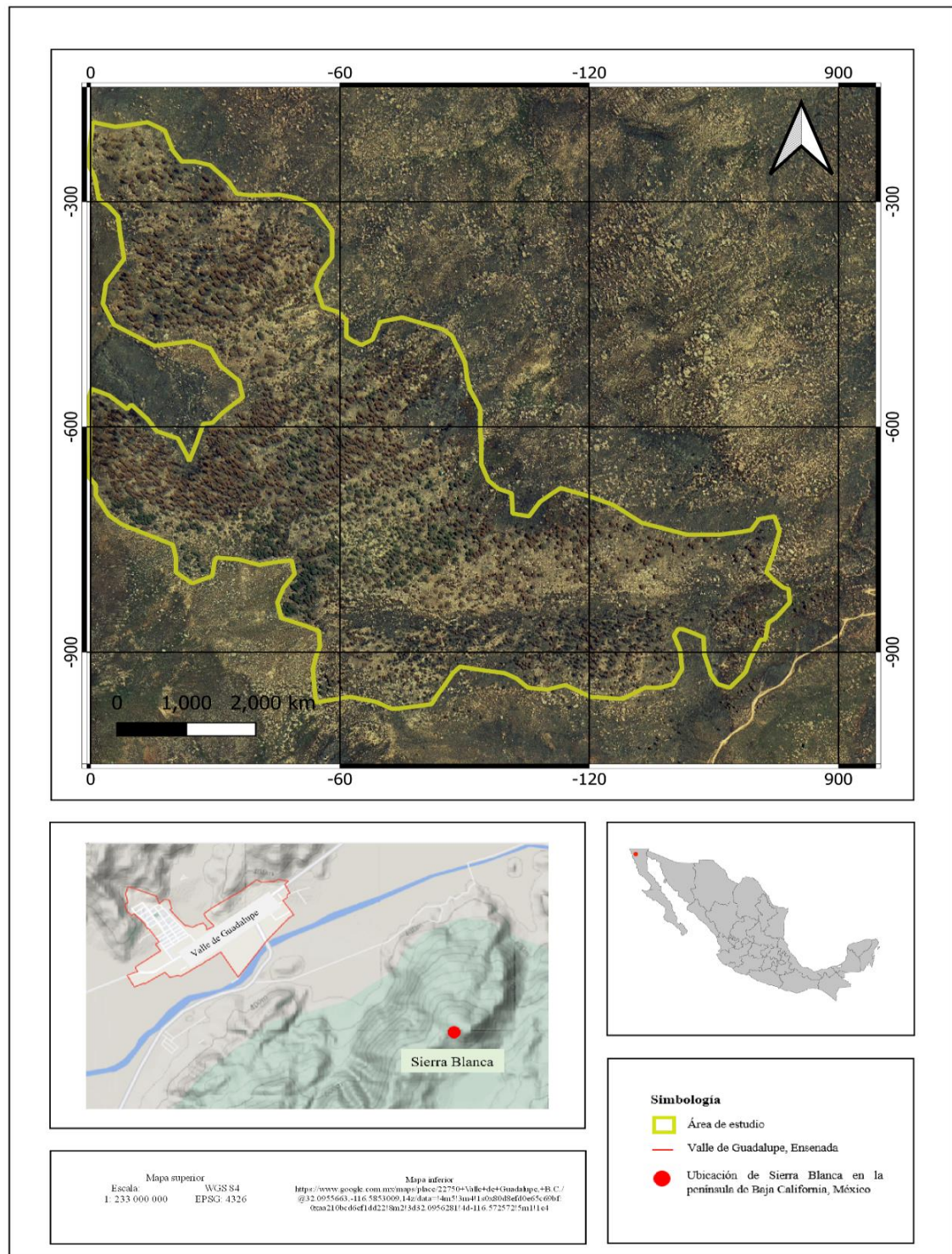


Figura 14.- Área de estudio, Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México.

6.2 Topografía y geología

La superficie donde *P. coulteri* se distribuye es principalmente en la ladera norte, históricamente a partir de la cota de los 1000 a 1,320 msnm con pendientes de 36 a 49 grados. La Sierra se caracteriza en su cordillera más alta de rocas ígneas formando una Peña de color blanco, visible desde cualquier parte del Valle de Guadalupe. La geología del sitio es de granito y roca ígnea intrusiva ácida (CETENAP, 1976).

6.3 Suelos

En el sitio de estudio, el tipo de roca en el que la especie crece es roca ígnea intrusiva ácida en contacto con granito (INEGI, Carta Geológica ID1182, Delgadillo, 2004), adaptándose mejor a suelos someros. Aun así, la literatura menciona que *P. coulteri* puede prosperar en distintos tipos de suelo, incluido suelos pobres y fértiles, así como desde suelos limosos a rocosos, además, los individuos maduros son tolerantes a la sequía, aunque logran sobrevivir a la sombra, mientras que los retoños requieren forzosamente humedad del suelo (Los Padres Forest Watch, 2013).

6.4 Clima

El clima de las regiones donde se encuentra *P. coulteri* es un clima templado de tipo mediterráneo con presencia de lluvias en invierno durante los meses de noviembre a abril y verano seco en los meses restantes (Rzedowski, 2006).

Se desconoce con precisión el clima de Sierra Blanca, no obstante, existe una estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cercana al sitio localizada en el Rancho Agua caliente (longitud: -116.5, latitud: 32.1) en el poblado de Valle de Guadalupe en Ensenada, Baja California (Base de Datos del CLICOM CICESE, s/f), a

pesar de que este lugar se encuentra a 400 msnm de elevación, es decir, muy por debajo de la sierra (ubicada históricamente a 1000-1320 msnm) esta es la única estación aledaña al área de estudio, por cual podría servir de referencia para tener una noción respecto al clima de este sitio.

La estación ha compilado datos desde enero de 1969 hasta octubre del 2012, registrando durante ese periodo una temperatura promedio anual de 18.11° C con mínimas promedio anual de 10.57° C y máxima de 25.6° C, por otro lado, la precipitación promedio anual es de 272.80 mm.

Considerando que a mayor altitud menor temperatura, según el parámetro establecido en que la temperatura desciende 0.6° C por cada 100 metros de altitud en condiciones ideales, aunque podría verse influenciado por calentamiento distinto en laderas norte y sur, capas de aire frío, entre otras (INEGI, 2005 y Arrieta, 2020), se tendría para Sierra Blanca un estimado de temperatura promedio anual de 12° C a los 1320 msnm.

6.5 Vegetación

En el estado *P. coulteri* se asocia con vegetación de tipo chaparral, característica de los ecosistemas mediterráneo, en estos ecosistemas el régimen de incendios está definido por el clima y las características de la vegetación con biomasa muerta y tasas de descomposición bajas por la escasez de lluvias, constituyéndose como un combustible inflamable que aumenta su potencial de quemarse con altas temperaturas y vientos secos y cálidos característicos de estos ambientes (Lloret, 2004).

Según Delgadillo (2004) *P. coulteri* pertenece al tipo de vegetación conocido como bosque de pino, llamado así porque el género más dominante es precisamente *Pinus*; (Fig. 15), ambos tipos de vegetación se describen brevemente a continuación.



Figura 15.- Bosque de *P. coulteri* asociado con vegetación de tipo chaparral, Ensenada, Baja California. Fuente: Hiram Rivera Huerta (2017).

a. Bosque de pino

En Baja California este tipo de bosques son continuación de los bosques de California en Estados Unidos, se considera que los pinares de la Rumorosa, Sierra de Juárez y San Pedro Mártir llegaron al estado por medio de la Sierra Nevada (INECC, 2007).

De acuerdo con Delgadillo (1998) los bosques de *Pinus* de Baja California se dividen en tres tipos: de montaña, costero e insular, y de estos tres tipos el autor clasifica a *P. coulteri* dentro del bosque de pino de montaña, el cual se describe a continuación.

El bosque de pino de montaña se encuentra en el norte del estado en las dos principales áreas boscosas, Sierra San Pedro Mártir y Sierra de Juárez (Fig. 16), en el piso de vegetación de mayor altitud (entre 1200 y 3000 m) por encima de la vegetación de

chaparral. De las 14 especies del género *Pinus* que se distribuyen en la península de Baja California, ocho se encuentran entre Sierra de Juárez y Sierra San Pedro Mártir (INECC, 2007).



Figura 16.- Ubicación de la vegetación de bosque de coníferas y encinos en México. Fuente: INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V.

Estos bosques con clima mediterráneo la precipitación anual es mayor en comparación con la de otras ecorregiones como el chaparral, matorral costero o el matorral costero rosetófilo, varía entre 500 y 700 mm (González *et al.*, 2010).

Aunque como ya se mencionó antes, específicamente los pinos de Sierra Blanca (Fig.17) pertenecen a la parte costera de Sierra de Juárez en Baja California.



Figura 17.- Bosque de *P. coulteri* asociado con vegetación de tipo chaparral, Ensenada, Baja California. Fuente: Hiram Rivera Huerta (2017).

b. Chaparral

En México, este ecosistema se localiza a los 30° de latitud norte en la costa noroccidental (Fig. 18), se caracteriza por presentar precipitación anual de entre 250-500 mm, en invierno las lluvias son más abundantes y las temperaturas pueden llegar a los 0° C, mientras que los veranos son cálidos alcanzando temperaturas de hasta 40° C y hay sequías prolongadas, por esas razones durante esa temporada los incendios son muy comunes, no obstante, durante las estaciones de primavera y otoño la humedad incrementa por la niebla que surge de la cercanía del mar (ENCCH, 2017).



Figura 18.- Ubicación de la vegetación de tipo chaparral en México. Fuente: INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V.

Debido a las condiciones climáticas que presenta esta vegetación característica es mayormente arbustiva solo presenta un estrato de entre 1.5-3 m de altura, siempreverde, esclerófila (hojas pequeñas y duras), pirófila (SPABC, 2006), incluso se pueden encontrar pequeños pinos debido a la transición con el bosque de pino.

6.6 Descripción Biogeográfica del sitio

Por su ubicación geográfica, Sierra Blanca pertenece a la Provincia Florística de California (Fig. 19) que se ubica en el noroeste de la península, la cual pertenece a su vez a la Región Pacífica Norteamericana del Reino Holártico (INECC, 2007).

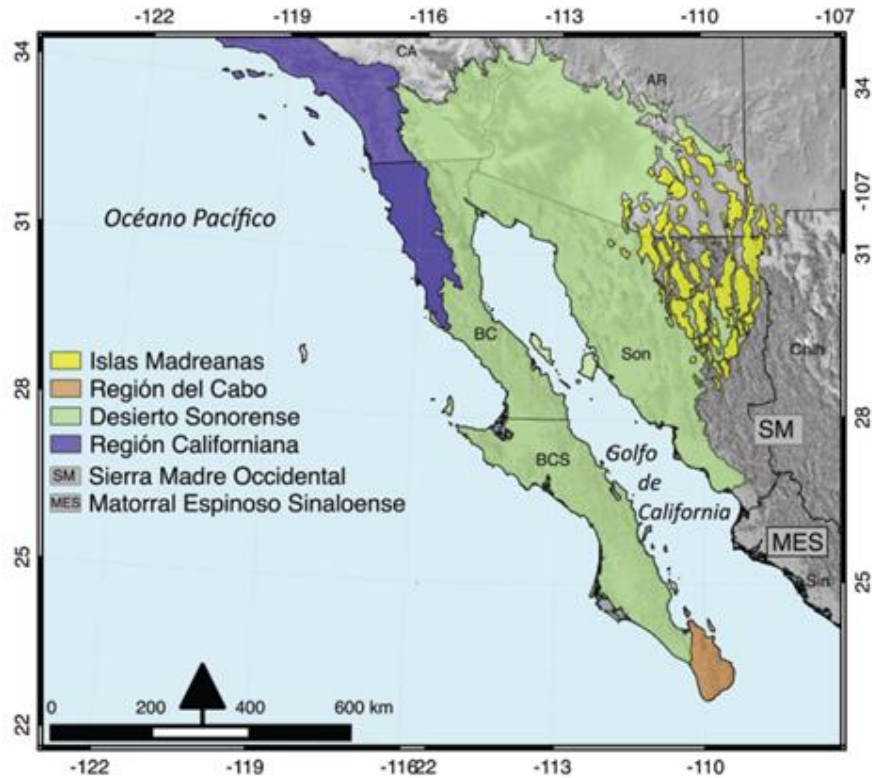


Figura 19.- Regiones biogeográficas del Noroeste de México, en morado se observa la región California compartida por Baja California, México y California, Estados Unidos (León de la Luz *et al.*, 2018).

Esta provincia incluye Sierra de Juárez y Sierra San Pedro Mártir, así como la planicie costera adyacente del Océano Pacífico. La vegetación principal es chaparral y el clima característico es de tipo mediterráneo con inviernos fríos y húmedos y veranos cálidos y secos, así como el chaparral como vegetación dominante (Rzedowski, 2006).

VII MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Origen del material

7.1.1 Ortoimágenes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

En la plataforma de la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO) (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>), sección de “Topografía”, se descargaron los índices de las cartas topográficas del INEGI escala 1:50 000 (<https://www.inegi.org.mx/>), en metadatos para Google Earth archivo tipo KML, se desplego en el programa Google Earth y se identificó la clave de la carta: I11D82 del área de estudio.

Las imágenes seleccionadas fueron: la ortoimagen digital I11D82E3 1:40 000 y resolución de 1 metro (color), proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), datum ITRF92, con fecha de agosto de 2006. También se seleccionaron ortofotos de 1993: I11D82a, I11D82b, I11D82c, I11D82d, I11D82e y I11D82f con escala de 1:20 000 y resolución de 2 metros (blanco y negro), siendo las ortofotos más antiguas referenciadas y disponibles en INEGI, y otro vuelo sin referenciar de 1973 (no disponible), se unieron para formar un mosaico y estimar la cobertura del polígono del bosque.

Estas fotografías aéreas permitieron confirmar el incendio del 2006 y utilizando los registros de las áreas quemadas por el sensor MODIS (AD MODIS 2000-2019) de la CONABIO (<http://incendios.conabio.gob.mx/>) también se confirmó dicho acontecimiento.

Es importante mencionar que las ortoimágenes del INEGI, aunque presentan una resolución espacial grande solo capturan información del espectro electromagnético de 400 a 700 nm, no tienen una composición de bandas como las imágenes de los satélites Landsat. Por tanto, no es posible procesarlas para hacer composiciones ni para estimar la severidad de los incendios, debido a que son fotos aéreas georreferenciadas, sin embargo, su relevancia permiten corroborar la distribución del bosque y comparar la disminución del mismo en el transcurso de los años.

Por otro lado, no se buscaron más imágenes de incendios de años anteriores o posteriores, debido a la falta de información en esa base.

7.1.2 Imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)

7.1.2.1 Imágenes satelitales de Landsat 4, 5 y 7

La búsqueda de imágenes satelitales se realizó en la base de datos del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), dentro de la plataforma se ubicó el área de estudio, se inició la búsqueda para obtener imágenes del satélite Landsat 4 y 5, que dicha base agrupan juntas y ofrecen imágenes del periodo de 1983-2012, mientras que de Landsat 7 arroja imágenes de 1999 hasta la actualidad.

Se buscó año por año y como parte del proceso se establecieron ciertos criterios como: porcentaje de nubes no mayor a 50%, elección del sensor Landsat, filtración de imágenes Landsat Collection 1 level-1 Landsat 4, 5 y 7.

Dentro de ese lapso, se encontraron dos incendios importantes ocurridos en el bosque de *P. coulteri* y cinco incendios cercanos al sitio de estudio, los cuales fueron seleccionados si se encontraban en un radio de cinco kilómetros alrededor del sitio y el

incendio era extenso, las imágenes seleccionadas para cada incendio se muestran en el anexo 3.

7.1.3 Búsqueda de incendios forestales recientes con el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

La búsqueda de incendios posteriores al 2012, se realizó también con imágenes del sensor MODIS (a bordo del satélite Terra (EOS AM)), el cual muestra polígonos de incendios más recientes que se pueden encontrar en la base de datos de la CONABIO (<http://incendios.conabio.gob.mx/>). El período que cubre de 2000 al 2019, sin embargo, después del 2006 no se encontraron incendios sobre el bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca y en un radio de cinco kilómetros.

7.1.4 Corrección atmosférica de las imágenes satelitales Landsat

La corrección atmosférica de las imágenes de cada incendio se llevó a cabo con el programa Qgis versión 3.16.4. Hannover, usando el complemento de clasificación semiautomático (SCP ver. 7.9.9) posterior a esta corrección las imágenes estaban listas para utilizarlas.

7.1.5 Corrección del error Scan Line Corrector en las bandas de las imágenes de Landsat 7 obtenidas de la base de datos del USGS.

Particularmente, para procesar las imágenes satelitales de Landsat 7 fue necesario descargar un grupo de archivos: Landsat Look Natural Color Image, Landsat Look Images with Geographic Reference y Level-1 Geo TIFF Data Product, esta última opción tenía almacenadas las imágenes de cada banda y su respectiva máscara las cuales se utilizaron para solucionar la ausencia de valor digital en las bandas del sensor llamado Scan Line

Corrector de Landsat 7. El problema de bandeo se corrigió con el programa QGis versión 3.16.4. Hannover, en cual se ingresaron las imágenes satelitales de las bandas junto con sus respectivas máscaras.

En resumen, lo que se hizo fue dar un valor digital a los píxeles faltantes a partir del promedio de los píxeles vecinos. Cabe mencionar que únicamente se corrigieron las bandas 7, 4 y 3, ya que eran las que se requerían para el cálculo de la severidad y además para realizar la composición RGB 7-4-3 que permitió visualizar mejor la imagen al resaltar la cicatriz del incendio, a su vez esto facilitó la digitalización de los polígonos.

7.1.6 Composición RGB 7-4-3 imágenes satelitales

Con apoyo del mismo programa se agruparon las bandas 7, 4 y 3 previamente corregidas y se les aplicó una composición RGB (Red, Green y Blue) colocando la banda roja en la posición 3, la banda verde en la posición 2 y por último la banda azul en la 1, de manera que la imagen tomó una nueva coloración.

7.1.7 Digitalización a percepción de los polígonos de cada incendio

Las imágenes obtenidas de los registros del USGS fueron la base para la digitalización de los polígonos en formato vector de los incendios en Sierra Blanca, este proceso se realizó en el programa Qgis versión 3.16.4. Hannover. El único incendio que no se digitalizó fue el de 1984 porque era complicado discriminar la cicatriz del incendio.

Por otro lado, a las imágenes de los incendios de 1989a, 1989b y 2006, se les agregó un modelo digital de la superficie (MDS) (Anexo 1 y 2), compuesta de archivos de sensor activo LiDAR con resolución de 5 m, obtenidos del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>).

El MDS se traslapó con las imágenes satelitales y se le aplicó una transparencia con la finalidad de resaltar el relieve del terreno, dicho modelo permite diferenciar el dosel de los pinos y la superficie del terreno, esto fue fundamental para lograr delimitar el área del bosque en el 2006.

Por último, se delineó el perímetro de la cicatriz del incendio mediante interpretación visual y se calculó el área de este. Por otro lado, como parte de la metodología también se delineó un polígono actual del remanente de árboles adultos y se estimó el área.

7.2 Estimación de la severidad del incendio de Sierra Blanca en 2006

7.2.1 Metodología del programa Monitoring Trends in Burn Severity (MTBS) del Sistema Forestal de los Estados Unidos (USFS)

Para la estimación de severidad de fuego se replicó la metodología empleada por el USFS (por sus siglas en inglés) con su programa Monitoring Trends in Burn Severity (MTBS).

A grandes rasgos, la metodología consiste en cuatro etapas básicas:

1. Búsqueda en base de datos los incendios ocurridos (fecha y localización).
2. Selección las imágenes pre y post-fire.
3. Elaboración del mapa del incendio:
 - a. Realización del preprocesamiento de las imágenes.
 - b. Cálculo del NBR de las imágenes
 - c. Diferenciación de las imágenes o cálculo de delta NBR (dNBR).
 - d. Delimitación del área quemada.

e. Evaluación de las imágenes de umbral dNBR con clases de gravedad de quemado discretas.

