

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación
Geociencias Ambientales**

**Distribución de incendios y recuperación de matorrales
en el noroeste de Baja California**

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Estrella de Isis Aguilar Zavaleta

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Estrella de Isis Aguilar Zavaleta

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Stephen Holmes Bullock
Runquist
Co-director

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Co-director

Dra. Olga Sarychikhina

Dr. Horacio de la Cueva Salcedo



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Estrella de Isis Aguilar Zavaleta** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Distribución de incendios y recuperación de matorrales en el noroeste de Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist

Co-Director de tesis

M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Co-Director de tesis

En el Noroeste de Baja California los incendios disminuyen la cobertura vegetal afectando los servicios que provee el matorral: control de la erosión, del escurrimiento acelerado y del albedo. Estudiamos, mediante métodos de percepción remota, la distribución de incendios y la regeneración post incendio. Se evalúa el efecto de características del terreno como elevación, aspecto, pendiente y sustrato, así como el vigor de la vegetación pre-incendio y su carácter estacional. Se escogieron aleatoriamente 984 sitios de 0.0625 km² en una región de 25035 km²; se utilizaron datos de “verdor” (NDVI) de los años 2000 a 2014, complementados por datos de campo de CONAFOR, por datos de percepción remota de puntos de calor y por un índice de cambio de combustible. La evidencia sostiene que variaciones en las características del terreno no afectaron la probabilidad de incendio de la vegetación en ese periodo. El NDVI estuvo directamente relacionado con la precipitación en la temporada anterior, pero en la mayoría de los casos de supuestos incendios, mostró poca disminución al próximo abril. La recuperación fue afectada a corto plazo por la precipitación del primer invierno, pero también de manera persistente por el vigor de la vegetación en abril anteriores. Excepto la elevación, ninguna otra característica del terreno afectó la regeneración en cuanto al vigor en agosto. Aunque NDVI no describe la estatura o cobertura de los arbustos, nuestros resultados sugieren que la cobertura del suelo típicamente se recupera en menos de cinco años. Se notaron problemas de correspondencia espacial entre los datos de CONAFOR y la percepción remota de incendios de la plataforma MODIS. Las diferencias entre ambos puede haber afectado el estudio. El cociente de quema normalizado (NBR) se mostró capaz de delimitar áreas quemadas, pero no las fechas de muestreo están sujetas a la disponibilidad de imágenes sin nubes.

Palabras clave: cobertura del suelo, factores del terreno, variación climática, matorral mediterráneo, desertificación, percepción remota.

Abstract of the thesis presented by **Estrella de Isis Aguilar Zavaleta** as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences

Distribution of wildfires and recovery of shrublands in northwestern Baja California

Abstract approved by:

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist

Co-Director

M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Co-Director

The shrublands that dominate northwestern Baja California provide services such as reduction of erosion, of runoff and of albedo. These services are affected by fires which reduce vegetation cover. This study focuses on the distribution of brush fires and the post-fire regeneration as seen by remote perception. Possible effects of terrain are evaluated (particularly elevation, slope, aspect, substrate and flow accumulation) as well as the prior status of the vegetation, and recent precipitation. The study was based principally on 984 random sites of 0.0625 km² and data on “greenness” (NDVI, from the MODIS satellite) from 2000 to 2014, complemented by field data from CONAFOR, by MODIS data on hot points (FIRMS product) and by an index of change in combustible matter, based on LANDSAT data. The analyses did not reject a random distribution of fires with respect to terrain characteristics and only elevation showed some effect on recovery of August NDVI. NDVI was directly related to precipitation in the previous winter at all sites. For most of the fires there was not a great reduction of April NDVI prior to the fire in the following year. Nonetheless, recovery in the first three years was less for fires followed by a dry winter than for those followed by a relatively wet winter. NDVI does not index shrub stature or cover, but our results suggest that ground cover is usually recovered in less than five years. The spatial correspondence of FIRMS and CONAFOR burn localities could not be easily established and both types of data need improved specificity. The NBR index of change in combustible material is better for delimiting burn areas but does not permit measurement of vegetation properties at uniform dates.

Key words: ground cover, fire, terrain factors, climatic variation, mediterranean shrubland, desertification, remote perception.

Dedicatoria

A mis padres

Que siempre han creído en mí y me han impulsado a seguir adelante, a crecer y a volar.

A mi hermano

Mi primer amigo y el mejor, quien no sólo creció conmigo sino que me ayudó a crecer.

A Gabriel

Mi hogar.

Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por la oportunidad de estudiar en el programa de Ciencias de la Tierra.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme una beca para mis estudios de maestría.

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), por la información brindada para el desarrollo de esta tesis.

A mi comité de tesis, formado por el Dr. Stephen H. Bullock Runquist, M.C. Alejandro Hinojosa Corona, Dra. Olga Sarychikhina y el Dr. Horacio de la Cueva Salcedo, les agradezco su orientación e interés a lo largo de este trabajo.

Agradezco al Dr. Stephen Bullock, por compartirme sus conocimientos y contagiarme de su energía, por su apoyo, su orientación y su infinita paciencia.

A los compañeros de la UDB, por recibirme tan fraternalmente en su edificio.

A mis padres, por todo el apoyo que me han brindado. Por estar siempre presentes y compartir conmigo cada experiencia.

A mi hermano, que pesar de la distancia siempre está conmigo dándome ánimos.

A Gabriel, por su apoyo y comprensión, por hacer mi vida más feliz.

A mis compañeros y amigos, Claudia, Daniela, Gerardo, Gretel, Víctor Hugo, Karen, Manuel, Marianggy, Omar, Saúl, Sergio, Yorfrank y muchos más, gracias por la ayuda, por las risas, por las porras, por todo.