4. Procesamiento posterior que consiste en crear productos de mapas y generar informes de datos.

7.2.1.1 Búsqueda y selección del material.

Las imágenes usadas para estimar la severidad fueron las mismas que se emplearon para la digitalización de los polígonos en formato vector (Anexo 3).

7.2.1.2 Elaboración del mapa de severidad

a. Preprocesamiento de las imágenes

El preprocesamiento de las imágenes correspondió a la corrección atmosférica y de bandeado (para las imágenes Landsat 7) previamente mencionado en la sección 7.1.4 y 7.1.5.

b. Cálculo de NBR de las imágenes

Se calculó el NBR con las bandas de las imágenes pre-fire de cada incendio, se estableció en el programa la operación correspondiente al cálculo del NBR:

$$(\text{Banda 4 de la imagen pre-fire} - \text{banda 7 de la imagen pre-fire}) / (\text{Banda 4 de la imagen pre-fire} + \text{banda 7 de la imagen pre-fire}).$$

Posteriormente se corrió la operación y se guardó la imagen, este procedimiento también se replicó del mismo modo con las imágenes post-fire, con la misma operación:

$$(\text{Banda 4 de la imagen post-fire} - \text{banda 7 de la imagen post-fire}) / (\text{Banda 4 de la imagen post-fire} + \text{banda 7 de la imagen post-fire}).$$

c. Diferenciación de las imágenes o cálculo de delta NBR (dNBR).

Una vez obtenidas las imágenes pre-NBR y post-NBR de los incendios, se restaron ambas imágenes:

$$\text{Imagen pre-NBR} - \text{Imagen post-NBR}$$

Y se guardó la nueva imagen de la diferencia de la normalización de severidad de quema, delta NBR (dNBR).

d. Delimitación del área quemada

Con la imagen dNBR obtenida, dentro del programa QGis versión 3.16.4. Hannover, se vectorizó el ráster dNBR, y posteriormente se calculó el área de los polígonos, las cuales se compararon con las áreas que se obtuvieron de los polígonos digitalizados en gabinete.

e. Evaluación de las imágenes de umbral dNBR con clases de gravedad de quemado discretas (Escala Firemon)

La imagen obtenida del dNBR se utilizó para hacer las clases de gravedad de los incendios de 1989b y del 2006, los polígonos se categorizaron y se agruparon por clases con el objetivo de obtener el número de hectáreas afectadas de cada clase.

Con base en la escala de niveles de gravedad ordinal con rangos de dNBR tomada de Key y Benson (2006), se realizó una paleta de colores para la severidad en el mismo programa y se le aplicó a cada polígono, obteniendo también el área correspondiente a cada clase.

VIII RESULTADOS

8.1 Polígono del incendio ocurrido en 1984 cerca de Sierra Blanca

La figura 20 muestra la cicatriz del incendio ocurrido en 1984 cerca de Sierra Blanca en Ensenada, Baja California, México. Esta y todas las imágenes siguientes fueron obtenidas de la base de datos del USGS y tiene una composición de bandas del rojo e infrarrojo cercano que permitieron resaltar la cicatriz del incendio.

El área obtenida del polígono vectorizado es de 56.78 km² (5,678.94 ha). Este es el incendio de mayor extensión que se encontró cercano al sitio de estudio durante el periodo de 1984-2019, ocurrió en mayo de 1984, cerca del arroyo El Barbón, en el Valle de Guadalupe, Ensenada, B.C. Como se observa en el mapa el incendio no afectó directamente al bosque de *P. coulteri* (polígono amarillo), sin embargo, ocurrió muy próximo al sitio de estudio.

Es importante mencionar que el polígono del bosque es una digitalización del año 2006, se presenta en amarillo para mostrar su ubicación con respecto la cicatriz de los incendios ocurrido en un radio de cinco kilómetros.

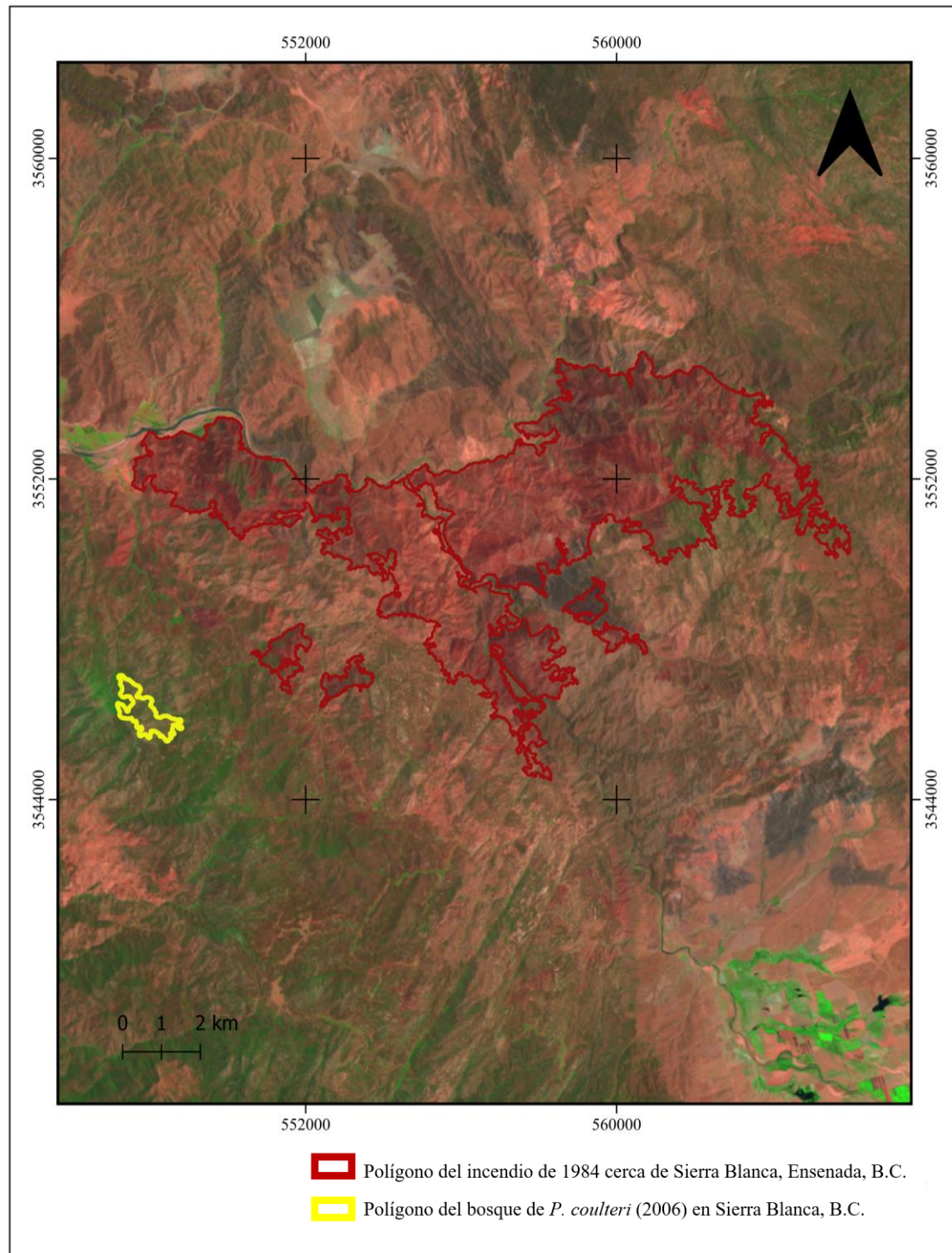


Figura 20.- Polígono del incendio de 1984 en el arroyo El Barbón cerca de Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 120 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.

8.2 Polígonos del incendio de 1987 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.

En la figura 21 se muestra el mapa con los polígonos digitalizados de los incendios de 1987, el polígono rojo corresponde al incendio denominado 1987a, el cual aconteció antes que el incendio 1987b, aunque se desconoce con exactitud la fecha, se sabe que ocurrieron en el mes de septiembre de ese año.

El incendio 1987a digitalizado está comprendido por siete polígonos en rojo que en conjunto poseen un área de 31.16 km^2 (3,116.64 ha). El polígono 1987b en azul tiene un área de 16.81 km^2 (1,681.74 ha). En amarillo se muestra el remanente del polígono del bosque para el 2006 a manera de referencia del bosque.

En la figura 22 se ven los polígonos vectorizados respectivos a cada incendio, el área total del incendio 1987a es equivalente a 24.22 km^2 (2, 422.05 ha) y el polígono b tiene un área de 17.02 km^2 (1, 702.45 ha). La diferencia entre los polígonos, es decir, digitalizados y vectorizados, es de 6.94 km^2 (694.59 ha) para los polígonos de 1987a y de 0.20 km^2 (20.71 ha) para los polígonos de 1987b.

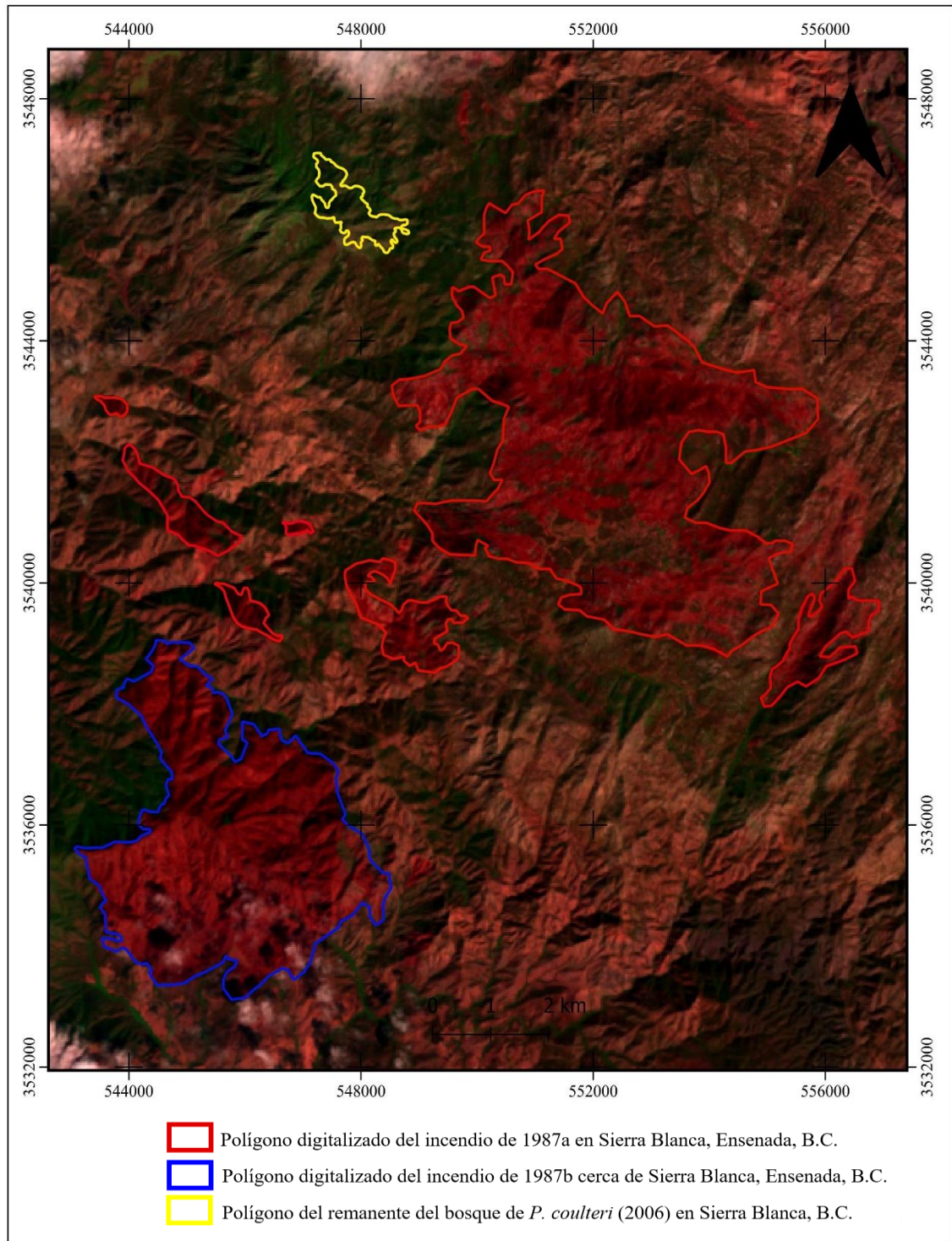


Figura 21.- Polígonos digitalizados del incendio de 1987a en rojo y el incendio 1987b en azul en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.

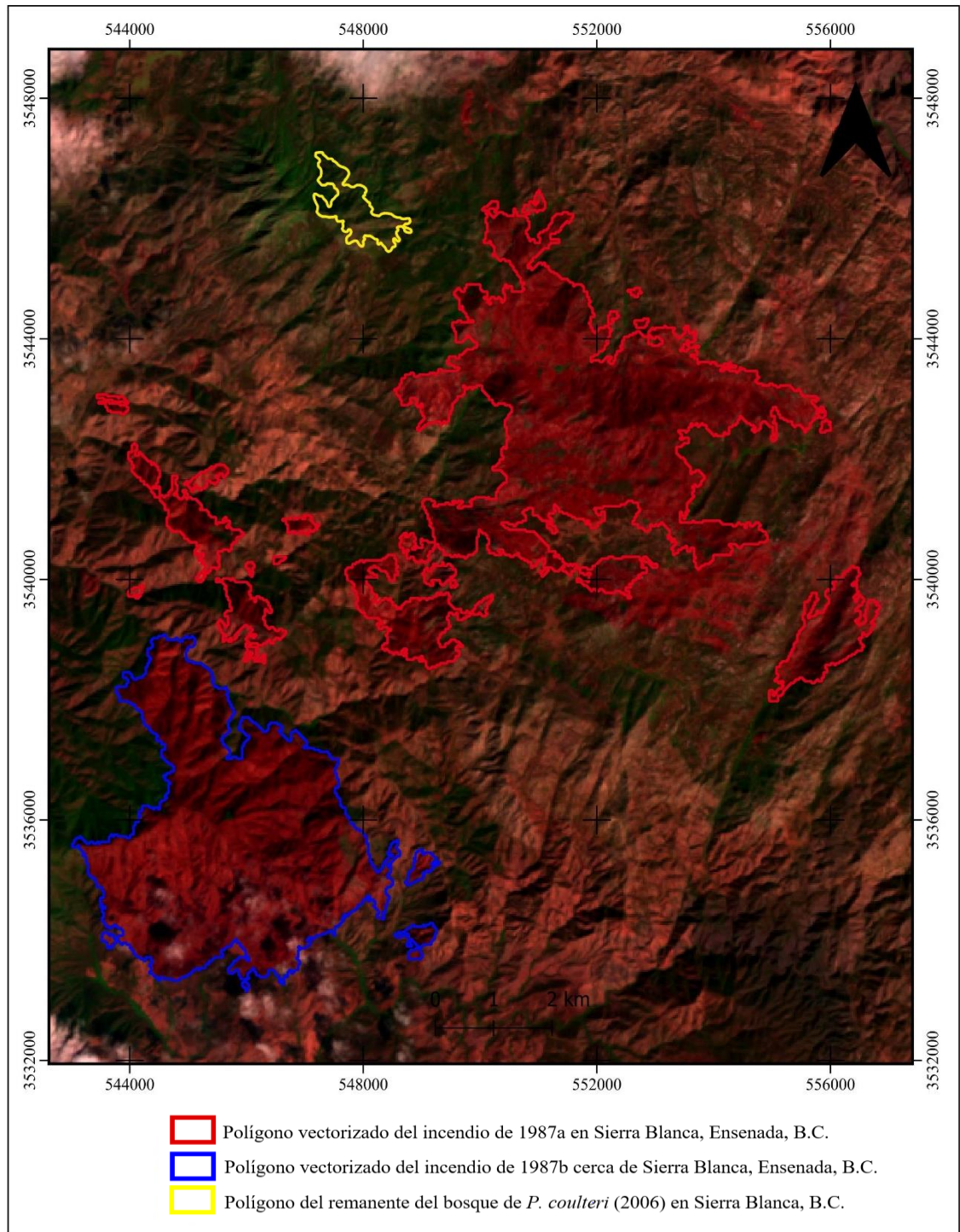


Figura 22.- Polígonos vectorizados del incendio de 1987a en rojo y el incendio 1987b en azul en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California, México. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11 N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS.

8.3 Polígonos del incendio de 1989a en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.

En la figura 23 se muestra el mapa con la cicatriz del incendio de 1989a en Sierra Blanca, Ensenada, B.C., con base en la fecha de la imagen satelital se sabe que el incendio ocurrió en el mes de mayo de 1989. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral a la que al igual que las anteriores se le aplicó la composición de bandas 7-4-3 que destaca la cicatriz del incendio y permitió la digitalización visual del polígono, así como también la vectorización de este, cuyas áreas se comparan más adelante (tabla III).

Además, el mapa contiene una composición de Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR (5 m por pixel) que destaca el relieve de la zona. Se distingue en amarillo el polígono del bosque de *P. coulteri* del 2006 y en rojo la cicatriz del incendio digitalizada (Fig. 23) y vectorizada (Fig. 24). El área obtenida para el polígono de 1989a digitalizado fue de 1.69 km² (169.77 ha), mientras que el área del polígono vectorizado fue de 2.09 km² (209.40 ha). La diferencia entre ambos polígonos fue de 0.4 km² (39.63 ha).