A Lula y a Bailey, mis eternos compañeros, por estar siempre conmigo en mis idas y vueltas.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Perturbación de servicios del ecosistema.....	1
1.2. Antecedentes.....	5
1.2.1. Índices de vegetación.....	8
1.2.1.1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	9
1.2.2. NBR (Normalized Burn Ratio).....	11
1.2.3. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).....	12
1.2.3.1. FIRMS (Fire Information for Resource Management System)	12
1.2.3.2. MOD13Q1.....	14
1.3. Justificación.....	14
1.4. Hipótesis.....	15
1.5. Objetivos.....	15
1.5.1. Objetivo general.....	15
1.5.2. Objetivos específicos.....	15
Capítulo 2. Metodología	17
2.1. Área de estudio	17
2.1.1. Topografía y geología.....	18
2.2. Datos del terreno.....	18
2.3. Sitios de muestreo.....	23
2.4. Análisis de NDVI	25
2.5. Percepción remota de incendios activos.....	26
2.6. Registro de incendios de CONAFOR.....	27

2.7. Detección y análisis de cicatrices de incendios.....	28
2.8. Análisis estadístico	31
Capítulo 3. Resultados	32
3.1. Patrones generales de los incendios.....	32
3.1.1. Superficie quemada y número de incendios por año.....	32
3.1.2. Estacionalidad.....	33
3.1.3. Tamaño de quemas individuales.....	34
3.2. Distribución de incendios	35
3.2.1. Distribución geográfica.....	35
3.2.2. Distribución en relación con el terreno.....	38
3.3. Estimación de la vegetación.....	42
3.3.1. variación temporal de NDVI.....	42
3.3.2. NDVI en general y por sitios quemados.....	44
3.4. Recuperación de incendios.....	45
3.4.1. En relación a la precipitación posterior	45
3.4.2. En relación al terreno y NDVI anterior.....	47
3.4.3. En cicatrices particulares.....	48
Capítulo 4. Discusión	52
4.1. Los siniestros y el ecosistema.....	52
4.2 Problemas de localización.....	54
4.3 Recomendaciones.....	56
Capítulo 5. Conclusiones	58
Literatura citada	60

Lista de Figuras

Figura	Página
1 Fotografías.....	2
2 Mapa de la delimitación de la región de estudio,	17
3 Mapa de la orientación de laderas, en grados.....	19
4 Mapa de la elevación, en metros s.n.m.....	20
5 Mapa de la pendiente, en grados.....	20
6 Mapa de tipos de cobertura o uso del suelo (basado en INEGI) con reducción de sus 24 categorías.....	22
6 Mapa de las estaciones climatológicas utilizadas,	23
7 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo en la zona de estudio...	24
8 Ejemplo de la huella de la imagen MODIS correspondiente al área de estudio mostrando NDVI para el abril de 2003.....	25
9 Frecuencias de niveles de NDVI entre todos los sitios, meses y años. Para comparación, se indican valores de NDVI para sitios con condiciones especiales, suelo desnudo (relleno sanitario de Ensenada) y vegetación malacofila uniforme (cultivo de vid).....	26
10 Modelo para detectar las cicatrices de incendio por el cociente de quema normalizado (NBR).....	30
11 Superficie quemada por año en ha (registros CONAFOR de incendios afectando matorral), en número de puntos de calor (registro FIRMS) y número de sitios aleatorios quemados (según FIRMS).....	32
12 Promedio por mes, para los años 2000 a 2014, de la superficie quemada en ha (registro CONAFOR de incendios afectando matorral), en número de puntos de calor (registro FIRMS) y número de sitios quemados (según FIRMS).....	33
13 Porcentaje de incendios por categorías de superficie (ha) de incendios individuales, según registro de CONAFOR para eventos afectando matorral.....	34

14	Mapa de distribución de los puntos de calor de FIRMS en la zona de estudio. A-O) Cada año 2000 a 2014. P) Mapa acumulativa de los puntos de calor de 2000 a 2014.....	36
15	Frecuencia de sitios no quemados y quemados de 2000 a 2014 según categorías de la elevación del sitio.....	39
16	Frecuencia de sitios no quemados y quemados de 2000 a 2014 según categorías de la orientación del sitio.....	39
17	Frecuencia de sitios no quemados y quemados de 2000 a 2014 según categorías de la pendiente del sitio.....	40
18	Frecuencia de sitios no quemados y quemados de 2000 a 2014 según categorías de la acumulación de flujo del sitio.....	41
19	Frecuencia de sitios no quemados y quemados de 2000 a 2014 según categorías geológicas de sustrato.....	42
20	Series de tiempo del NDVI promedio entre sitios no quemados de 2000 a 2014, en abril y agosto, y de la precipitación total invernal (noviembre a abril) promedio de 12 estaciones.....	43
21	Relación entre NDVI promedio de sitios no quemados y precipitación regionalizada del invierno previo, para NDVI de abril y de agosto. Cada punto es el dato de un año.....	44
22	Porcentaje de sitios por categorías de NDVI, en abril en el año de quemarse y el promedio de abril 2000 a 2014 para sitios que no se quemaron.....	45
23	Series de tiempo de NDVI promedio para abril y agosto, para sitios que se quemaron, con datos ordenados por el número de años pre o post incendio, no por años calendario. Se separan los incendios en dos grupos, según la precipitación en el invierno siguiente al incendio fue mayor o menor que la precipitación promedio.....	47
24	Ejemplos de las imágenes pre-incendio, post-incendio y del Δ NBR calculado por diferencia entre NBR pre y post incendio, aplicando ArcGis a la delimitación de las cicatrices.....	49
25	Frecuencia de niveles de NDVI en imágenes Landsat 8 (A y B), Landsat 7 (C) y Landsat 5 (D), en las áreas de los cuatro incendios focales, pre incendio (verde claro) y post incendio (verde oscuro) del incendio en el área quemada y en un buffer alrededor.....	50

26 Series de tiempo del promedio de NDVI (MODIS) en abril y agosto, años antes y después del incendio en los sitios focales. El marcador indica el año del incendio..... 51

Apéndices

- A. Archivo electrónico de la delimitación de la región de estudio
- B. Archivo electrónico de los 984 sitios, incluyendo sus coordenadas, características físicas y valores de NDVI para todo el periodo del estudio
- C. Archivo electrónico de los datos de FIRMS para el periodo de estudio, incluyendo todos los puntos reportados en la región delimitada de estudio, con sus coordenadas, fechas y valores del índice.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Perturbación de servicios del ecosistema

La cobertura vegetal del suelo modula las interacciones físicas del suelo con la atmósfera y la insolación, con consecuencias importantes para la humanidad. Entre los “servicios del ecosistema” (Millenium Ecosystem Assessment. 2005, Carpenter et al. 2009) que provee la vegetación en relación a su cobertura del suelo son la disminución de la erosión del suelo por agua (Rice et al. 1969, Branson 1975, Wells 1987, González Botello & Bullock 2012) y por viento (Okin 2008), la disminución de la razón entre escurrimiento superficial e infiltración de la lluvia (Rice 1973, Knight et al. 1984) y la disminución del albedo y del flujo de calor sensible a la atmósfera (Pielke et al. 2002). Los efectos sobre la disposición de la insolación conllevan efectos en el ciclo hidrológico y en el clima (Pitman et al. 2004). La modulación de estos servicios está sujeta a las variaciones naturales y antropogénicas de la misma cobertura vegetal. Un factor importante en esas variaciones es la quema de la vegetación, suceso de diversa naturaleza pero de importancia tanto global como en la propia regional (Figura 1).

Los incendios naturales y antropogénicos son fenómenos notorios en matorrales de la bio-región californiana, pero se han considerado perturbaciones y no catástrofes para el ecosistema. Se ha mostrado que muchas especies vegetales están adaptadas a los incendios, incluyendo sus mecanismos de germinación y rebrote (Brandege 1891, Cooper 1922, Zedler 1982, Keeley 1991). El chaparral y matorral costero presentan procesos de recuperación bien definidos después del fuego (Keeley & Keeley 1981, 1984) aunque no con mecanismos uniformes entre todas las especies (Angoa-Román et al. 2005). En el paradigma clásico, durante los primeros años, la cobertura por herbáceas nativas es alta mientras los arbustos se reestablecen a partir de plántulas o brotes de las estructuras subterráneas, aumentando su cobertura durante dos o más décadas (Horton & Kraebel 1955, Hanes 1971).

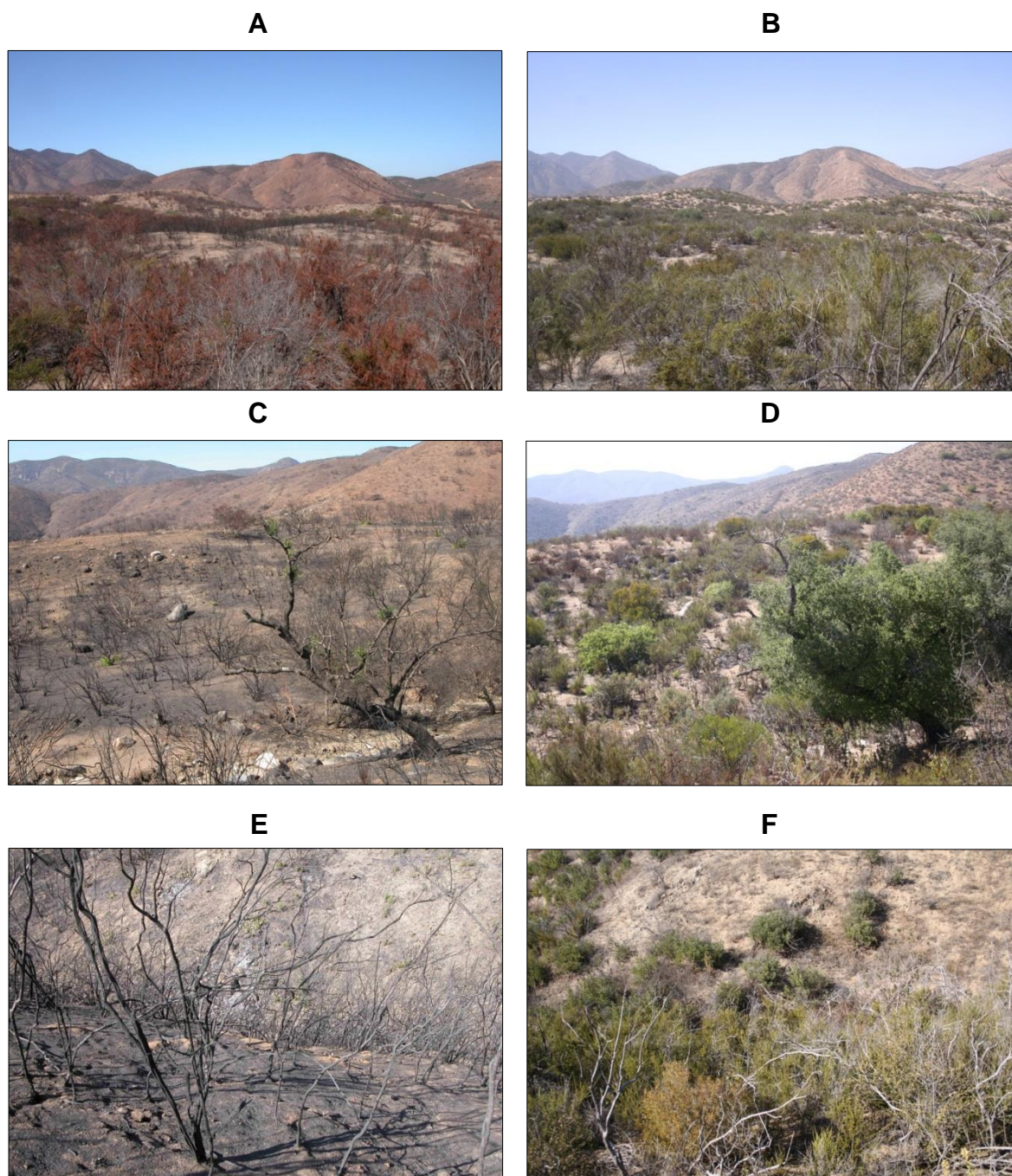


Figura 1. A-F. Incendio de octubre 2005, fotografiado 26 octubre 2005 y 11 octubre 2016. A-B: Chaparral de *Adenostoma fasciculatum*, con zonas muy quemadas y otras chamuscadas (coordenadas 31.86327 N, 116.37180 O). C-D: Laderas y un riachuelo seco, con *Quercus agrifolia* y diversos arbustos (*Adenostoma fasciculatum*, *Ornithostaphylos oppositifolia*, *Malsoma laurina*, *Eriogonum fasciculatum*, *Artemisia californica*) (coordenadas 31.86987 N, 116.37646 O). E-F: Vista de laderas expuestas al Sur y Norte, contrastantes en su vegetación y recuperación (coordenadas 31.88161 N, 116.38461 O).