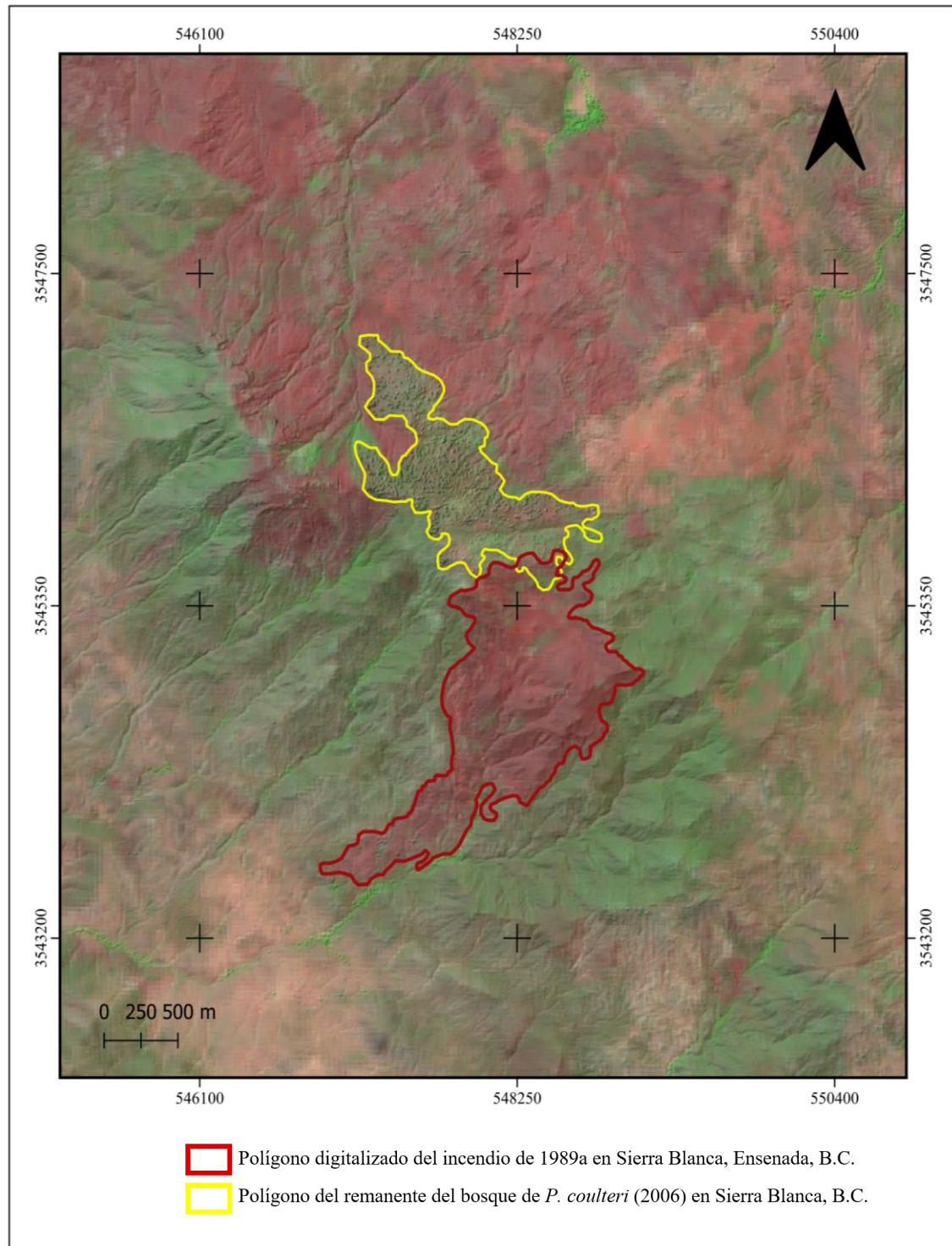


Figura 23.- Polígono digitalizado del incendio de 1989a en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

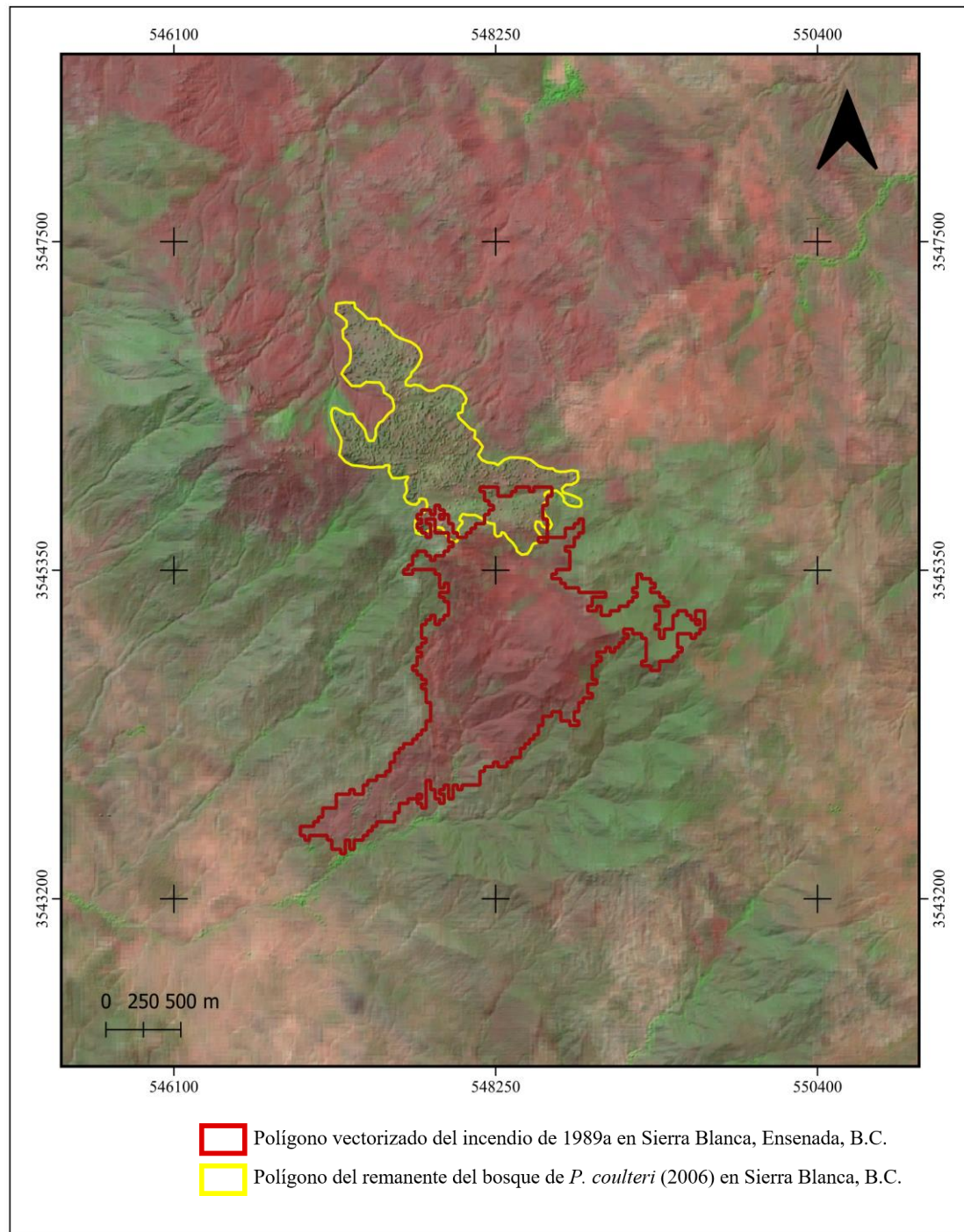


Figura 24.- Polígono vectorizado del incendio de 1989a en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital obtenida del USGS. La imagen de fondo es una imagen satelital multispectral obtenida del USGS.

8.4 Polígonos del incendio de 1989b en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.

El incendio de 1989b ocurrió, según la fecha de la imagen satelital en el mes de junio de 1989, aproximadamente un mes después del incendio de 1989a, en la figura 25 se observa el mapa con el polígono digitalizado de la cicatriz en azul y el polígono del bosque del 2006 en amarillo. A este mapa también se le aplicó la composición RGB 7-4-3 y se le agregó la composición de Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR.

El área de la cicatriz digitalizada (Fig. 25) es de 8.76 km² (876.56 ha), el polígono también se vectorizado (Fig. 26) obteniendo un área de 8.64 km² (864.99 ha). La diferencia entre el polígono digitalizado y vectorizado es de 0.12 km² (11.57 ha).

Por su parte, en la figura 27 se colocaron ambos incendios, es decir, el de 1989a y 1989b, en rojo se observa el polígono vectorizado correspondiente a 1989a, en azul el polígono vectorizado del incendio de 1989b y en amarillo el polígono del bosque del 2006 usado a manera de referencia.

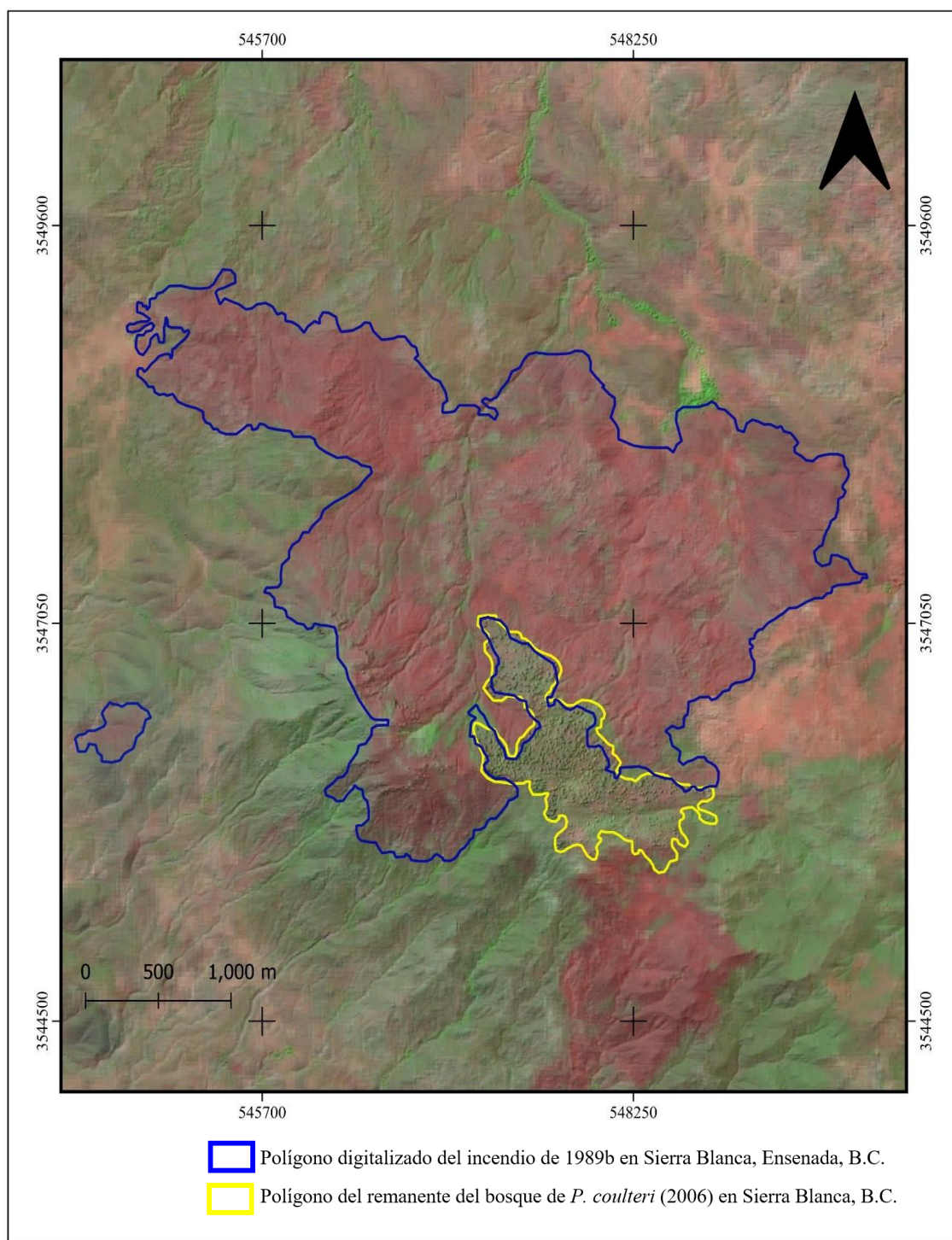


Figura 25.- Polígono digitalizado del incendio de 1989b en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

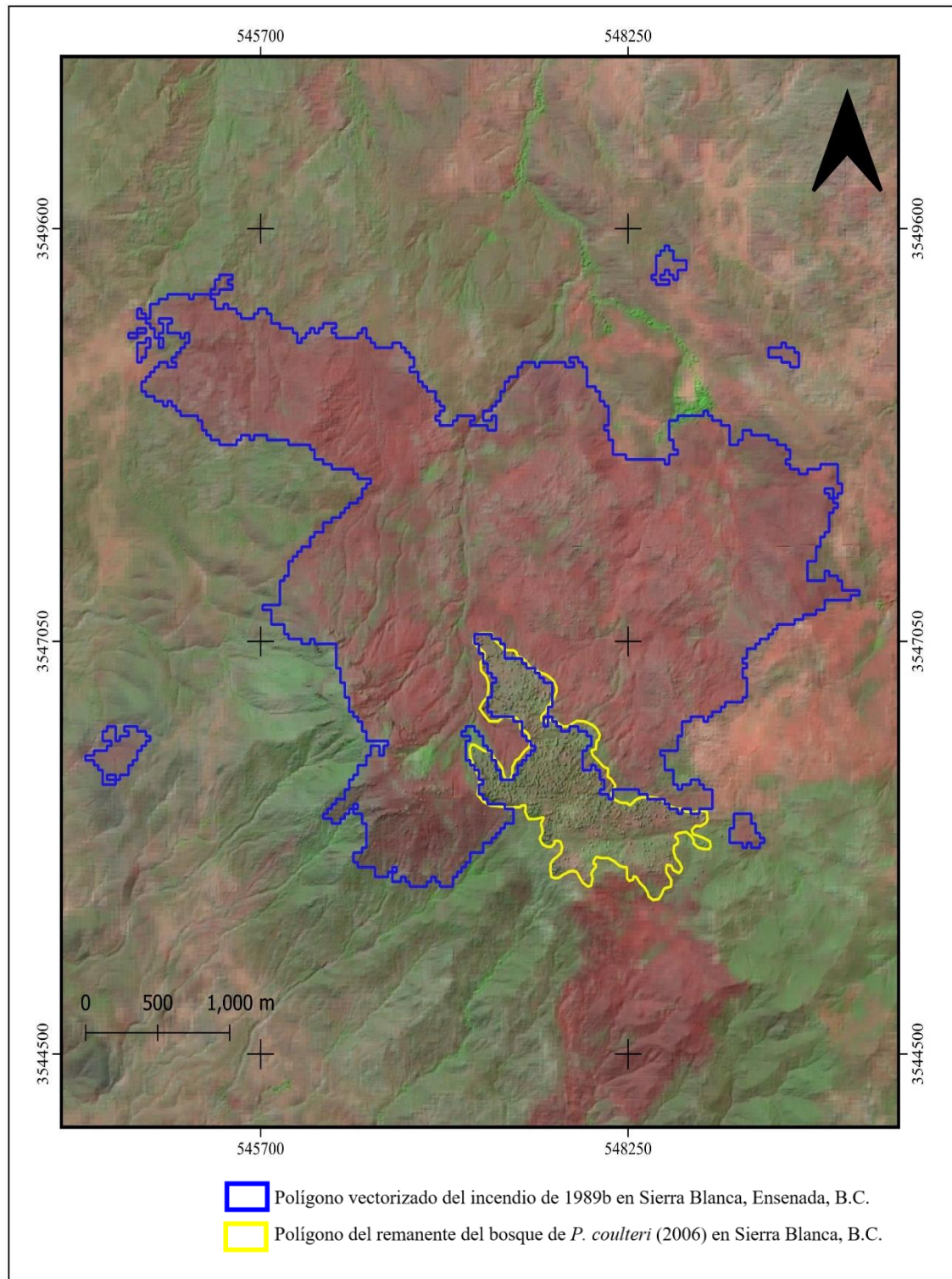


Figura 26.- Polígono vectorizado del incendio de 1989b en Sierra Blanca. Escala 1: 30 00, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

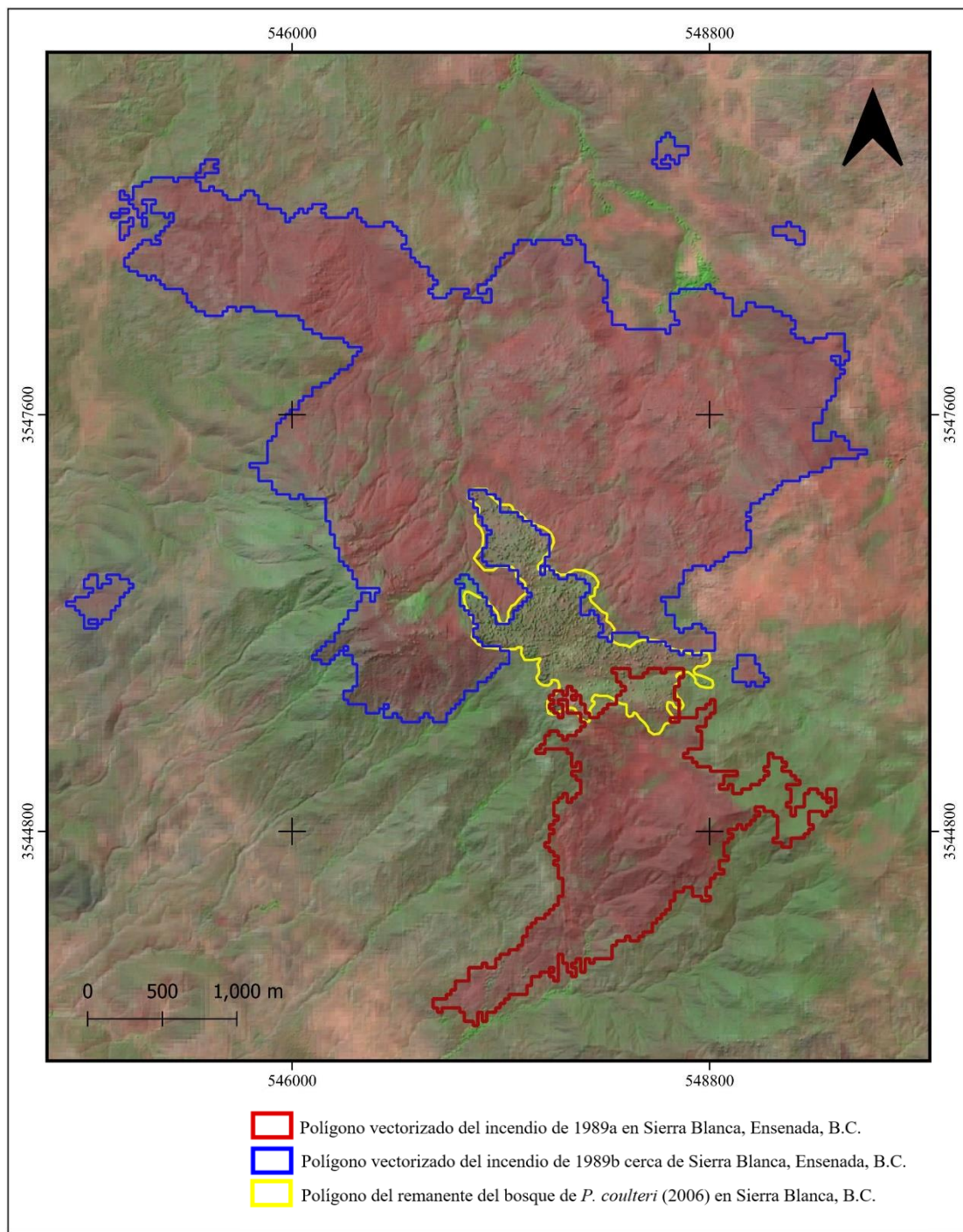


Figura 27.- Polígonos de los incendios de 1989a y b vectorizados ocurridos en Sierra Blanca. Escala 1: 31 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multispectral obtenida del USGS.

8.5 Polígonos del incendio de 1990 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.

En la figura 28 se muestran los polígonos digitalizados correspondientes a los incendios ocurridos en 1990 en Sierra Blanca, no se conoce la fecha exacta, aunque se sabe que sucedieron en septiembre del mismo año, por tal motivo se agruparon. La imagen presentada también tiene una composición RGB 7-4-3 al igual que las anteriores, con el objetivo de destacar las cicatrices. El área de los polígonos digitalizados en rojo tiene en conjunto un área de 9.61 km^2 (961.12 ha).

Mientras que en la figura 29 se pueden ver los polígonos vectorizados correspondientes a cada incendio con área de 7.88 km^2 (788.17 ha). La diferencia entre los polígonos digitalizados y vectorizados es de 1.73 km^2 (172.95 ha). Por último, el polígono amarillo representa el remanente del bosque para el 2006 como referencia.