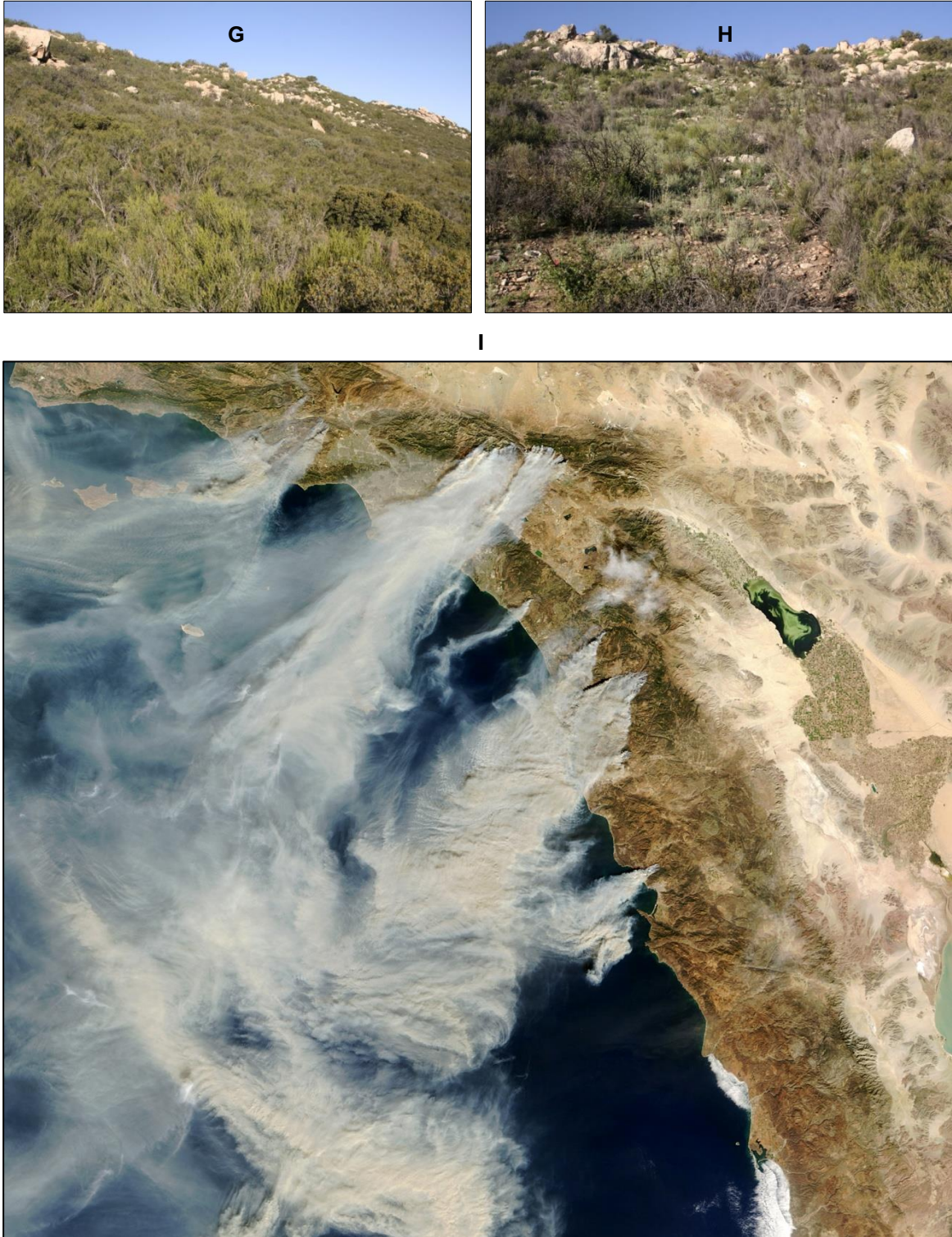


Figura 1. G-I. Sitios adyacentes de chaparral maduro y una franja quemada en la misma, cubierta de hierbas nativas a los dos años post incendio (Rancho Agua Caliente). I: Imagen satelital de humo de incendios, al 27 de octubre de 2003. Fotos de S. Bullock, imagen satelital de NASA.

La recuperación de la cobertura vegetal leñosa (de larga duración), de la cual dependen los servicios ecosistémicos arriba mencionados, es poco conocida, y requiere de estudio a mediano o largo plazo. También es heterogénea y difícil de muestrear (Franklin et al. 2000, 2004, 2005). Se ha demostrado que el re-crecimiento de arbustos de chaparral responde a diferencias interanuales en las condiciones de precipitación (Keeley & Keeley 1981) y espaciales en la calidad del sustrato (Westman et al. 1981, Desimone & Burk 1992). Se ha demostrado que las mediciones de la biomasa aérea (Black 1987) y las estimaciones de la cubierta vegetal (Hanes 1971) en el chaparral, varían con el aspecto topográfico (en respuesta a las diferencias en los balances de energía y humedad del suelo).

Se ha sugerido que los matorrales californianos se queman al alcanzar cierto nivel de desarrollo (Minnich 1983, 2001) de manera que la tasa de crecimiento determinaría el intervalo entre incendios. Sin embargo, la poca evidencia existente, experimental y de observación en campo, no señala la importancia de la carga de combustible (Weise et al. 2005) o de la edad de los matorrales (Paysen & Cohen 1990, Moritz et al. 2004). En el sur del Estado de California, se ha observado un aumento continuo en la frecuencia de los incendios debido al aumento de las áreas de contacto de los matorrales con la población humana (Keeley et al. 1999) y se advierten problemas consecuentes en la resiliencia de la vegetación (Zedler 1982, Westman & O'Leary 1986, Meng et al. 2014). Posiblemente el incremento de plantas herbáceas exóticas (Minnich & Dezzani 1998), de rápido crecimiento que sirven de combustible fino y fácil de secar, así como el cambio climático (Field et al. 1999), contribuyen a aumentar la frecuencia de incendios.

Tras el gradiente de humedad en la bioregión californiana, la frontera internacional ha marcado una barrera sustancial a la extensión de estudios a condiciones más áridas hacia el sur. Mientras tanto se reconocen diferencias respecto a California por cuestiones culturales y económicas (Minnich 1983, Chou et al. 1993, Keeley & Fotheringham 2001). También se puede remarcar la escasez de datos históricos sobre los incendios y dificultades de acceso debido a las características del terreno, por la misma vegetación o la falta de infraestructura. Faltando recursos, la mejor opción para una vista general de incendios en Baja California, sigue siendo la percepción remota, tal como en los primeros estudios (Minnich 1983).