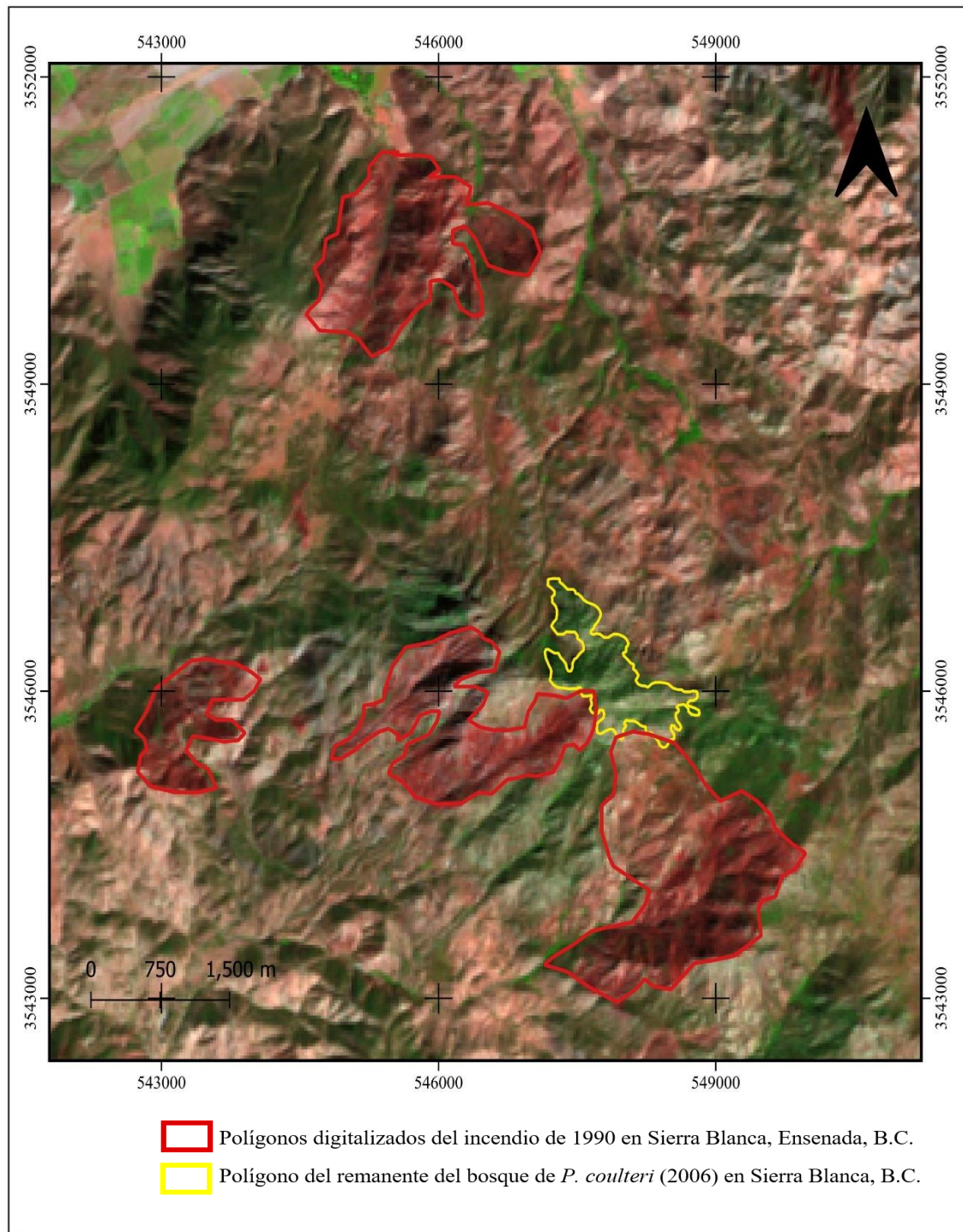


Figura 28.- Polígonos digitalizados del incendio de 1990 en Sierra Blanca. Escala 1: 50 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

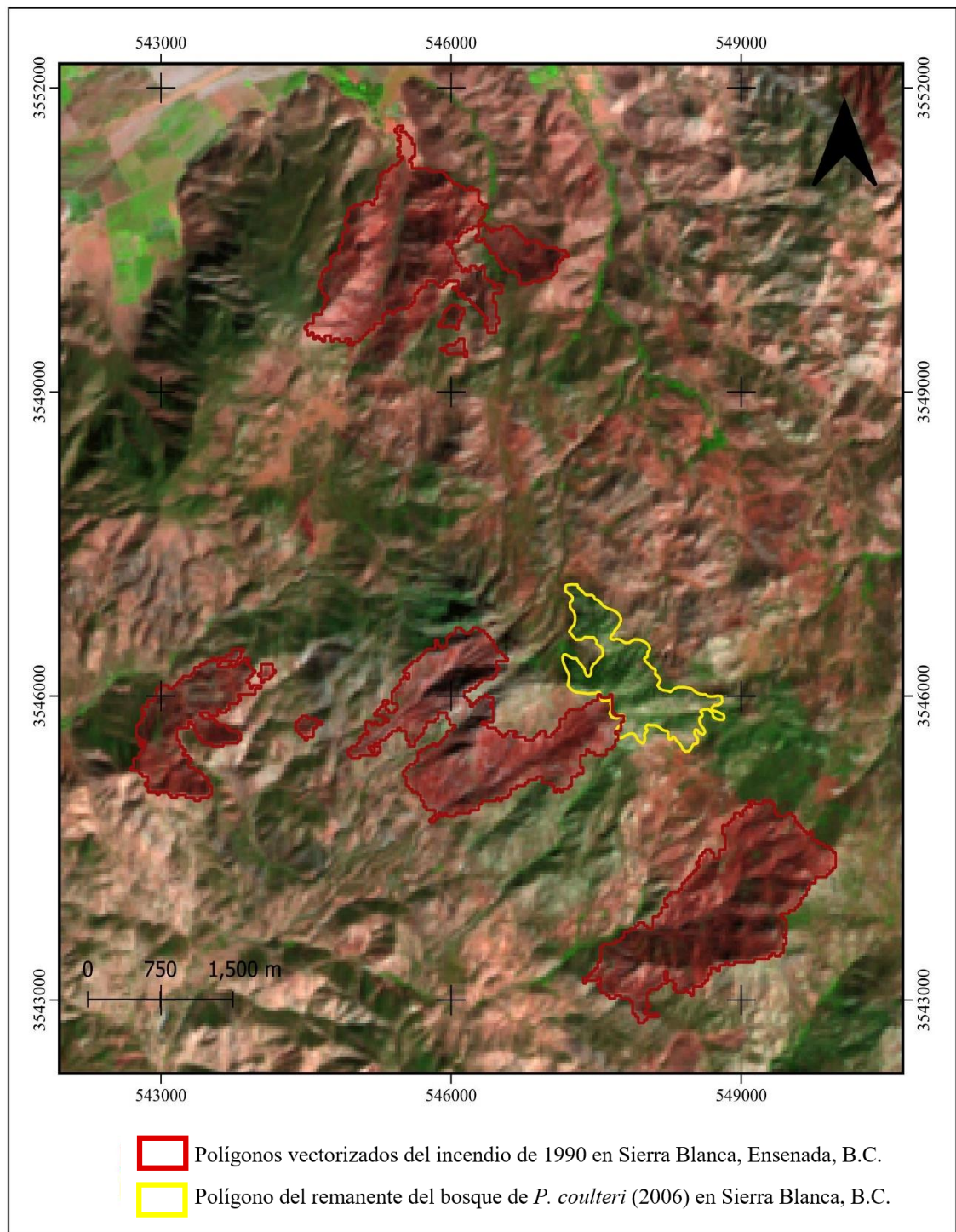


Figura 29.- Polígonos vectorizados del incendio de 1990 en Sierra Blanca. Escala 1: 50 000 WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

8.6 Polígonos del incendio de 1997 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C.

En la figura 30 se muestra el mapa del polígono digitalizado en rojo del incendio de 1997 y el polígono del bosque correspondiente al 2006 en amarillo para considerar la ubicación de la sierra. A este mapa no se le aplicó la composición de Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, ya que la extensión del incendio es amplia y no se alcanzaba a cubrir el mapa. Sin embargo, a la imagen sí se le aplicó la composición RGB 7-4-3 al igual que a las demás.

Después del incendio de 1984, este es el segundo incendio más extenso y ocurrió en agosto de ese año cerca de Sierra con una área del polígono digitalizado de 45.20 km² (4,520.49 ha). En comparación con el polígono vectorizado (Fig. 31) tiene un área de 39.39 km² (3, 939.55 ha) y la diferencia entre ambos polígonos es de 5.81 km² (580.95 ha).

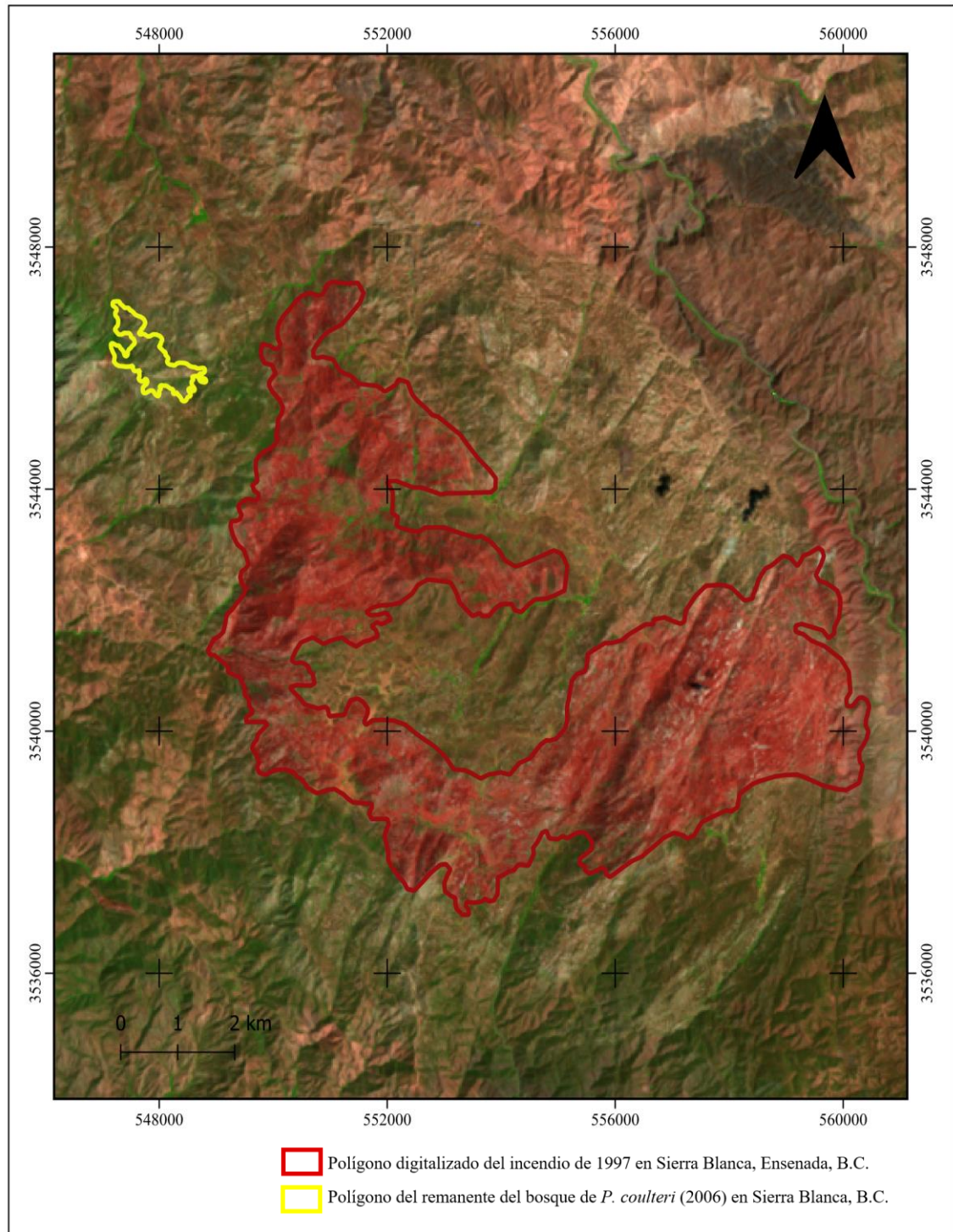


Figura 30.- Polígono digitalizado del incendio de 1997 en Sierra Blanca. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

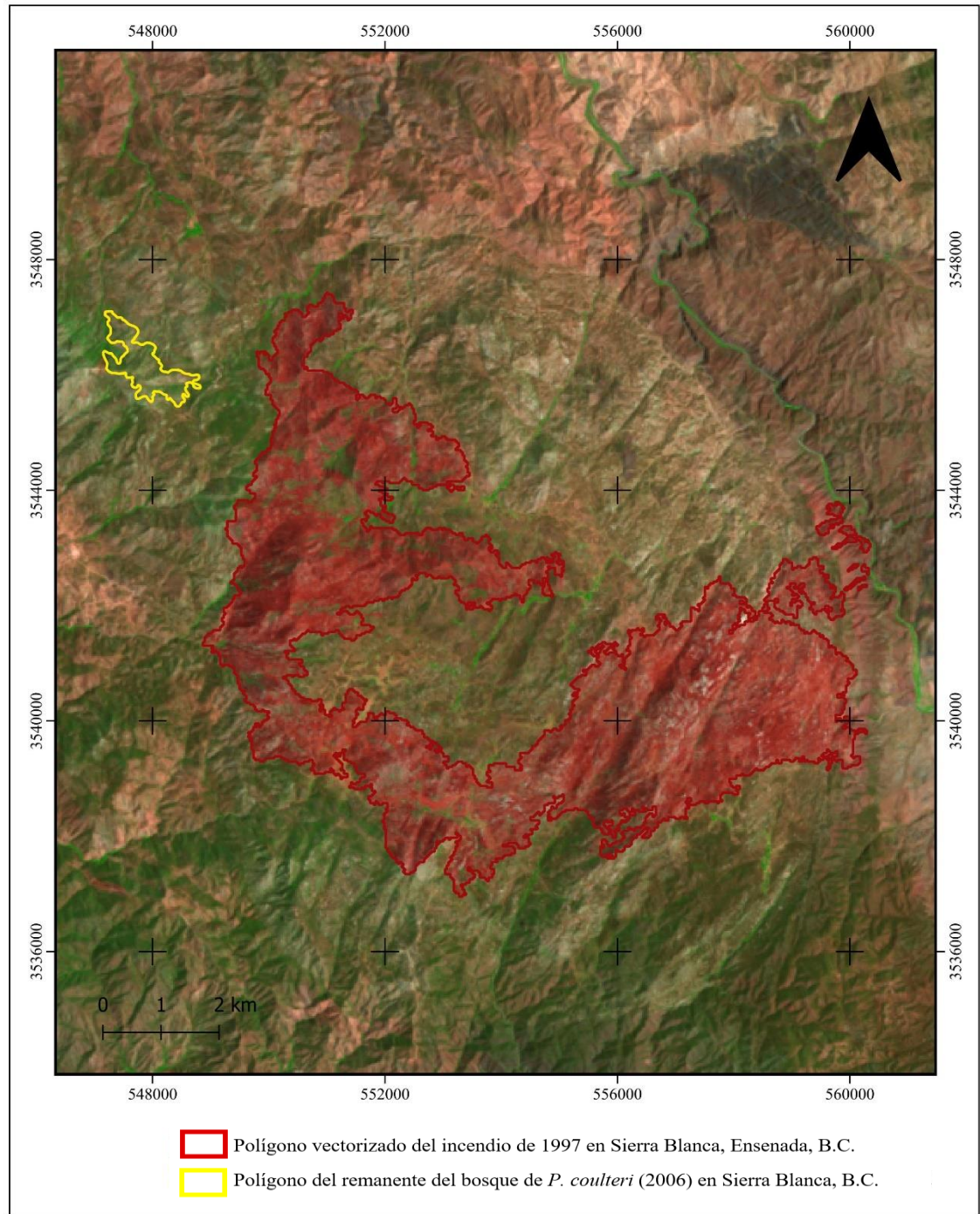


Figura 31.- Polígono vectorizado del incendio de 1997 en Sierra Blanca. Escala 1: 80 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multispectral obtenida del USGS.

8.7 Polígonos incendio del 2006 en Sierra Blanca, Ensenada, B. C.

En la figura 32, se muestra en rojo el polígono digitalizado del incendio en el 2006 que afectó el bosque en Sierra Blanca, siendo el único del que se conoce la fecha exacta. Con base en imágenes Landsat de la base de datos del USGS se identificó que estaba activo el 22 de julio del 2006, mas no se puede afirmar con precisión el momento de inicio. El área obtenida de este polígono digitalizado fue de 18.32 km^2 (1,831.80 ha).

Al polígono anterior, se le colocó el remanente del bosque que sí corresponde a este año, el cual se digitalizo con percepción, el área que se obtuvo fue de $1,008,416.32 \text{ m}^2$ (1 km^2 o 100 ha), que, corresponde a aproximadamente 5.46% de bosque.

En la figura 33, se observa el polígono vectorizado del mismo incendio y el área que se obtuvo fue de 18.29 km^2 (1,829.79 ha) esta incluye el bosque (5.47%) y la vegetación de tipo chaparral que predomina (94.53%). La diferencia del área entre ambos polígonos (digitalizado y vectorizado) fue de 0.03 km^2 (2.01 ha).

A todas las anteriores se les aplicó la composición RGB 7-4-3 para realzar la cicatriz. Además, se le agregó la composición de Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, que ayudó a resaltar el dosel del bosque.

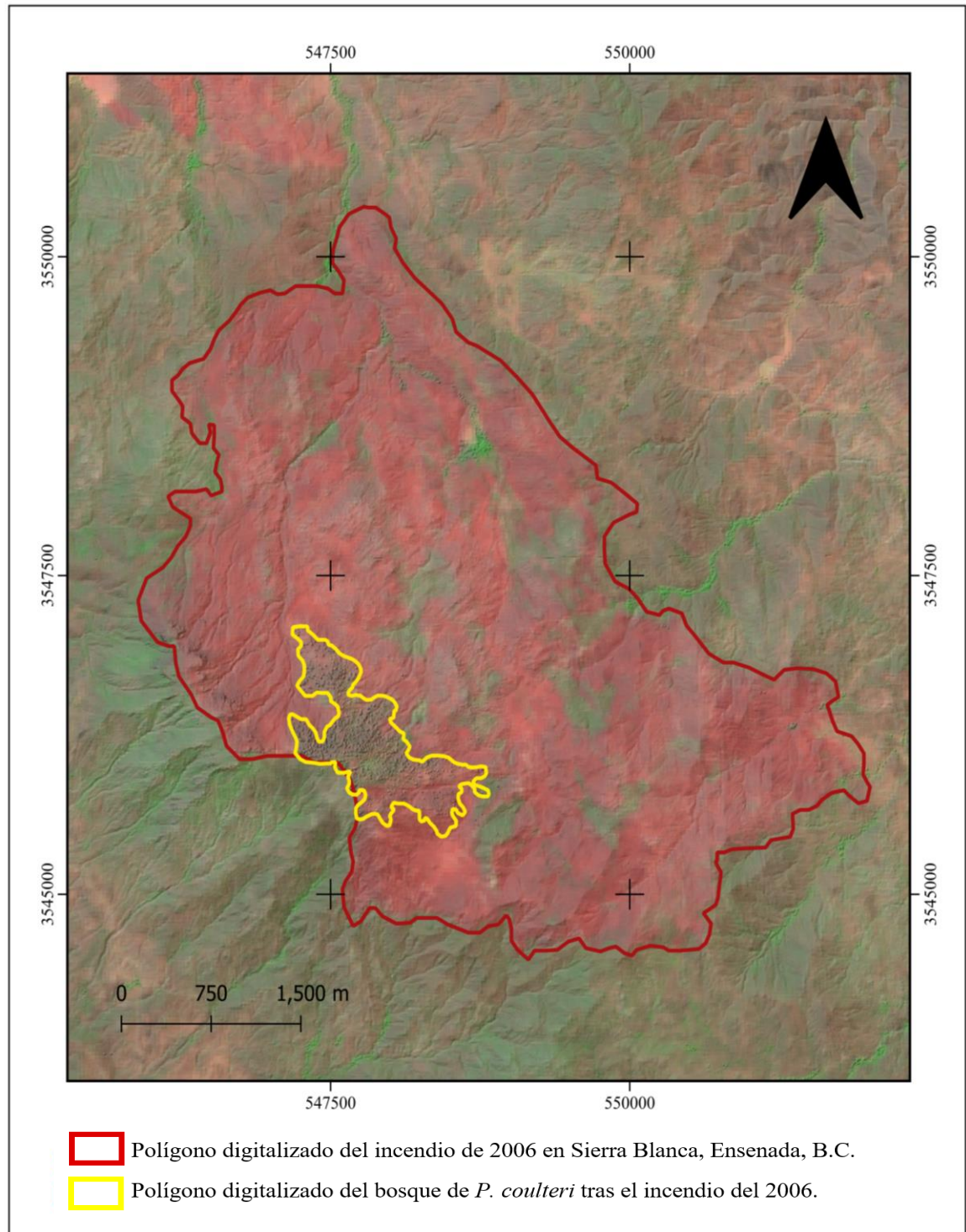


Figura 32.- Polígono digitalizado del incendio de 2006 en el bosque de *P. coulteri*, Sierra Blanca. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