La percepción remota ofrece importantes ventajas sobre las observaciones de campo al proporcionar una visión espacial continua (si bien, pixelada) regional o global (Goetz et al. 1983). No obstante, es limitada en cuanto a la resolución y particularmente en “señales” por las pocas correspondencias entre propiedades del ecosistema en campo e índices factibles de los sensores actuales. Para registros de la vegetación, el vigor productivo ha sido de interés general, tan así que la clorofila y la turgencia de las hojas han dominado entre los enfoques de la percepción remota. Esto tiene muchos usos si bien sus limitaciones.

El objetivo general de este trabajo es evaluar la resiliencia y sucesión de los matorrales del noroeste de Baja California después de un incendio, a gran escala espacial y a través de una década o más, tomando en cuenta posibles efectos de la humedad disponible y características del terreno.

1.2 Antecedentes.

Del sur de Oregón hasta el noroeste de Baja California, las serranías y sierras semi-áridas están dominados por matorrales densos de especies arbustivas nativas y auto-regenerativas, principalmente perennifolias y esclerófilas, el chaparral. A bajas elevaciones y por laderas expuestas al sur los arbustos se presentan en menor densidad, son más pequeños y más frecuentemente caducifolios (Mooney & Harrison 1972, Delgadillo 1992, Parsons 1976, Desimone & Burk 1992). En Baja California, las laderas de las serranías han mantenido apreciable cobertura de matorrales de especies nativas, mientras los valles han sido modificados (p. ej., Bullock 1999).

Los incendios son un componente reconocido de la dinámica de estos sistemas, considerados perturbaciones naturales en particular por las adaptaciones correspondientes de las plantas para re-establecerse (Zedler 1982, Keeley & Keeley 1987). No obstante, las estadísticas no publicadas de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) indican que las igniciones debido a causas naturales son raras fuera de la sierra alta. Al respecto, no ha dejado de ser tema de controversia si mejor prevención de

ignición antropogénico podría ser efectivo en mantener más constante y completa cobertura del suelo, particularmente en Baja California (Minnich 1991, Keeley & Fotheringham 2001). Por otro lado, a pesar del impacto limitado de bomberos sobre estos incendios, suelen ser más chicos que los incendios en el Estado de California (Chou et al. 1993).

Para comparar áreas con alto esfuerzo de control con áreas sin control, Minnich (1983) evaluó los incendios forestales del sur de California y el norte de Baja California para el período 1972-1980 a partir de imágenes Landsat. Para ese trabajo se registró, por interpretación de fotografía aérea, el perímetro de áreas aparentemente quemadas, la vegetación y año probable de incendio. Se encontró que la supresión tiene efectos divergentes en diferentes comunidades de plantas. Minnich (1983) sugirió que se establece retroalimentación entre el curso de los incendios activos, la historia de incendios, la configuración espacial de la vegetación inflamable y tamaño del incendio, todo en base a características presuntas de las plantas: las tasas de crecimiento, acumulación de combustible, tasas de descomposición. La supresión tuvo un impacto mínimo en el matorral costero y pastizales. Por otro lado, Minnich (1983, 2001) interpretó que el control de incendios en el chaparral reduce el número de incendios, con lo que el número de hectáreas no quemadas aumenta; los incendios en consecuencia aumentarían de tamaño, velocidad e intensidad de propagación, y se volverían incontrolables en condiciones climáticas severas. Minnich sugiere que el régimen de incendios del chaparral de Baja California puede servir de argumento para la quema prescrita en el sur de California (Minnich 1983, 2001, Chou et al. 1993).

Entre otros paradigmas, persiste la vieja idea que los chaparrales se vuelven senescentes a unas décadas de edad, disminuyendo el crecimiento y aumentando la razón materia muerta a viva (Hanes 1971, Paysen & Cohen 1990, Minnich 2001, Moritz et al. 2004). Sin embargo, se ha establecido que la inflamabilidad no se determina por la edad sino por biomasa, sequedad de la misma y factores meteorológicos. Aun así, la ignición es rara, eventual y no uniforme en el paisaje, según los parajes observables.

Los parajes de matorral consisten de un solo estrato de arbustos de 1-4 m de altura o una mezcla de estos con plantas herbáceas de menor tamaño. En California por lo

general se queman "limpio", es decir, toda la biomasa aérea se consume a excepción de los tallos y ramas más grandes, debido a la continuidad de combustible y las grandes proporciones de superficie-volumen que promueven la rápida oxidación (Countryman & Philpot 1970). Este resultado seguramente varía con la estructura, estatura y composición de la vegetación pero especialmente con la humedad de esta y el estado del tiempo.

Hay un fondo de estudios de la regeneración de matorrales, con variadas metodologías (p. ej.. Horton & Kraebel 1955, Zedler 1982, Westman & O'Leary 1986), pero principalmente anteceden el libre acceso a imágenes satelitales. De los estudios en campo, se deben notar que algunos son de seguimiento a corto o mediano plazo de parcelas marcadas.

Se ha sugerido que en las colinas y montañas del sur de California, los gradientes topográficos pronunciados y complejos, soportan regímenes de incendios que varían en distancias cortas. Franklin et al. (2005) utilizaron un modelo de paisaje espacialmente explícito, para examinar la recuperación de especies con diferentes maneras de responder a la perturbación, bajo diferentes intervalos entre incendios. Los intervalos fueron tanto naturales como largos: 30, 90 y 150 años. Para 30 años se encontró que los rebrotes dominan sobre plantas establecidas de semillas, mientras que a 90 años se dio lugar una distribución estable de estos dos tipos funcionales de arbustos. Los resultados obtenidos concuerdan con literatura (Westman & O'Leary 1986, Haidinger & Keeley 1993, Syphard et al. 2006) que sugiere que el cambio en la composición de los arbustos se debe muy probablemente a causas humanas, las cuales han aumentado la frecuencia de los incendios en la interfaz urbano-forestal de baja elevación. En tales casos el sistema sería resiliente en la función de cobertura del suelo, aunque cambien la composición específica y ciclos de nutrientes según el intervalo entre incendios.

En ausencia de fenómenos meteorológicos extremos, el chaparral sigue un proceso de recuperación bien definido después del fuego (Hanes 1971). Durante los primeros años, la cobertura es alta, dominada en gran parte por hierbas anuales que requieren fuego para estimular la germinación. Mientras tanto, los arbustos se restablecen a partir de plántulas, así como el rebrote de las reservas de biomasa subterráneas que no murieron por el fuego. La cobertura de arbustos aumenta de una manera constante hasta

aproximadamente 20 años después del incendio (Horton & Kraebel 1955) y la biomasa aérea aumenta a un ritmo elevado durante los primeros 10 años. La acumulación de biomasa se prolonga durante casi 40 años después de un incendio (Mooney 1981).

Debido a la dificultad de controlar la recuperación post-incendio en grandes áreas y la ausencia de un registro detallado de incendios en muchas zonas, Henry & Hope (1998) analizaron la recuperación post-incendio de parajes de chaparral (dominado por el chamizo negro, *Adenostoma fasciculatum*). Se analizaron datos SPOT XS de tres fechas entre 1986 y 1992 para determinar si los cambios temporales en un índice espectral de vegetación rastreaban a la trayectoria esperada de recuperación post-incendio de la biomasa de parajes de distintas edades post-incendio. Los resultados del estudio indicaron que ni el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ni el índice de vegetación ajustado por el suelo (SAVI) siguieron los patrones de recuperación post-incendio esperados. Los resultados obtenidos se explicaron por las variaciones interanuales de la precipitación que tienen un efecto mayor de lo esperado en el crecimiento de esta comunidad de hoja perenne, con cambios en el área de la hoja verde que domina las variaciones temporales en los índices de vegetación espectrales. Sin embargo, se puede comentar que el intervalo total del estudio y el número de fechas representadas fueron muy limitados.

1.2.1 Índices de vegetación.

Un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilbert et al. 1997). Estos índices no miden directamente ni la productividad ni la disponibilidad forrajera, pero tienen una estrecha relación con estas variables, por lo que se recomienda utilizarlos para análisis regionales. Los cambios del índice de vegetación permiten decir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto al valor histórico.

Estos índices se fundamentan en el comportamiento radiométrico de la vegetación. La cubierta vegetal, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0.6 y 0.7 μm), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.1 μm), que es reflejada en su mayoría (p. ej. Gamon et al 1995, Gilabert 1997, Sabins 1997).

1.2.1.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) es un índice normalizado que mide el verdor (la biomasa relativa) de la vegetación. Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).

El índice de vegetación diferencial normalizado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = (\rho \text{ NIR} - \rho \text{ R}) / (\rho \text{ NIR} + \rho \text{ R}) \quad (1)$$

en la cual $\rho \text{ NIR}$ = reflectividad en el infrarrojo cercano y $\rho \text{ R}$ = reflectividad en el rojo.

Este índice genera valores entre -1,0 y 1,0 que representan el verdor y donde cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al suelo desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0,1) corresponden a áreas desiertas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0,2 a 0,3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 0,8).

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación (Sabins 1997). Además permite la comparabilidad entre datos obtenidos

por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo (Huete 1981). El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación del índice debe asimismo considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores (Sabins 1997).

En una serie de especies de plantas a partir de tres tipos de vegetación de California, Stylinski et al. (2002) analizaron el NDVI y el SR (*Simple Ratio*, índice de relación sencilla), como indicadores de la estructura de la cubierta, la absorción de la luz y la actividad fotosintética. Observaron que ambos índices, derivados de reflectividad del dosel en las bandas de ondas rojas y del infrarrojo cercano, son indicadores útiles de la estructura de la cubierta, el contenido de clorofila, y la actividad fotosintética potencial a través de una amplia gama de tipos de vegetación.

El NDVI es especialmente sensible a las diferencias en la cobertura del dosel en los pabellones dispersos aunque pierde sensibilidad en casos de dosel moderado o denso.

No obstante una menor cantidad de estudios básicos en zonas áridas, se ha encontrado que varios aspectos biofísicos importantes de plantas arbustivas de zonas áridas tienen relación útil con los índices de vegetación, Marchetti et al. (1995) encontraron que los cambios en un índice infrarrojo correspondieron a las fases de recuperación post-incendio de vegetación matorral en Italia. Duncan et al. (1993) demostraron que la cobertura de arbustos en la Cuenca Jornada de Nuevo México se correlaciona con cambios en el NDVI y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). Gamon et al. (1995) y Serrano et al. (2000) recopilaron datos de reflectividad espectral sobre la vegetación de chaparral en California central utilizando un radiómetro de mano y encontraron relaciones significativas entre la biomasa (verde y total) y NDVI. Estos resultados sugieren que el SVI como el NDVI y SAVI se pueden utilizar para controlar el aumento de la biomasa sobre el suelo después de los incendios en comunidades de vegetación arbustiva. Esto debería hacer

posible el monitoreo de la recuperación post-incendio de chaparral utilizando índices de vegetación derivados de los datos de satélite.

1.2.2 NBR (Normalized Burn Ratio).

El índice NBR (Normalized Burn Ratio) conocido anteriormente como NDII (Normalized Difference Infrared Index) fue desarrollado en primer lugar por Hunt y Rock (1989). Un índice análogo el Short Wave Vegetation Index (SWVI) fue aplicado por Fraser et al. (2000) a datos SPOT-VEGETATION. En 1991 López García & Caselles aplicaron el NDII en imágenes Landsat-TM basándose en las bandas 4 y 7 de Landsat. En 2005 Key & Benson denominaron este índice como Normalized Burn Ratio (NBR).

El índice NBR, conocido también como el cociente de quema normalizado, se basa en el contraste espectral entre el infrarrojo cercano (NIR: 0.78 - 0.90 μm) y el infrarrojo de onda corta (SWIR: 2.09 - 2.35 μm). En un ambiente post-incendio, las superficies quemadas son poco reflectivas en el NIR, asociado a las alteraciones estructurales de la vegetación. En contraste, las bandas del SWIR son muy reflectivas debido a la pérdida de agua en el suelo y la vegetación. El NBR identifica superficies afectadas por el fuego por la relación de dichas bandas, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1, mediante la siguiente expresión:

$$\text{NBR} = (\rho \text{ NIR} - \rho \text{ SWIR}) / (\rho \text{ NIR} + \rho \text{ SWIR}) \quad (2)$$

en la cual $\rho \text{ NIR}$ = reflectividad en el NIR y $\rho \text{ SWIR}$ = reflectividad en el SWIR.

El índice NBR logra una mejor discriminación de las áreas quemadas en comparación con los índices de vegetación como el NDVI ubicados en la región del visible porque la información del NIR y SWIR presenta un mayor contraste en este tipo de superficies (Roy et al. 2005). Diversos estudios han enfatizado la potencialidad del NBR no sólo para delimitar las áreas quemadas sino también para evaluar el grado de severidad (Cocke et al. 2005; Miller & Thode 2007).