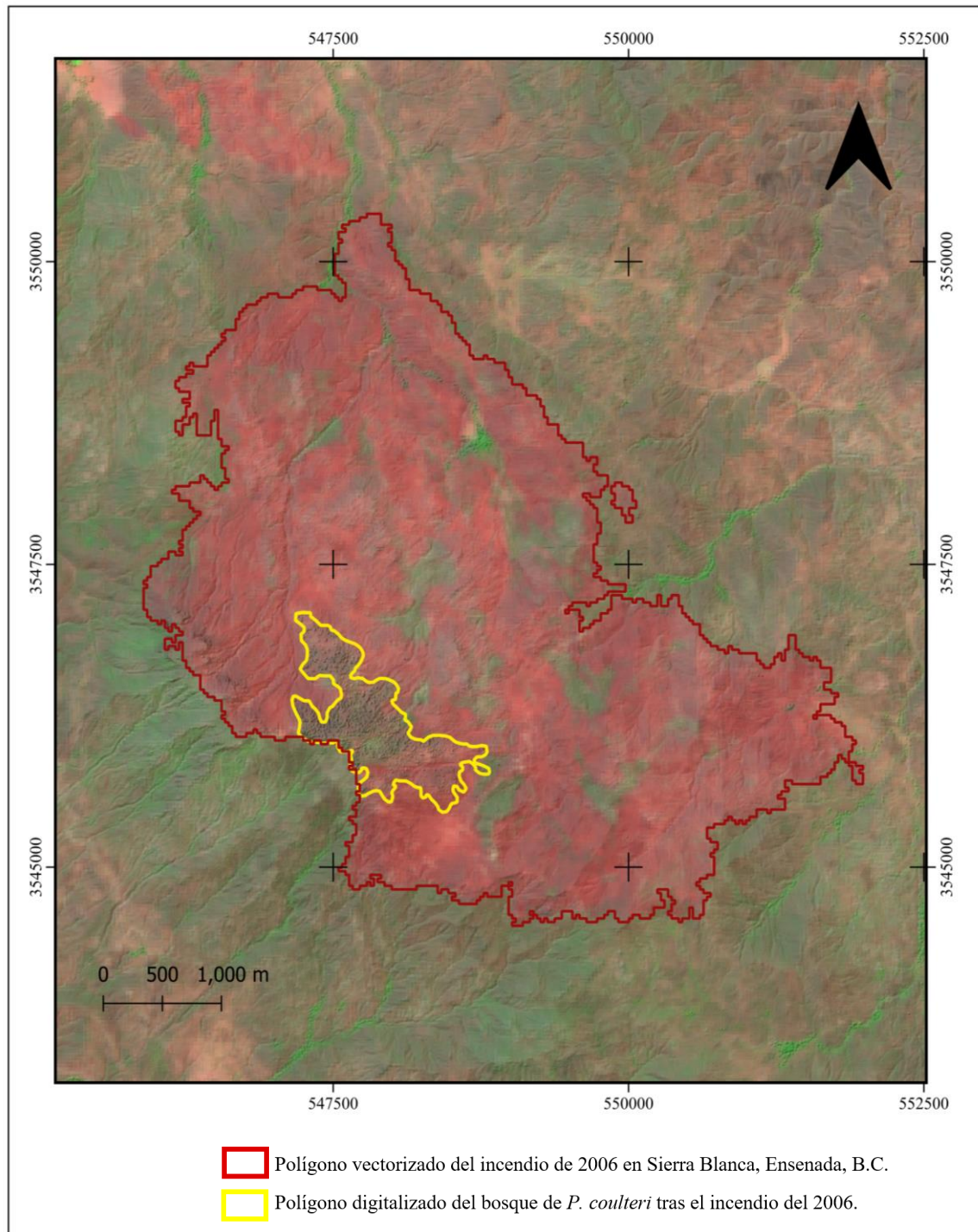


Figura 33.- Polígono vectorizado del incendio de 2006 en el bosque de *P. coulteri*, Sierra Blanca. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

En la figura 34 se observan todas las cicatrices de los incendios ocurridos en Sierra Blanca y sitios cercanos del periodo de 1984-2019.

A continuación se mencionan ordenados de mayor a menor extensión vectorizada (ha) comenzando con el incendio de 1984 (polígono negro) con una extensión de 5,678.94 ha, seguido del incendio de 1997 (polígono rojo) con extensión de 3, 939.55 ha, seguido del incendio de 1987a (polígono blanco) con 2,422.05 ha, después el incendio del 2006 (polígono azul) con una área de 1,829.79 ha, el incendio de 1987b (polígono rosa) con 1,702.4 ha, 1989b (polígono anaranjado) con área de 864.99 ha, el incendio de 1990 (polígono azul claro) con área de 788.17 ha y por último el incendio de 1989a (polígono azul marino) que fue el más pequeño y su área corresponde a 209.40 ha.

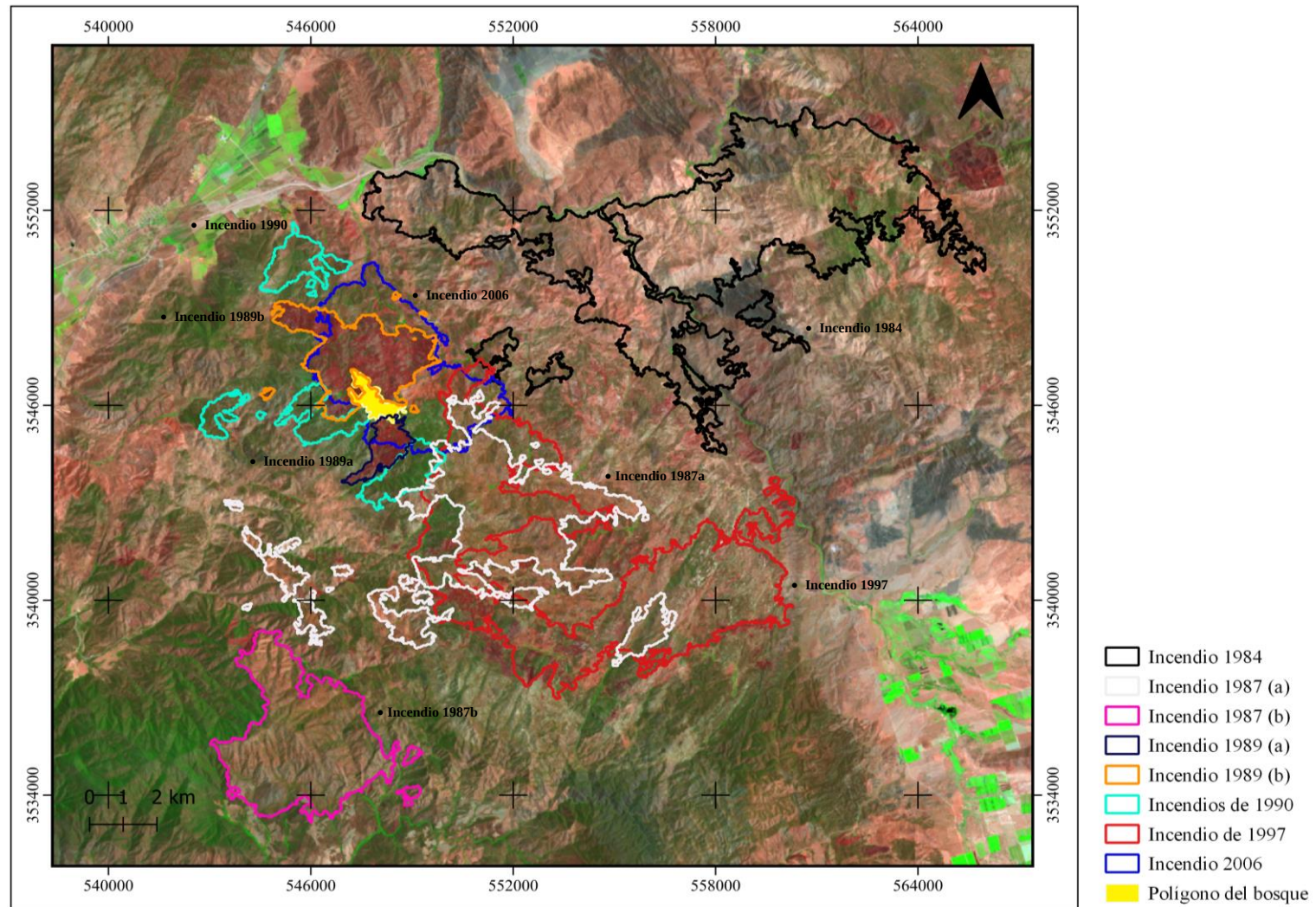


Figura 34.- Historia de los incendios forestales ocurridos en Sierra Blanca y sitios cercanos durante el período de 1984-2019. Escala 1: 120 000, WGS84/UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

En la tabla III se pueden ver las áreas de los polígonos ordenadas por años, se comparan las áreas de cada incendio, también se muestra en la cuarta columna la diferencia entre cada polígono digitalizado contra el vectorizado, esto con el objetivo de comparar como mejora en algunos casos el área con un polígono vectorizado pues se elimina el sesgo y arbitrariedad de un polígono digitalizado a percepción.

Año	área total del incendio en ha		
	Digitalizada	Vectorizada	Diferencia de áreas
1984	n/a	5.678.94 ha	n/a
1987a	3,116.64 ha	2,422.05 ha	694.59 ha
1987b	1,681.74 ha	1,702.45 ha	20.71 ha
1989a	169.77 ha	209.40 ha	39.63 ha
1989b	876.56 ha	864.99 ha	11.57 ha
1990	961.12 ha	788.17 ha	172.95 ha
1997	4,520.49 ha	3,939.54 ha	580.95 ha
2006	1,831.80 ha	1,829.79 ha	2.01 ha

Tabla III.- Áreas de los incendios ocurridos en Sierra Blanca, Ensenada, B.C., durante el período de 1984-2019. Se señalan las áreas digitalizadas y vectorizadas en hectáreas (ha), así como la diferencia entre las mismas.

8.8 Severidad del incendio de 1989b en Sierra Blanca, Ensenada, B.C

Para la estimación de la severidad se utilizó una escala de niveles de gravedad ordinal con rangos de dNBR tomada de Key y Benson (2006), quienes exponen siete niveles en su escala que se traducen como: rebrote-alto, rebrote-bajo, no quemado, severidad baja, moderada-baja, moderada-alta y severidad alta, la escala se muestra en la tabla IV.

Severity level	dNBR range
Enhanced regrowth, high	-500 to -251
Enhanced regrowth, low	-250 to -101
Unburned	-100 to +99
Low severity	+100 to +269
Moderate-low severity	+270 to +439
Moderate-high severity	+440 to +659
High severity	+660 to +1300

Tabla IV.- Niveles de gravedad ordinal y rango de ejemplo de dNBR (escalado por 10^3). Los autores contemplan siete clases que se establecen con base en rangos determinados de dNBR. Fuente: Key y Benson (2006).

Sin embargo, en este trabajo solo se consideraron cinco niveles, a partir del nivel “no quemado” hasta el nivel de “severidad alta”, ya que los rangos de rebrote mejorado-alto, rebrote mejorado-bajo no eran de interés para este trabajo.

La severidad del incendio de 1989b se puede ver en la figura 35, donde los colores corresponden de la siguiente manera:

Nivel de severidad	Color
No quemado	Verde oscuro
Severidad baja	Verde claro
Severidad moderada-baja	Amarillo
Severidad moderada-alta	Anaranjado
Severidad alta	Rojo

Tabla V.- Colores correspondientes a los niveles de severidad.

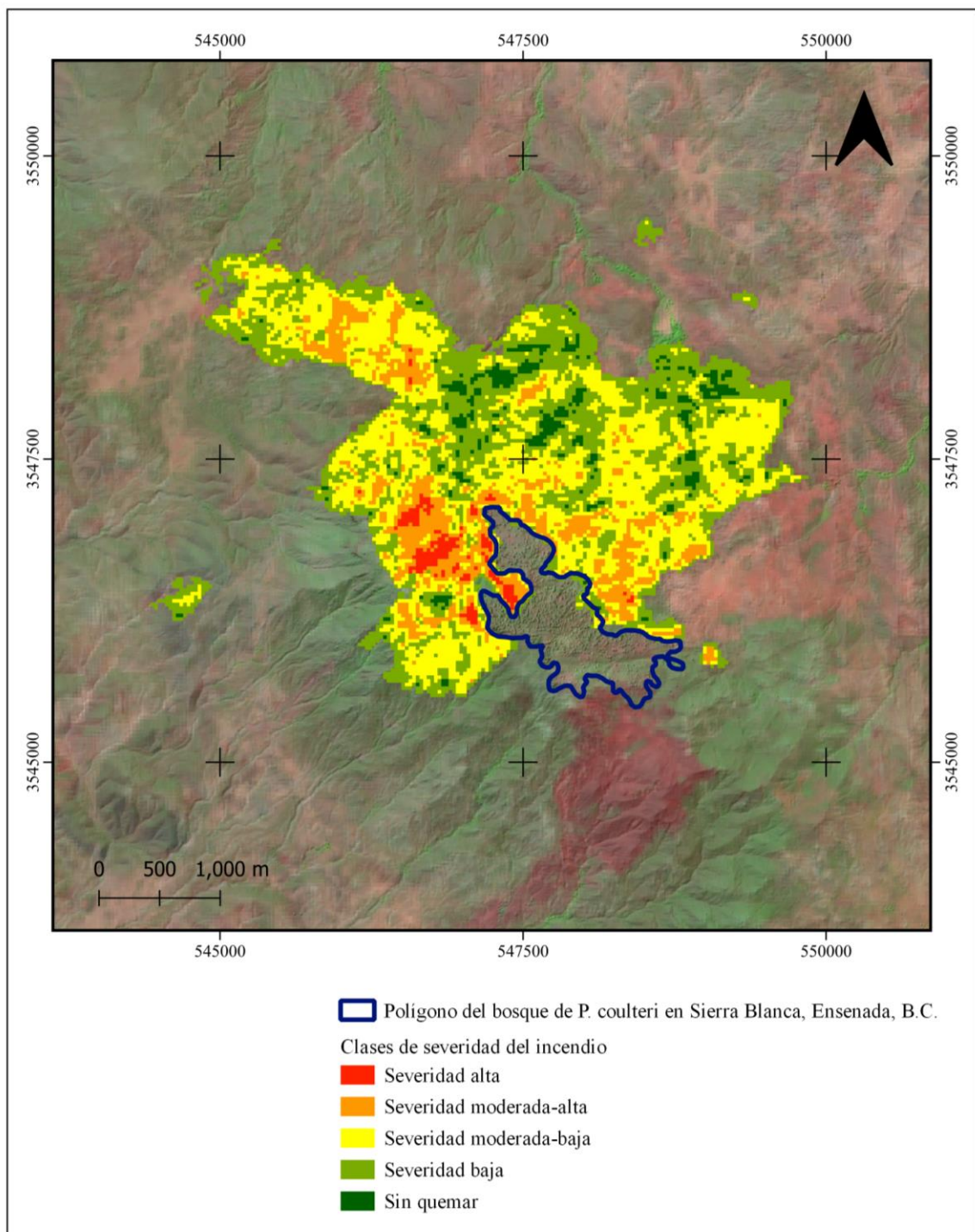


Figura 35.- Severidad del incendio total y del bosque ocurrido en Sierra Blanca en 1989b Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

Según los resultados, el incendio de 1989b tuvo 39.42 ha no quemadas, 324.45 ha con severidad baja, 358.83 ha con severidad moderadamente-baja, 124.38 ha con severidad moderadamente-alta y 17.91 ha quemadas con severidad alta.

Si se considera que el área total del incendio fue de 864.99 ha, se estima que el 16.44% del incendio fue de alta severidad en conjunto con la severidad moderadamente-alta (se pueden sumar porque ambas matarían un árbol) y que la mayor parte del incendio, es decir, 41.48% tuvo una severidad moderadamente-baja, la cual corresponde al color amarillo que en efecto es el que más destaca en el mapa (Fig. 35), por su parte, el 4.55% correspondió a área no quemada, el 37.50% a severidad baja.

Con base en lo anterior, podría decirse que el incendio ocurrido en Sierra Blanca en 1989b fue de severidad moderadamente-baja según la escala propuesta por Key y Benson (2006). Aunque cabe destacar, que como se observa en el mapa, el área donde se centra la severidad alta del incendio queda justo al lado izquierdo superior del polígono del bosque (2006) (polígono azul), lo que es preocupante si se considera que dicha severidad podría escalar y dirigirse hacia los pinos.

8.9 Severidad del incendio en 2006 en Sierra Blanca, Ensenada, B.C

La severidad del incendio del 2006 en Sierra Blanca se muestra en la figura 36, para este mapa se empleó también la escala de niveles de gravedad ordinal con rangos de dNBR tomada de Key y Benson (2006), los colores de corresponden a lo establecido en la tabla IV.

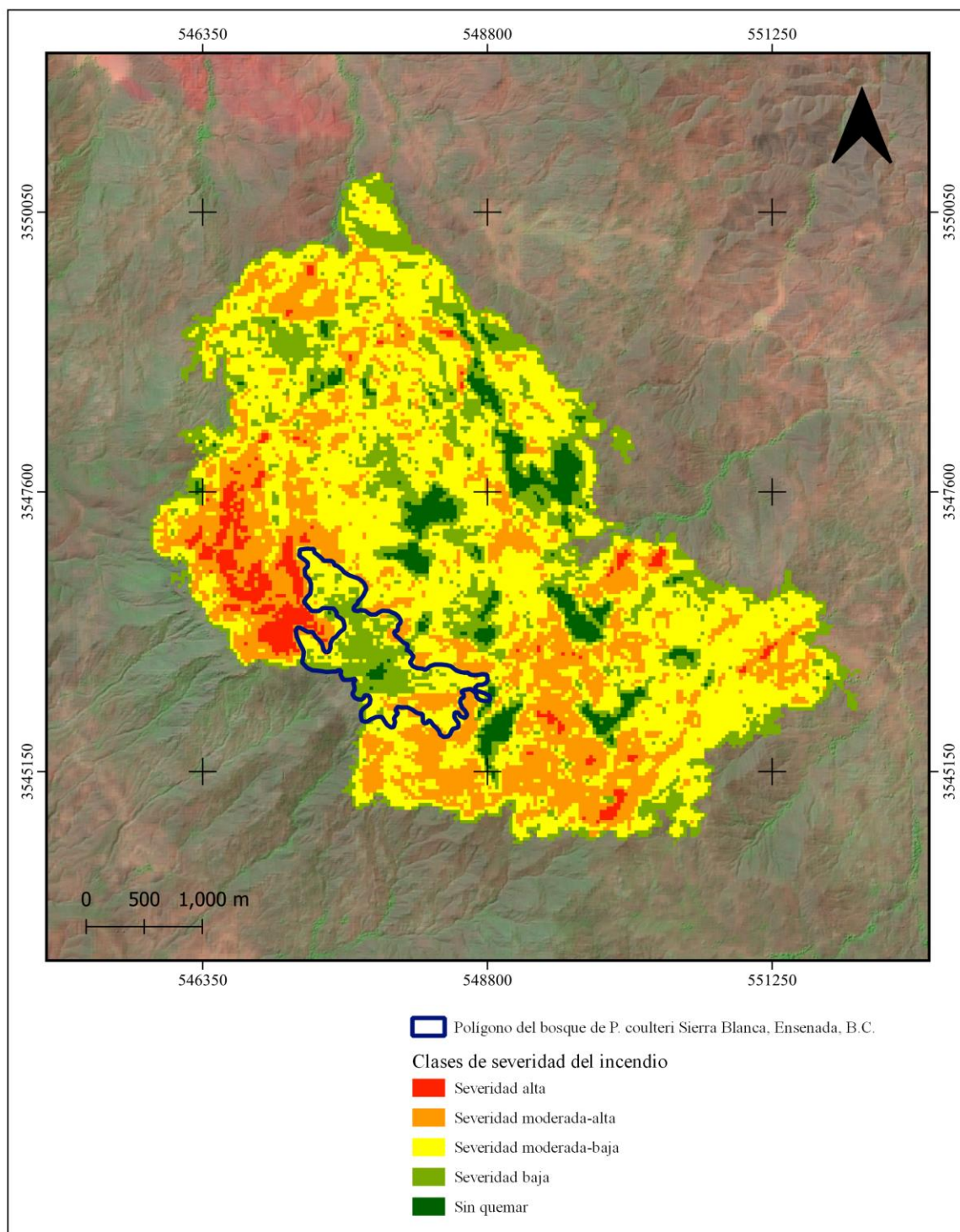


Figura 36.- Severidad del incendio forestal del 2006 en el bosque de *P. coulteri*, Sierra Blanca, Ensenada, B.C. Escala 1: 40 000, WGS84/ UTM zone 11N. La imagen de fondo es una imagen satelital multiespectral obtenida del USGS.