García & Chuvieco (2004) calcularon el NBR para imágenes SACC/MMRS para cartografiar grandes incendios en España. Concluyendo que la utilización de este índice aclaraba la confusión que se establece entre las áreas quemadas y, las láminas de agua y las sombras de nubes.

1.2.4 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

MODIS es un instrumento a bordo de los satélites Terra (originalmente EOS AM-1) y Aqua (originalmente EOS PM-1). Ambos satélites orbitan alrededor de la Tierra, pasando por el ecuador, Terra pasa de Norte a Sur por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS, orbitan alrededor de la Tierra visitando cada parcela en la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales.

MODIS provee alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales que van de 0.4 μm a 14.4 μm . Dos bandas se crean como imágenes con una resolución de 250 m en el nadir, cinco bandas a una resolución de 500 m, y las 29 bandas restantes con 1 km. Un patrón de lectura de ± 55 grados en la órbita EOS logra una franja de 2330 kilómetros por 705 km y ofrece una cobertura global cada uno o dos días (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

1.2.3.1 FIRMS (Fire Information for Resource Management System).

FIRMS es el producto de incendios activos de MODIS desarrollado para proporcionar lugares de incendios activos casi en tiempo real. FIRMS detecta en condiciones relativamente libres de nubes, “puntos de calor”, en píxeles de 1km, que se estén quemando al momento del paso.

La detección de incendios se realiza utilizando un algoritmo contextual (ver Giglio et al. 2003 para la descripción completa del algoritmo) que aprovecha la emisión de radiación infrarroja media fuerte de los incendios (Dozier 1981, Matson y Dozier 1981). El algoritmo examina cada pixel de la franja MODIS, y en última instancia asigna a cada una de las siguientes clases: datos faltantes, nubes, agua, no-fuego, fuego, o desconocido.

Píxeles que carecen de datos válidos se clasifican inmediatamente como datos perdidos y son excluidos de cualquier consideración adicional. Píxeles de nubes y de agua se identifican mediante máscaras, y se les asigna la clase de nube y agua, respectivamente. El proceso continúa en el resto de los píxeles de tierra. Una clasificación preliminar se utiliza para eliminar los píxeles obvios de “no-fuego”. Para los posibles píxeles de incendios que permanecen, se hace un intento de usar los píxeles vecinos para estimar la señal radiométrica del potencial pixel fuego en ausencia de incendio. Se identifican píxeles vecinos válidos en una ventana centrada en el potencial de píxeles fuego y se utilizan para estimar un valor de fondo. Si la caracterización de fondo fue exitosa, una serie de pruebas de umbral de contexto se utiliza para realizar una detección de incendios relativa. Estos buscan la firma característica de un fuego activo en el que tanto la temperatura de brillo (4 micras) y la diferencia de temperatura de brillo (4 y 11 micras), provengan sustancialmente de la del fondo no-fuego. Se ajustan umbrales relativos con base en la variabilidad natural del fondo. Se utilizan pruebas especializadas adicionales para eliminar las detecciones falsas causadas por el brillo del sol, los límites del desierto y los errores en la máscara de agua. Píxeles candidatos a fuego que no son rechazados en el curso de la aplicación de estas pruebas se les asigna una clase de fuego. Píxeles para los que la caracterización de fondo no se pudo realizar, es decir, los que tienen un número insuficiente de píxeles válidos, se les asigna una clase de desconocido (Giglio et al. 2003).

1.2.3.2 MOD13Q1

MOD13Q1 es un producto de MODIS de índices de vegetación. Debido a trazos de órbita superpuestos, pueden existir hasta cuatro observaciones por día de una parcela pero a

menudo las nubes obstruyen la vista. El producto se compone cada 16 días. El algoritmo aplica un filtro a los datos de cada pixel basado en la calidad, las nubes y la geometría de visualización, para elegir la mejor. Píxeles contaminados con nubes o fuera del nadir se consideran de menor calidad. Un pixel libre de nubes, vista nadir sin contaminación atmosférica residual representa la mejor calidad de pixeles. Podría resultar que parcelas adyacentes en tierra se representen por diferentes fechas en algún intervalo de 16 días. Los valores de MOD13Q1 NDVI van de -2000 a 10000, con un factor de escala de 0.0001 respecto a los valores normales del NDVI (Solano et al. 2010).

1.3 Justificación.

La cubierta vegetal constituye un factor decisivo en el ciclo hidrológico en ambientes secos, porque condiciona la evaporación, interceptación, transpiración, infiltración y escorrentías. También tiene un efecto importante en la reducción del albedo, el cual afecta los flujos de calor y vapor de agua, la nubosidad de una región y por ende el clima.

Los matorrales que dominan el noroeste de Baja California aportan servicios como control de la erosión y el escurrimiento acelerados y del albedo. Estos servicios están afectados por los incendios que disminuyen la cobertura vegetal.

Los incendios son la principal amenaza antropogénica y natural a los matorrales de la región mediterránea semiárida de las Californias.

La mayoría de los análisis de regeneración de estos matorrales se refieren a California. Particularmente para Baja California no hay información extensa sobre regeneración post-incendio.

Este estudio se enfoca en la distribución de los incendios y la regeneración post incendio vista por percepción remota. Se evalúa el posible efecto de características del terreno como elevación, aspecto, pendiente y sustrato, así como el vigor de la vegetación pre-incendio y su carácter estacional.

1.4 Hipótesis.

Las condiciones de precipitación, topografía y geología, afectan la tasa de recuperación post-incendio de la zona de matorrales en el norte de Baja California.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

Evaluar la resiliencia y sucesión de los matorrales del noroeste de Baja California, después de un incendio, y su relación con la humedad, geología y características del terreno, para conocer si existe recuperación post incendio en un lapso de 15 años.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Facilitar el análisis regional de la vegetación, integrando un archivo de imágenes satelitales MODIS para el noroeste de Baja California (de 2000 a 2014, con cuatro imágenes por año), de usos de suelo, geología y datos del terreno.
- Facilitar el análisis regional de incendios identificándolos por percepción remota e integrándolos en una base de datos.
- Probar la existencia de las tendencias del NDVI en sitios quemados y no quemados, para una muestra grande y aleatoria.
- Comparar la información existente terrestre y satelital sobre la distribución de los incendios.
- Evaluar el índice especializado, NBR, para la delimitación de quemas.