Los resultados para cada categoría fueron los siguientes: 82.17 ha sin quemar, 378.27 ha en la categoría de severidad baja, 845.82 ha con severidad moderadamente-baja, 464.67 ha con severidad moderada-alta y 58.86 ha con severidad alta.

En total el incendio tuvo una extensión de 1,829.79 ha, se calcula que el 28.6% fue de severidad alta y moderadamente-alta, mientras que la categoría con mayor porcentaje es de 46.22% correspondiente a severidad moderadamente-baja que está representada por el color amarillo en el mapa (Fig. 36), siguiendo con los porcentajes, 4.49% corresponde a hectáreas sin quemar, 20.67% de severidad baja.

De acuerdo con lo anterior, se considera que el incendio del 2006 en Sierra Blanca fue de severidad moderadamente-baja, Sin embargo, al comparar este incendio con el de 1989b, se puede ver en ambos mapas que la zona con la severidad más alta coincide en la parte izquierda superior del polígono del bosque de *P. coulteri* (polígono azul), esta área corresponde a la ladera norte de la sierra donde la vegetación dominante es chaparral con mayor cantidad de combustible vivo y muerto, lo cual reitera que dicha zona es la que podría propagar el incendio de mayor severidad al bosque.

Por último, la tabla VI muestra los datos resumidos de la severidad de los incendios de 1989a y del 2006, respecto a los incendios de 1989a y 1989b, solamente estimó la severidad para el incendio b ya que fue el que afectó al bosque de *P. coulteri*, al igual que el del 2006, por tal motivo fueron a los únicos incendios a los que se les calculó la severidad con el objetivo de conocer cómo había sido la severidad dentro del polígono del bosque.

Año	No. de incendios	No quemados	Baja severidad	Moderada -baja	Moderada -alta	Alta severidad	Total (Ha)
1989	1989 (b)	39.42 ha	324.45 ha	358.83 ha	124.38 ha	17.91 ha	864.99 ha
2006	1	82.17 ha	378.27 ha	845.82 ha	464.67 ha	58.86 ha	1,829.79 ha

Tabla VI. - Severidad de los incendios de 1989b y 2006 en el bosque de *P. coulteri* tras los incendios ocurridos durante el periodo de 1984-2019. La severidad se muestra en cinco clases cada una con su respectiva área en hectáreas. *Solo se estimó severidad del incendio b de 1989.

8.10 Polígono del bosque de *P. coulteri* del año de 1993

En la figura 37 se observa una ortoimagen compuesta del bosque de *P. coulteri* de 1993, esta imagen es la más antigua que se puede encontrar en la base de datos del INEGI y se puede apreciar como el bosque era más abundante en comparación con el remanente actual de pinos adultos.

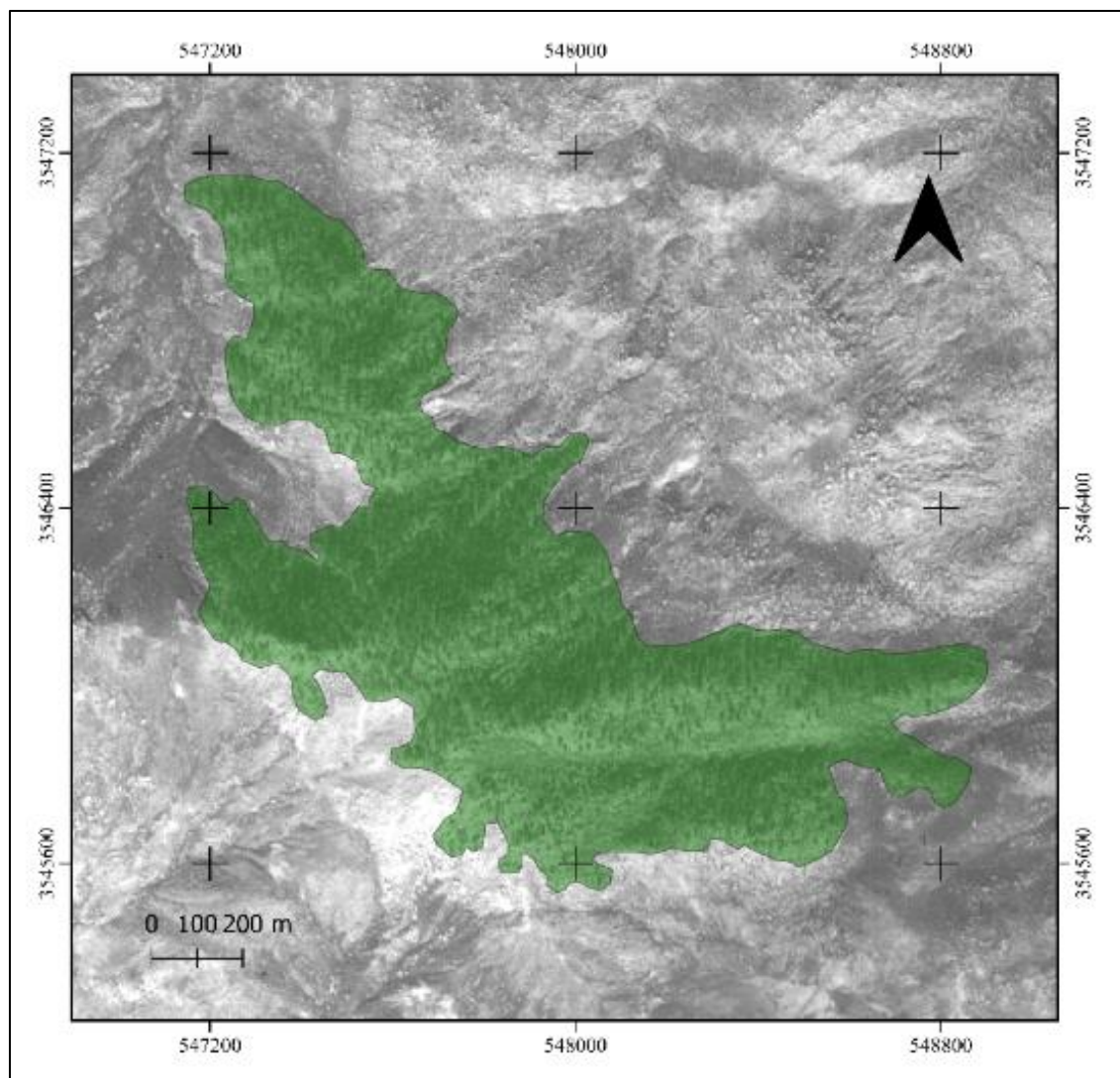


Figura 37.- Polígono del bosque de *P. coulteri* (verde), Sierra Blanca, Baja California México en 1993. Escala 1: 13 000, WGS84/ UTM zone 11N. Fuente: INEGI

El área de este polígono (Fig. 37) es de 1, 099,917.46 m² (1.099 km² o 109.9 ha), como dato interesante se tiene que, si se resta el área del polígono del bosque de *P. coulteri* del 2006 que es igual 1,008,416.32 m² (100.84 ha) y la del polígono del bosque de 1993 (109.9 ha), se obtiene una diferencia de 91,501.14 m² (9.1 ha), es decir, de 1993 al 2006 el arbolado adulto se redujo aproximadamente en 8.31%.

8.11 Polígono actual del bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca 2017

Finalmente, como parte de los resultados también se estimó el área del remanente del bosque de *P. coulteri* a partir de una imagen satelital del software Google Earth Pro, los polígonos se realizaron a percepción visual para tener una estimación de cuánto queda principalmente de arbolado adulto en la actualidad.

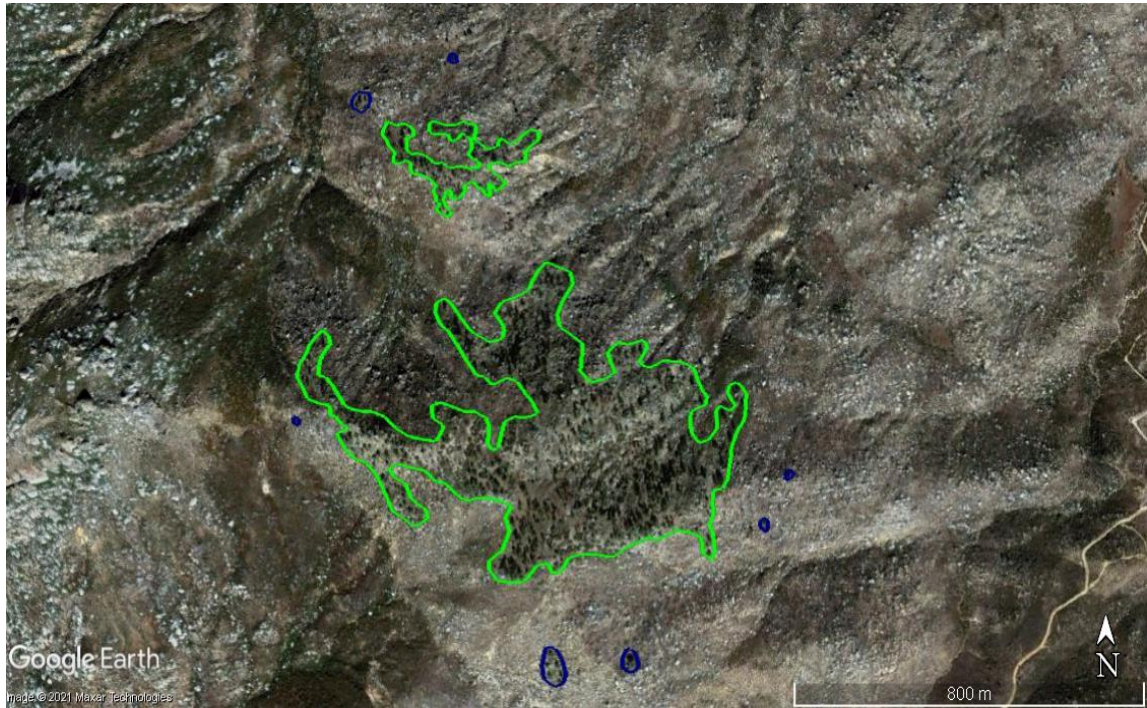


Figura 38.- Polígonos del bosque de *P. coulteri* (verde), parche 1 (superior) y parche 2 (inferior), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017, en azul de encierran algunos pinos aislados. Fuente: Google Earth Pro.

En la figura 38 se observa una imagen satelital del 2017, cabe destacar que se seleccionó esta imagen porque gracias a la luz y ciertos ángulos se podían distinguir mejor los pinos y esto facilitaba la digitalización del polígono. Sin embargo, el software sí ofrece una imagen más reciente del 2018 pero no realzan el dosel del bosque lo que dificulta registrar un polígono a percepción.

Debido a que se pueden discernir dos parches principales (Fig. 38), un pequeño parche aislado a estos dos fragmentos con pocos ejemplares agrupados (3-5 pinos) y pinos aislados cerca del área (polígonos azules), se dividió la imagen para acercar los dos parches principales del bosque, la figura 39 muestra el polígono superior, el cual tiene un área de 21,857 m² (2.19 ha). En este parche se observan pocos pinos adultos y probablemente algunos de menor tamaño aunque es difícil diferenciarlos con respecto a la vegetación del chaparral. En 2017 se tomaron unos pares de parcelas permanentes en estos polígonos por parte de Rivera Huerta y colaboradores para observar la regeneración del sitio donde se encontraron brinzales de entre 8 a 10 años aproximadamente mezclados entre el chaparral y la mayoría aislados unos de otros.

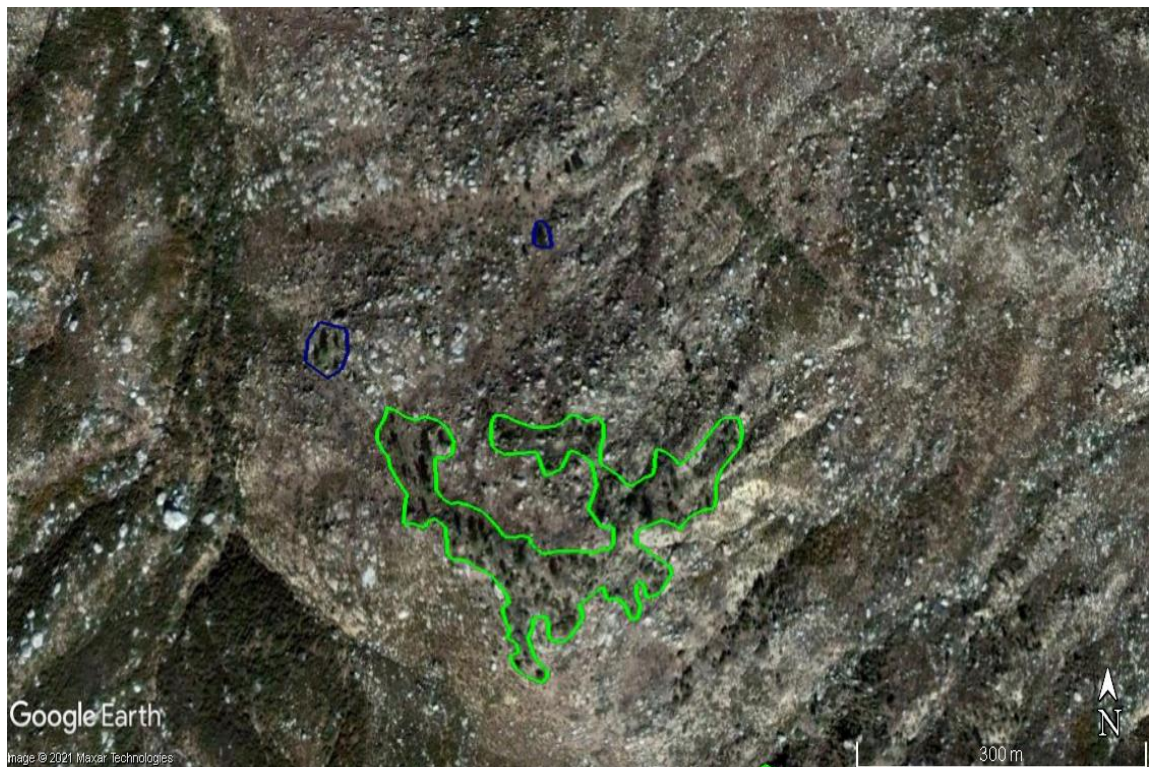


Figura 39.- Polígono parche superior del bosque de *P. coulteri* (verde), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017. Fuente: Google Earth Pro.

El polígono inferior se ve en la figura 40, este parche presenta un área de 235,499 m² (0.24 km² o 23.5 ha), en ese polígono destaca el dosel de pinos adultos, la suma de ambos polígonos da un total de 257,356 m² (0.25 km², 25.73 ha).

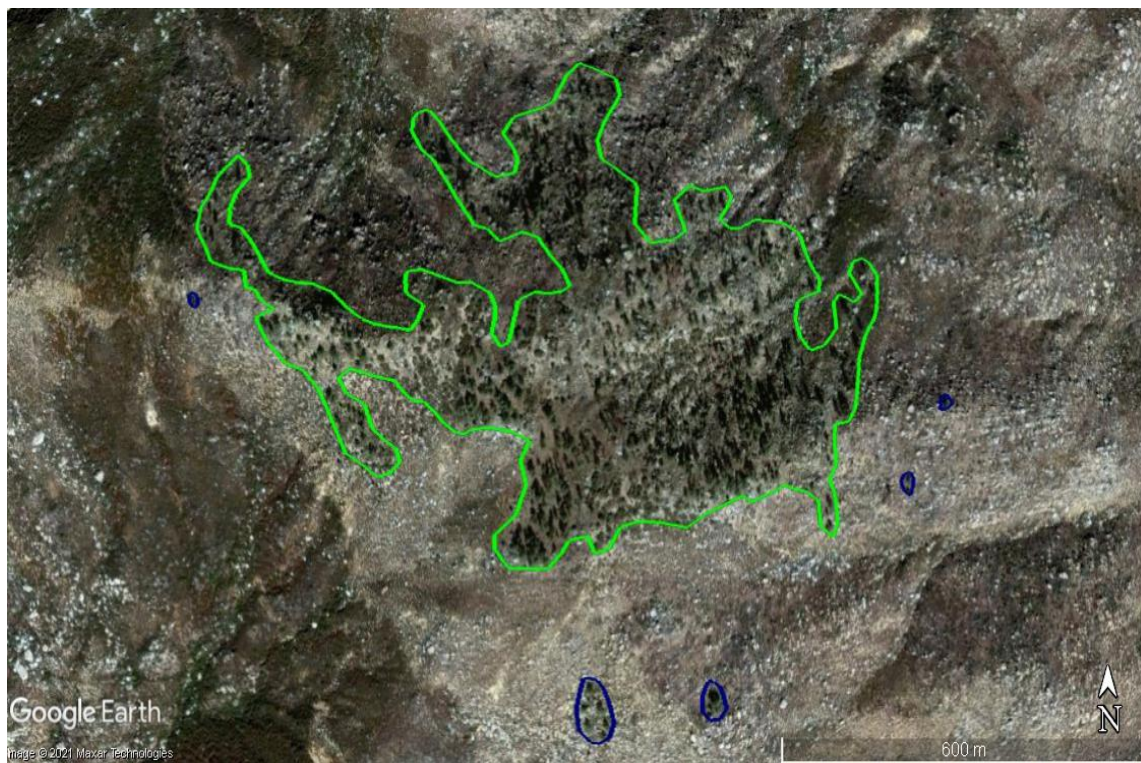


Figura 40.- Polígono parche inferior del bosque de *P. coulteri* (verde), Sierra Blanca, Baja California México, en el 2017. Fuente: Google Earth Pro.

En la tabla VII se hace un resumen de las áreas del bosque de *P. coulteri* correspondientes a los años de 1993, 2006 y 2017, para hacer la comparación de la reducción de arbolado adulto en el bosque durante esos años. Contrastando el área de 1993 con la del 2006 se obtuvo que esta disminuyó 91,501.1 m² (9.15 ha) equivalente al 8.31%, al comprar el área del 2006 con la del 2017 se obtuvo una disminución de 751,060.32 m² (75.10 ha) igual a 74.47% esto significa que se perdió mucho más de la mitad de los pinos adultos en 11 años.

Por último, si se compara el área de 1993 y la del 2017 se perdieron 842,561.46 m² igual a 76.60% en 24 años. Observando que la pérdida más significativa fue a partir del 2006 hasta la actualidad.

Año	Área del bosque de <i>P. coulteri</i>
1993	1,099,917.4 m ²
2006	1,008,416.3 m ²
2017	257,356 m ²

Tabla VII.- Áreas del bosque de *P. coulteri* con respecto al arbolado adulto en Sierra Blanca, Ensenada, en los años en los años de 1993, 2006 y 2017.

IX DISCUSIÓN

Con respecto a los incendios del periodo de 1984-2019 en Sierra Blanca y sus alrededores, se encontraron un total de ocho incendios: 1984, 1987a y b, 1989a y b, 1990, 1997 y 2006, de los cuales dos afectaron directamente al bosque de *P. coulteri*. Por lo regular, todos los incendios ocurrieron entre los meses de mayo-septiembre, con esos resultados se puede examinar que la dinámica del fuego es frecuente y en ocasiones afecta al bosque debido a que se trata de un pequeño relicto rodeado por vegetación de tipo chaparral, la cual presenta un régimen de fuego natural destructivo con periodo de retorno de entre 20 a 40 años o más, aunque otros autores (Minnich *et al.*, 2013 en Rodríguez, 2014) menciona retornos de entre 70 a 82 años en los chaparrales de Baja California.

En contraste, ese mismo autor (Rodríguez, 2014) señaló que los pinares por su parte presentan un régimen de incendios superficiales de baja a moderada intensidad y el retorno de incendio es de pocos años, aunque algunos bosques tienen regímenes mixtos (incendios de copas y superficiales) y en particular, los pinos mediterráneos tienen una variación amplia entre los años de retorno de incendios que muchas veces está asociado con matorrales (generalmente con retornos de varias décadas), como es en el caso de *P. coulteri*.

Al comparar lo anterior con los intervalos entre los incendios ocurridos en el chaparral, se puede observar que estos no ocurrieron en retornos de varias décadas como lo menciona la literatura para su régimen de fuego natural, sino que de lo contrario ocurrieron en lapsos más cortos de entre 1-9 años.

Por su parte, en cuanto a los incendios que afectaron directamente el bosque de *P. coulteri*, 1989b y 2006, transcurrieron en un lapso de 17 años, lo que al contrastar por ejemplo con la literatura para los bosques mixtos de sierra San Pedro Mártir, los cuales tienen un retorno de incendios de 15 años (Stephens *et al.*, 2003, Rivera *et al.*, 2016), podría pensarse que por la cercanía con el bosque, debería coincidir con ese periodo de retorno natural de incendios. Sin embargo, *P. coulteri* está más asociado con el chaparral por lo que en teoría debería presentar un retorno de incendios semejante a este. Además *P. coulteri* en comparación con *P. jeffreyi*, tiene periodos de retorno más largos (Rodríguez, 2014).

La variación en los regímenes de fuego naturales se debe en gran medida a que los regímenes actuales son el resultado de varios factores entre ellos actividades de origen humano y por ende no concuerdan con los regímenes naturales y además afectan a la flora como a la fauna del sitio.

De acuerdo con Villers y Hernández (s/f) algunos de los factores asociados con la alteración en los regímenes de fuego son: actividades agropecuarias, incendios intencionales por venganza entre grupos, fumadores, fogatas, así como la introducción de especies invasoras, fragmentación del paisaje e inclusive por el cambio climático, entre otras.

En cuanto al cambio climático, se identifica como una de las fuentes de origen humano que indirectamente modifican estos regímenes, de acuerdo con el INECC (2019) este fenómeno se relaciona con aumento en las temperaturas tanto en los océanos como en la superficie terrestre, alteraciones en los patrones de precipitación, sequías prolongadas,

pérdida de biodiversidad, propensión de incendios forestales, añadiendo también su influencia en los eventos climáticos conocidos como El Niño y La Niña, los cuales pueden crear condiciones ideales para dar inicio a incendios forestales (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Con base en un listado de eventos El Niño y La Niña obtenido de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), se hizo una comparación entre los años en los que ocurrieron los incendios forestales en Sierra Blanca durante el periodo de 1984-2019 y estos eventos, se encontró que el incendio de 1987 coincide con el evento El Niño de ese año, mientras que el incendio de 1989a y 1989b coinciden el evento La Niña de ese mismo año. El resto de los años, 1984, 1990, 1997 y 2006, se ubicaron dentro de la categoría “neutral” expuesta también en dicho listado.

En particular, al observar la precipitación promedio anual para el año de 1989 conforme los registros de la estación meteorológica más cercana al bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca (anexo 4), se tiene registrado para ese año el valor más bajo de precipitación con 59 mm y el promedio de temperatura máxima de 27.2°C uno de los valores más altos entre esos años, asociamos a estos factores climáticos incluido al evento La Niña de 1989 la ocurrencia de los incendios de 1989a y b ocurrido un mes después sucesivamente.

En relación con lo anterior y los incendios forestales, Hessburg *et al.* (2019) afirman que la severidad con la que se quema un sitio depende en gran medida de las características del combustible y las condiciones meteorológicas, principalmente por la temperatura y precipitación regional, ya que estas determinan en un principio la humedad del

combustible y la disponibilidad de este para quemarse y a futuro la capacidad de recuperación y la resistencia del ecosistema a factores estresantes.

En cuanto a los incendios que afectaron directamente el bosque de *P. coulteri* en 1989b y 2006, al contrastar la severidad de cada incendio se observa que ambos estuvieron sujetos a una severidad moderada-baja según la escala de Key y Benson (2006), mientras que el porcentaje de severidad alta fue bajo en los dos incendios, 16.44% y 28.6% respectivamente. No obstante, es preciso mencionar que el incendio de 1989b afectó solo los límites altitudinales más bajos donde el bosque se traslapa con el chaparral, en tanto que el incendio del 2006 sí se propagó por el bosque.

Tomando en cuenta el hecho de que la severidad con la que se quemó el bosque en el 2006 fue moderada-baja según los resultados obtenidos, se esperaría conforme Montorio *et al.* (2014) que la superficie quemada estuviera cubierta por una progresiva carbonización y vegetación quemada puesto que la severidad fue media, mas no se esperaría el suelo cubierto por cenizas ni la combustión completa de los pinos como resultaría por una severidad alta, la caracterización de estas cubiertas es importante pues desempeñan un papel importante en los procesos edáficos y la regeneración del bosque.

Es importante hacer énfasis en que las imágenes satelitales limitan en cuanto a lo que no se puede ver debajo del dosel de los pinos, esto no permite hacer una descripción con mayor precisión, además como menciona Miller (2013) el valor de dNBR no siempre se correlaciona con el nivel de severidad, es decir, puede variar según las especies y la cobertura vegetal y ahí la importancia de acudir al sitio para mejorar la evaluación, no

obstante, al contrastar con las fotografías aéreas del INEGI se podría decir que la severidad dentro del bosque fue media.

La supervivencia de *P. coulteri* posterior a un incendio ha sido evaluada por algunos autores entre ellos Borchert *et al.* (2002) quienes comparan en sus modelos preliminares la supervivencia del *P. coulteri* contra la del *P. sabiniana* tres años después de un incendio ocurrido en California, Estados Unidos, dentro de sus resultados encontraron que la supervivencia de *P. coulteri* disminuye conforme aumenta la altura de la corteza del tronco carbonizada y las quemaduras en la copa, teniendo impacto en el dosel debido a que se dañan las yemas terminales de las agujas provocando que los pinos reduzcan su capacidad para reemplazar el follaje, mantener tejidos no fotosintéticos como las raíces y el cambium y además debilita sus defensas ante patógenos e insectos.

Comúnmente las áreas que se queman con severidad alta suelen registrar tasas de regeneración bajas a causa de que hay menos disponibilidad de semillas (Montorio *et al.*, 2014), con base en esto se esperaría que debido a la severidad moderada-baja con la que ocurrió el incendio, la mortalidad de pinos hubiera sido baja, sin embargo, al contrastar el polígono del bosque del 2006 con el polígono más reciente del 2017 es evidente la pérdida de un gran porcentaje de pinos adultos en la parte norte (Fig. 38) y es difícil conocer el estado de regeneración del bosque a partir de una interpretación visual.

Sin embargo, existe evidencia fotográfica (Fig. 41 y 42) de la regeneración en el bosque la cual se ha comprobado por parte de Rivera Huerta y colaboradores en el 2017 y 2018, quienes encontraron rebrotes de pinos a los que les estiman una edad de ocho años. Aunque a grandes rasgos contemplaron que el éxito de la regeneración para alrededor de

10 años después del incendio del 2006 no era del todo exitoso (Com. Pers. R. Huerta, 8 de junio 2021), tomando en cuenta que la severidad del incendio de ese año no fue alta.



Figura 41.- Brinzales de *P. coulteri* en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California. Foto: Hiram Rivera Huerta (2017).



Figura 42.- Brinzales de *P. coulteri* mezclados con vegetación de chaparral en Sierra Blanca, Ensenada, Baja California. Foto: Hiram Rivera Huerta (2017).

Se considera que posiblemente esos brinzales son resultado de la regeneración posterior al incendio del 2006, tomando en cuenta los resultados de Herranz *et al.* (1997) sobre regeneración post fuego con *Pinus halepensis*, estos autores encontraron que la regeneración inició dos años después del incendio en un periodo crucial, lo cual coincide conforme la estimación de ocho años de edad de los pinos en Sierra Blanca.

En un estudio realizado por Martijena (2003) sobre la sensibilidad a la precipitación mediante evidencia dendrocronológica de distintas especies de pino, entre ellas *P. coulteri*, tomadas en 1998 en Ensenada, Baja California, encontraron que el crecimiento de los pinos, en especial el de *P. coulteri* se ve favorecido por la precipitación invernal que deposita humedad en el suelo y tiene efecto en primavera-verano, incluso que tiene un efecto continuo hasta el año siguiente.

La poca regeneración del bosque después de casi 10 años hace reflexionar sobre la influencia del fuego sobre el bosque de *P. coulteri*, Vale (1979) menciona que la relación de los incendios forestales y *P. coulteri* en Monte del Diablo, California no es clara algunos autores citados por este autor consideran que la reproducción del pino se ve afectada ni mejorada por los incendios, otros en contraste proponen que las poblaciones del pino han aumentado con la supresión de incendios. Sin embargo, dentro de los resultados encontró que la supervivencia y reproducción de *P. coulteri* se ve mejorada por incendios de baja intensidad y que el comportamiento ecológico de este pino es distintas áreas donde se distribuye y presumiblemente se debe a las condiciones ambientales y especies asociadas, para el caso de este trabajo la regeneración tampoco es clara la falta de estudios en el sitio dificulta entender el comportamiento de la especie.

Borchert *et al.* (1985), encontraron que *P. coulteri* en Bosque Nacional Los Padres, California, Estados Unidos, la precipitación y condiciones del suelo inadecuadas de un sitio pueden retrasar el crecimiento de las plántulas, estipulando que el establecimiento de pinos se da en un periodo de aproximadamente 20 años, dentro del cual los pinos tardíos logren alcanzar su altura. Lo anterior lo concuerda con Vale (1979) quien refirió la regeneración exitosa de *P. coulteri* en un chaparral duró 19 años en Monte Diablo, California.

Debido a que la regeneración no ha sido del todo exitosa es preocupante el hecho de que otros incendios vuelvan a ocurrir en el sitio de estudios, pues como menciona Lloret *et al.*, (2004) los pinos suelen ser de las especie más afectadas por la recurrencia de incendios, ya que presentan un ciclo de vida y periodo pre-reproductivo muy largo, en su caso el banco de semillas se llena de nuevo solo hasta que las poblaciones sobreviviente al fuego alcancen su etapa reproductiva, la posibilidad de un incendio antes del restablecimiento del banco puede terminar con la vegetación.

Se piensa que algunas de las razones asociadas a la baja regeneración, además del impacto del fuego es la disminución de precipitación en la zona durante los últimos años, como se observa en los datos de la tabla VIII, lo anterior, es fundamental si se recuerda el que en los ecosistemas mediterráneos, el agua es un factor primordial para la regeneración (Lloret *et al.*, 2004).

Otras de las posibles razones vinculadas a la pobre regeneración del *P. coulteri* en Sierra Blanca es la posible falta de semillas en el suelo posterior al fuego, la probablemente a la debilitación del bosque por parte de plagas de insectos y/o patógenos

y posiblemente la escasez de agua por lluvia pudo haber dañado el rodal de pinos de Sierra Blanca, ya que la severidad media de los incendios de 1989b y 2006 no explica por completo la gran pérdida de hectáreas del bosque hasta la actualidad.

Por último, comparando la ortoimagen obtenida del INEGI de 1993 (Fig. 37), en contraste con la imagen más actual del bosque obtenida de Google Earth Pro (Fig. 38), permiten observar como el área de arbolado adulto se ha reducido en un porcentaje elevado de 1993 hasta la actualidad, tan solo tomando de referencia el área que quedaba en el 2006 de aproximadamente 100 ha, lo cual curiosamente coincide con el área de 100 ha que Minnich (1987) estimó para el bosque en ese año, y que en comparación con el área del 2017, se obtiene una disminución del 74.47%, es decir, en 11 años se perdió más de la mitad de pinos adultos en Sierra Blanca.

X CONCLUSIONES

La reconstrucción potencial de la historia del fuego en Sierra Blanca permitió, a grandes rasgos, observar su dinámica, además el uso de la percepción remota para estudio demostró ser una técnica útil y de bajo costo, con mayor cobertura espacial y rápida en comparación con el tiempo y esfuerzo que demanda el trabajo en campo, pensando que permite reconstruir la dinámica a la que ha estado sujeta el área.

En definitiva es difícil afirmar las razones sobre el comportamiento del bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca y las potenciales causas relacionadas a su regeneración post incendio. No obstante, al ser muy similar el ecosistema y condiciones climáticas con las de California en Estados Unidos pueden servir como referencia, aunque sin duda alguna la realización de más estudios sobre regeneración, tasas de crecimiento y reclutamiento mejoraría el conocimiento particular sobre la ecología del *P. coulteri* y su dinámica con el chaparral.

Por otro lado, sea a consecuencia de los incendios u otras variables no se puede negar que el área correspondiente a pinos adultos ha ido disminuyendo a través los años, la mayor disminución se observó después del 2006, presentando en la actualidad un bosque más reducido, lo cual es preocupante puesto que cada vez ese pequeño relicto es más frágil y es poco lo que se conoce en cuanto a su regeneración, aunado a la variabilidad climática futura resultado del cambio climático a nivel mundial y un incremento en las actividades turísticas y recreativas en el Valle de Guadalupe que atraen a algunos a visitar esta sierra con mayor frecuencia de lo que antes era visitada.

Por último, es importante conocer sobre la ecología de fuego de este pino para poder hacer frente a problemáticas futuras, además darle seguimiento a su potencial conservación pues existe evidencia de la variabilidad genética en el germoplasma de estos rodales de pino en comparación con otros rodales ubicados en otros sitios del estado, también es primordial que tanto científicos como la sociedad reconozcan al fuego no solo como un desastre natural sino como eventos naturales bajo un régimen que se repite con el tiempo y que puede ocasionar la destrucción en los ecosistemas, pero que también pueden ser esencial y ventajoso para los ecosistemas y su uso junto con la supresión permitirán conservar los bosques y distintos tipos de vegetación presentes en Baja California.

El desconocimiento del régimen de fuego de un ecosistema puede llevar a la toma de decisiones erróneas o poco beneficiosas para el bosque que resulten por ejemplo en incendios destructivos a causa de acumulación de combustibles, así mismo, el dejar de lado el impacto que tienen los incendios recurrentes en el sitio hace que no se le dé importancia tampoco a la disminución de la biodiversidad de especies, pues no se les permite llegar a su maduración y por ende generar semillas para su futura regeneración.

LITERATURA CITADA

- Agee, J.K. 1993. *Fire ecology of Pacific Northwest forests*. Island Press, Washington, D.C. USA. 19, 30 pp.
- Arellano, S., Vega, J.A., Rodríguez, F., Fernández, C., Vega, D.J., Álvarez, J.G. y Ruiz, A.D. 2017. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección* 2017(49):49. Recuperado de: [10.4995/raet.2017.7137](https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137)
- Arellano, A. 2013. *Variación morfológica y anatómica Pinus Coulteri D. Don de acículas en poblaciones naturales de Baja California*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1060/62690s.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arrieta, K.F. 2020. *Análisis de la variación de temperatura y precipitación y su efecto en la fenología del aguacate, en dos zonas productoras de Morelos*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Recuperado de: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1495/AIAKGR01T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Base de Datos del CLICOM del Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Baja California. (S/f). Obtenido de Base de Datos del CLICOM: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Borchert, M. 1985. Serotiny and cone-habit variation in populations of *Pinus coulteri* (Pinaceae) in the Southern Coast Ranges of California. *Madroño* 32 (1):28-48. Recuperado de: <https://www.jstor.org/stable/41424514>

- Borchert, M., Johnson, M., Schreiner, D.S. & Vander Wall, S.B. 2003. Early postfire seed dispersal, seedling establishment and seedling mortality of *Pinus coulteri* (D. Don) in Central Coastal California, USA. *Plant Ecology* 168:207–220. Recuperado de: [10.1023/A:1024447811238](https://doi.org/10.1023/A:1024447811238)
- Borchert, M., Schreiner, D., Knowl, T. & Plumb, T. 2002. Predicting postfire survival in Coulter Pine (*Pinus coulteri*) and Gray Pine (*Pinus sabiniana*) after wildfire in Central California. *Western Journal of Applied Forestry* 17 (3):134-138. Recuperado de: [10.1093/wjaf/17.3.134](https://doi.org/10.1093/wjaf/17.3.134)
- Borini, D., Montorio, R., Pérez, F. y Vlassova, L. 2016. Fusión de imágenes Terra-Modis y Landsat-tm/oli en el contexto del análisis del incendio forestal de Las Hurdes (Cáceres). *GeoFocus*, 18:65-81. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.21138/GF.467>
- Campos, R.T. 2010. *Variación en los caracteres de serotinia entre poblaciones de Pinus oocarpa en la región central de México*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional autónoma de México. Recuperado de: https://repositorio.unam.mx/contenidos/variacion-en-los-caracteres-de-serotinia-entre-poblaciones-de-pinus-oocarpa-en-la-region-central-de-mexico-161051?c=rwnYop&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0
- Castillo, M.A. 2002. *Los sistemas de información geográfica y los recursos naturales*. Percepción Remota. Recuperado de: https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1192/1/100000035127_documento.pdf.
- Catuna, N. 1995. La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. *Cuadernos de Geografía*, V, (2):87. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/70766/pdf>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2021. ¿Por qué ocurren los incendios forestales? Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/por-que-ocurren-los-incendios-forestales?idiom=es>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. S/f. Incendios Forestales. Obtenido de: <https://www.uaem.mx/sites/default/files/que-es-un-incendios-forestalpdfShQAu9q8F6.pdf>

Chardon, N.I., Cornwell, W.K., Flint, L.E., Flint, A.L. & Ackerly, D.D. 2014. Topographic, latitudinal and climatic distribution of *Pinus coulteri*: geographic range limits are not at the edge of the climate envelope. *Ecography* 38:590–601. Obtenido de Online Library Wiley: <http://www.ecography.org/appendix/ecog-00780>

Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F.M & Martin, P. 2006. Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research*, 112:1-15. G04S09. Recuperado de: <https://doi.org/10.1029/2005JG000143>

Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación. 1976. Carta Geológica Francisco Zarco I11D82. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/#Descargas>

Comisión Nacional Forestal. 2010. Incendios forestales Guía práctica para comunicadores. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>

Comisión Nacional Forestal. 2014. *Hoja Verde. El hacedor de viudas*. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=656>

- Comisión Nacional Forestal. 2019. Territorio kumiai, guardián de un bosque relictos en Baja California. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/territorio-kumiai-guardian-de-un-bosque-relictos-en-baja-california?idiom=es>
- Comisión Nacional Forestal. 2021. Reporte semana de incendios 2021. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conafor/es/documentos/reporte-semanal-de-incendios>
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P, Jiménez, J. C, Soria, G., Sobrino, J. A. y Moreno, J. 2017. Potencialidad de índices de severidad de incendios utilizando Sentinel2 y su análisis comparativo con Landsat8 en el Sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) en 2017. Obtenido de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/articulo_aet17_incendiosargentina-inta.pdf
- Delgadillo, R. J. y Camacho, L.C. 2004. *Pinus coulteri*. Actualización de las especies de plantas incluidas en la NOM-059-ECOL-2000. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/ise/fichasnom/Pinuscoulteri00.pdf>
- Escuela Nacional Colegio de Ciencias y humanidades. 2017. Biomas. Recuperado de Portal Académico del CCH: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/unidad2/estructuraEcosistema/biomas>
- Fernández, I.A. y Herrero, E. 2001. El satélite Landsat Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Universidad de Valladolid. Recuperado de: <https://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf>
- Fernández, I.M. 2013. *Variación morfológica de conos y semillas en cinco poblaciones de Pinus coulteri D. Don, en Baja California, México*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antón Navarro. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1064>

- García, V.J. 2012. *Indicadores Reproductivos de Conos y Semillas de Poblaciones Naturales de Pinus coulteri D. Don en Baja California*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1026/62168s.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gernandt, D.S. y Pérez de la Rosa, J.S. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85:126-133. Recuperado de: [10.7550/RMB.32195](http://dx.doi.org/10.7550/RMB.32195)
- González, C.E., Garcillán, P.P., Ezcurra, E. y Grupo de Trabajo de Ecorregiones. 2010. Ecorregiones de la Península de Baja California: una Síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 87:69-82. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282010000200006
- Hernández, J.H. 2011. Procesamiento Digital de Imágenes. Actualización en capítulo "percepción remota", p.4. En: *Manejo y Conservación de Recursos Forestales* 2007.
- Herranz, J.M., Martínez, J.J., Marín, A. y Ferrandis, P. 1997. Postfire regeneration of *Pinus halepensis* Miller in a semi-arid area in Albacete province (southeastern Spain). *Ecoscience* 4(1):86-90. Recuperado de: [10.1080/11956860.1997.11682381](http://dx.doi.org/10.1080/11956860.1997.11682381)
- Hessburg, P.F., Miller, C.L., Parks, S.A., Povak, N.A., Taylor, A.H., Higuera, P.E., Prichard, S.J., North, M.P., Collins, B.M., Hurteau, M.D., Larson, A.J., Allen, C.D., Stephens, S.L., Rivera, H., Stevens, C.S., Daniels, L.D., Gedalof, Z., Gray, R.W., Kane, V.R., Churchill, D.J., Hagmann, R.K., Spies, T.A., Cansler, C.A., Belote, R.T., Veblen, T.T., Battaglia, M.A., Hoffman, C., Skinner, C.N., Safford, H.D. & Salter, R.B. 2019. Climate, environment, and disturbance history govern resilience

- of western North American forests. *Frontier in Ecology and Evolution*. 7:239.
 Recuperado de: <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00239>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2007. *Capítulo VI Descripción de la vegetación*. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/451/cap6.html>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2019. *Efectos del Cambio Climático*.
 Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2007. *Capítulo VI Fitogeografía*.
 Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/451/cap4.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1993 *Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2005. *Guía para la Interpretación de la Carta Climatológica*. ISBN 970-13-4508-8. Pp. 8. Aguascalientes, México
- Key, C.H. & Benson, N. 2006. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio: In Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, N.C., Benson, S., Sutherland, S. & Gangi, L.J. (Ed.). *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.
- Kral, R. 1993. *Pinus coulteri* / Coulter pine. *American Conifer Society*. Recuperado de: <https://conifersociety.org/conifers/pinus-coulteri/>
- Lloret, F. 2004. Régimen de incendios y regeneración. En F. Valladares (ed.) Capítulo 4, *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. 101-126 pp. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

- Los Padres Forest Watch. 2013. *Coulter pine*. Recuperado de: <https://lpfw.org/es/our-region/wildlife/coulter-pine/>
- Manzo, L. y Meave, J.A. 2003. La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota. *Revista Ciencia*. 54 (3). Recuperado de: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/54_3/vegetacion_vista_espacio.pdf
- Martijena, N.E. 2003. El Niño-Southern Oscillation and precipitation history in Baja California: reconstruction using tree ring records. *Geofísica Internacional*. 42 (3):351-362. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842307>
- Martín, R.C., Santos, L., Tonnabel, J., Callejas, M., Notivol, E., Chambel, M.R, San Martín, R. y Climent, J. 2017. *Serotinia, carácter adaptativo clave en pino carrasco: influencia de factores endógenos y exógenos*. 7º Congreso Forestal Español. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/318672693_Serotinia_caracter_adaptativo_clave_en_pino_carrasco_influencia_de_factores_endogenos_y_exogenos
- Martínez, R. y Solís, G.A. 2017. Caracterización espectral y detección de flecha seca en Palma Africana en Puntarenas, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61):349-377. Recuperado de: <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.13>
- Miller, J. 2013. *National Fire Severity Mapping Programs Overview*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Region.
- Minnich, R.A. 1987. The distribution of forest trees in northern Baja California, Mexico. *Madroño*, 34(2):98-127.
- Montorio, R., Pérez, F., García, A., Vlassova, L. y De la Riva, J. 2014. *La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales*. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje*. ISBN 978-84-617-3212-8, págs. 427-440. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4854191>

- Morrone, J.J. 2005. Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 76(2). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532005000200006
- Muñoz, P. 2013. *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Biblioteca digital del Centro de Información de Recursos Naturales. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indic es%20de%20vegetaci%C3%B3n%2C%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Myers, R.L. 2016. *Convivir con el fuego: manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego*. The Nature Conservancy, Iniciativa Global para el Manejo del Fuego. Pp. 3, 8. Recuperado de: https://www.conservationgateway.org/Documents/el_manejo_integral_del_fuego.pdf
- Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica. S/f. El Niño Southern Oscillation (ENSO). Recuperado de: <https://psl.noaa.gov/enso>
- Pausas, J.G. 2012. *Incendios Forestales una visión desde la Ecología*. Ed. CSIC. Pp. 5. Recuperado de: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=i1jZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=tipos+de+incendios+forestales&ots=0KNzP-wTBB&sig=KwyKqH9Dpi8IprewbPp0vKRZlY#v=onepage&q=tipos%20de%20incendios%20forestales&f=false>
- Pérez, L. 2014. *Identificación de vegetación en imágenes satelitales*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/18056>
- Pérez, F. y De La Riva, J. 1998. El empleo de las imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el Prepirineo Occidental Oscence.

Geographicalia 36:131-146.

Recuperado

de:

[10.26754/ojs_geoph/geoph.1998361684](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1998361684)

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2020. *Importancia de los ecosistemas forestales: especies de los bosques y selvas*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/importancia-de-los-ecosistemas-forestales-especies-de-los-bosques-y-selvas?idiom=es>

Rivera, H., Safford, H.D. & Miller, J.D. 2016. Patterns and trends in burned area and fire severity from 1984 to 2010 in the Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México. *Fire Ecology*. 12:65-72. Recuperado de: <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.4996/fireecology.1201052>

Rodríguez, D.A. 2014. *Incendios de vegetación su ecología manejo e historia*. Biblioteca Básica de Agricultura. Guadalajara, Jalisco, México. Pp. 22,110, 114,115, 469.

Rzedowski, J. 2006. Bosque de coníferas; Capítulo 17 en: *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Recuperado de: https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Co nt.pdf

Rzedowski, J. 2006. Provincias Florísticas de México; Capítulo 6: *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Recuperado de: https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Co nt.pdf

Salas, R., Moreno, A., Rentería, M., Delgado, P., Jardón, L.O. y Piñero, D. 2002. Pinos mexicanos: Record que merece respeto. *Especies*. 6/02: pp. 19-24. (18). Recuperado de: http://naturalia.org.mx/publicaciones/PinosMexicanos.pdf?fbclid=IwAR3--eWBcFyIv0Hv2yKRV2vYmBEPE39fv7hOvOy3W_ucNIqN5ihtxMSHJM8

- Sánchez, A. 2007. Una visión actual de diversidad y distribución de los pinos mexicanos. *Madera y Bosques*. 14(1). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712008000100008
- Sánchez, A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*. 14(1). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712008000100008
- Secretaria de Marina. 2009. Percepción remota. Recuperado de: <http://2006-2012.semarnat.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2018. *Ante el fenómeno de la Niña, hay que prevenir incendios forestales*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ante-el-fenomeno-de-la-nina-hay-que-prevenir-incendios-forestales>
- Secretaria de Protección al Ambiente Gobierno del Estado de Baja California. 2006. *Programa de ordenamiento ecológico del corredor de San Antonio de las Minas, Valle de Guadalupe*. Recuperado de: <http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2018/04/%C3%8DNDICE-POE-VG-2006.pdf>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos. S/f. Landsat Missions. Recuperado de: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- Sobrino, R. 2014. *Aplicación de la teledetección y modelos de regresión en la caracterización del lago de Sanabria*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:grado-Ciencias-CAmb-Rsobrino/Sobrino_Navas_Raquel_TFG.pdf

- Stephens, S.L., Skinner, C.N. & Gill, S.J. 2003. Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine - mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, México. *Canadian Journal of Forest Research*. 33(6). Recuperado de: <https://doi.org/10.1139/x03-031>
- Vale, T.R. 1979. *Pinus Coulteri* and wildfire on Mount Diablo, California. *Madroño*. 26(3):135-140. Recuperado de: https://www.jstor.org/stable/41424217?seq=1#metadata_info_tab_contents
- Vargas, C. 2016. Imágenes de satélite en la exploración Geológica-Minera. RS-GEOIMAGE. Recuperado de: <http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/EXPLORACION-GEOLOGICA-MINERA.pdf>.
- Vera, L.A. 2020. *Monitoreo de recuperación del bosque de ciprés de Isla Guadalupe, por medio del modelado de estructura del dosel, su impacto en la erosión y la hidrología superficial*. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California. Recuperado de: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3209>
- Villegas, H. 2008. *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes)*. Instituto Colombiano de Geología y Minerías Igeominas. Recuperado de: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>
- Villers, L. y Hernández, J. (S/f). Incendios forestales y la variabilidad climática en México. Recuperado de: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx>
- Zobel, B. 1953. Geographic range and intraspecific variation of Coulter Pine. *Madroño*. 12(1):1-7. Recuperado de: https://www.jstor.org/stable/41422766?read-now=1&refreqid=excelsior%3A3485caf2d76cdea4fc0f8d3c02547194&seq=1#page_scan_tab_contents

FUENTES DE LAS IMÁGENES

Anónimo. [Geoinformación] (2020). Qué es el índice de quemas - NBR (Normalized Burn Ratio) - Landsat - Sentinel-2. [Video]. Obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?v=bV1o85dfIuI&t=2s>

Asociación Española de Laboratorios de Fuego. S/f. El triángulo del fuego. Recuperado de: <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>

Elbert, L., Little, Jr. 1971. Natural distribution map for *Pinus coulteri*. . Department of Agriculture, Forest Service & others. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Pinus_coulteri#/media/Archivo:Pinus_coulteri_range_map_1.png

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. S /F. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V. Recuperado de: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/vegetacion/chaparral.aspx?tema=T>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. S /F. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V. Recuperado de: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/vegetacion/bc.aspx?tema=T>

León de la Luz, J.A., Rebman, J.P., Van, T. R., Sánchez, J.J., Delgadillo, J. y Medel, A. 2018. El conocimiento florístico actual del Noroeste de México: desarrollo, recuento y análisis del endemismo. Recuperado de: <https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/view/1885/>

Quirós, E. 2015. Introducciones a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Universidad de Extremadura. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/272090105_Introduccion_a_la_Fotogrametria_y_Cartografia_aplicadas_a_la_Ingenieria_Civil

Sebastián, M., Palomo, M., Rincón, J., Ormeño, S. y Vicent, J. 2013. Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multiespectrales. Ensayos en la

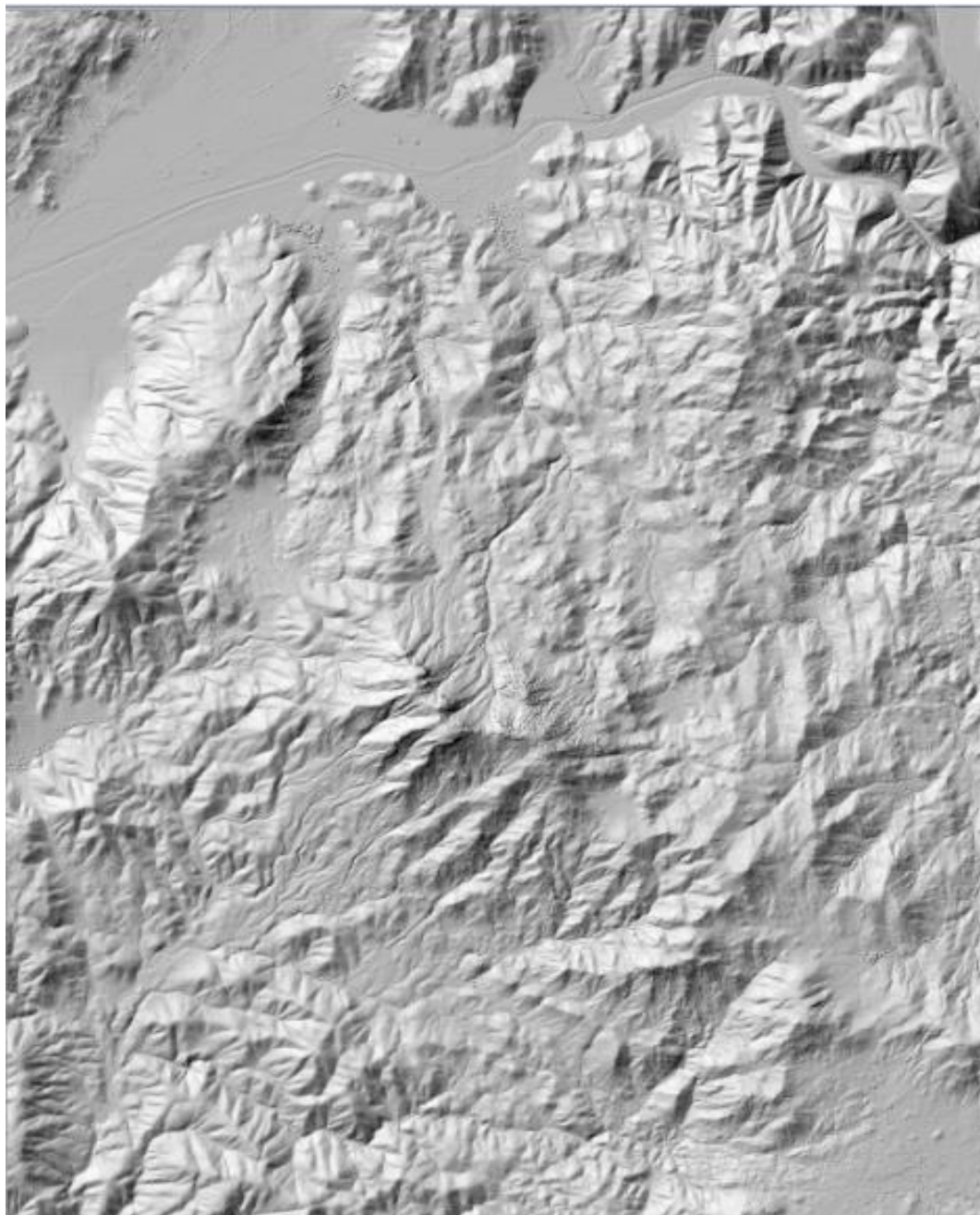
cueva del tío Garroso (Alacón, Teruel). En Ministerio de Educación Cultura y Deporte, Subdirección General de Documentación y Publicaciones (Ed.). *La Ciencia y el Arte IV. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. 279-287 pp. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=705381>

Strieby. M. 2018. Coulter pine. Recuperado de: https://www.conifers.org/pi/Pinus_coulteri.php

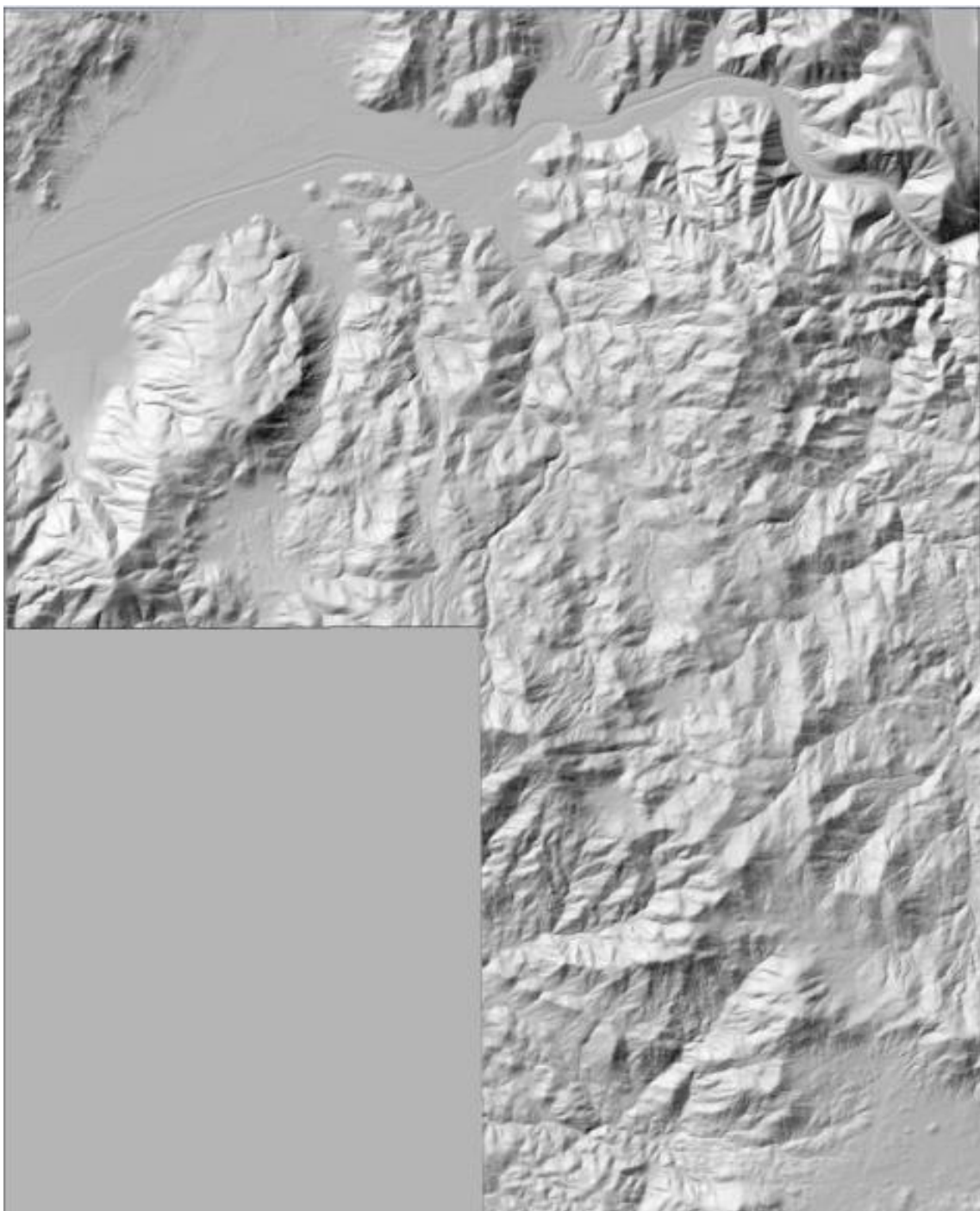
Universidad Nacional de Quilmes Virtual. S/f. Principios básicos de la teledetección. Recuperado de: <https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-1.html>

Webinar annual 2018 Understanding & using MTBS data. 2018. Recuperado de: <https://usfs.adobeconnect.com/p673lr558o2g/>

ANEXOS



Anexo 1.- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5 m. Superficie a partir de los archivos (ASCII. I11D82E1, I11D82E2. I11D82E3 y I11D82E4).



Anexo 2.- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5 m. Terreno a partir de los archivos (I11D82E1, I11D82E2 y I11D82E4). Fuente: INEGI.
<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>

Año del incendio	Imágenes satelitales	
	Imagen previa al incendio (Bandas 3, 4 y 7)	Imagen posterior al incendio (Bandas 3, 4 y 7)
1984	LT05_L1TP_039038_19840413_20161004_01_T1	LT05_L1TP_039038_19840531_20161004_01_T1
1987 a y b	LT05_L1TP_039038_19870828_20161002_01_T1	LT05_L1TP_039038_19871015_20161003_01_T1
1989 a y b	LT05_L1TP_039038_19890427_20161002_01_T1	LT05_L1TP_039038_19890529_20161002_01_T1
1990	LT05_L1TP_039038_19900820_20160930_01_T1	LT05_L1TP_039038_19901023_20160930_01_T1
1997	LT05_L1TP_039038_19970620_20160924_01_T1	LT05_L1TP_039038_19970823_20160923_01_T1
2006	LT05_L1TP_040038_20060706_20161120_01_T1	LT05_L1TP_040038_20060807_20161119_01_T1

Anexo 3.- Imágenes satelitales seleccionada para incendio. Fuente: Base de datos del USGC.

Año	Precipitación promedio anual (mm)	Temperatura máxima °C
1983	555 mm	24.5°C
1984	143 mm	25.6°C
1989 (a), (b)	59 mm	27.2°C
1990	183 mm	25.8°C
1997	282 mm	25.5°C
2006	138 mm	26.4°C
2007	134 mm	25.8°C
2008	207 mm	26.8°C
2009	117 mm	26.0°C
2010	477 mm	24.4°C
2011	321 mm	25.1°C
2012	169 mm	27.2°C

Anexo 4.- Registros de climatología de enero de 1969 a octubre de 2012: precipitación promedio anual y la temperatura máxima obtenidos de la estación meteorológica Rancho Agua Caliente (estación más cercana al Bosque de *P. coulteri* en Sierra Blanca, Ensenada, México). Longitud: -116.5, Latitud: 32.1, Elevación: 400.0 m. Fuente: Base de Datos del CLICOM CICESE, (s/f).