- Estimar la contribución de características del terreno al grado de recuperación de la vegetación después de un incendio a plazos hasta una década.

Capítulo 2. Metodología.

2.1 Área de estudio.

La zona de estudio se localiza en el noroeste de estado de Baja California, México. Abarca 25035 km² entre la frontera internacional entre México y Estados Unidos y la cuenca de El Rosario (latitudes c. 32.6° a c. 30.1°) y de la costa del Pacífico hasta el parteaguas Pacífico – Golfo (Figura 2).

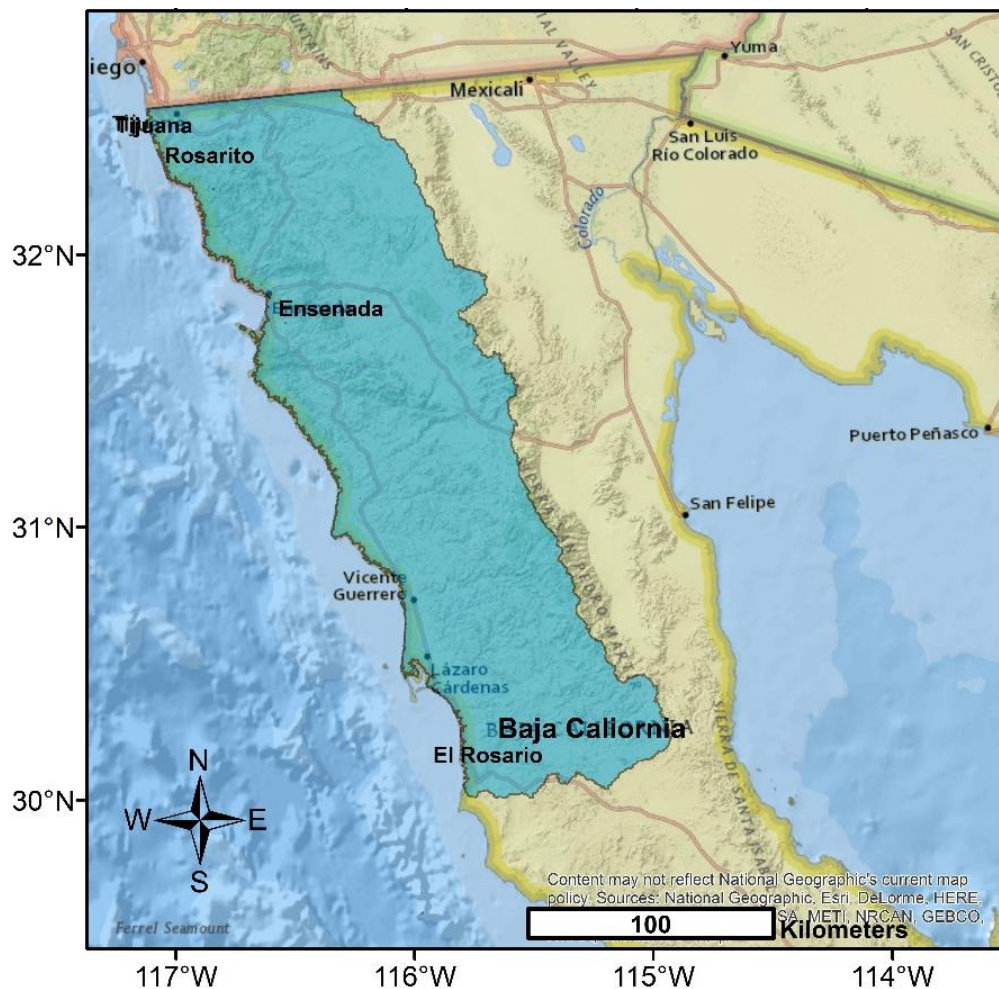


Figura 2. Mapa de la delimitación de la región de estudio (Fuentes: National Geographic, ESRI, DeLorme, Here, UNEP-WCMC, USGS, NASA, ESA, METI, NRCAN, GEBCO, NOAA, increment P Corp.).

2.1.1 Topografía y geología.

Predominan climas BSh, BSk y BWh (árido, estepa o desierto, cálido o fresco; Peel et al. 2007). Aunque se notan las variaciones temporales en temperaturas, la estacionalidad de la precipitación, casi sin lluvia en los meses de más calor, marca la diferencia con otros climas de México y la pauta del patrón estacional de incendios. Datos meteorológicos de las sierras son escasos, pero parece haber condiciones para mayor precipitación que en tierras bajas en invierno además de lluvias de verano esporádicas pero apreciables hacia el parteaguas.

El presente trabajo se restringe a vegetación arbustiva, por diferencias fuertes con pastizales y bosques de varios tipos en cuanto a topografía, uso de la tierra y dinámica de la vegetación. Los matorrales han sido clasificados de varias maneras según características fisionómicas y florísticas (Pase & Brown 1982a, b, Delgadillo 1992, Zippin & Vanderwier 1994, González-Abraham et al. 2010). La mezcla de matorral costero y chaparral parece más común y extensa en Baja California que en California y debido a esta mezcla, el presente trabajo se dirige a “matorral” entendido como la suma de variantes de vegetación arbustiva en la zona geográfica designada.

2.2 Datos del terreno.

Inicialmente se obtuvieron capas de información del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, escala 1:250000 serie V) para representar las características del área de estudio. Se utilizó el mapa geológico para representar el sustrato de la zona de estudio, así como el Modelo Digital de Elevación (MDT), con una resolución de 30 m, para representar las características del terreno y los mapas de Usos del suelo y de Carreteras, para delimitar la zona de estudio.

A partir del Modelo Digital de Terreno, se generaron mapas de orientación (Figura 3), elevación (Figura 4) y pendiente (Figura 5), con las herramientas de *Superficie raster* del

menú *Análisis en 3D* de ArcGis. Estos mapas fueron útiles para conocer la incidencia de la luz y el escurrimiento en los sitios de muestreo.

Asimismo se generó el mapa de acumulación de flujo para saber cuánto escurrimiento o drenaje llegaría a cada pixel desde aguas arriba. Esto se realizó con las herramientas *Rellenar*, *Dirección de flujo* y *Acumulación de flujo*, respectivamente. La primera se utiliza para rellenar los huecos que existan en el DEM y representarlos correctamente, la herramienta *Dirección de flujo*, como su nombre lo indica, determina la dirección de flujo desde cada celda en el ráster.

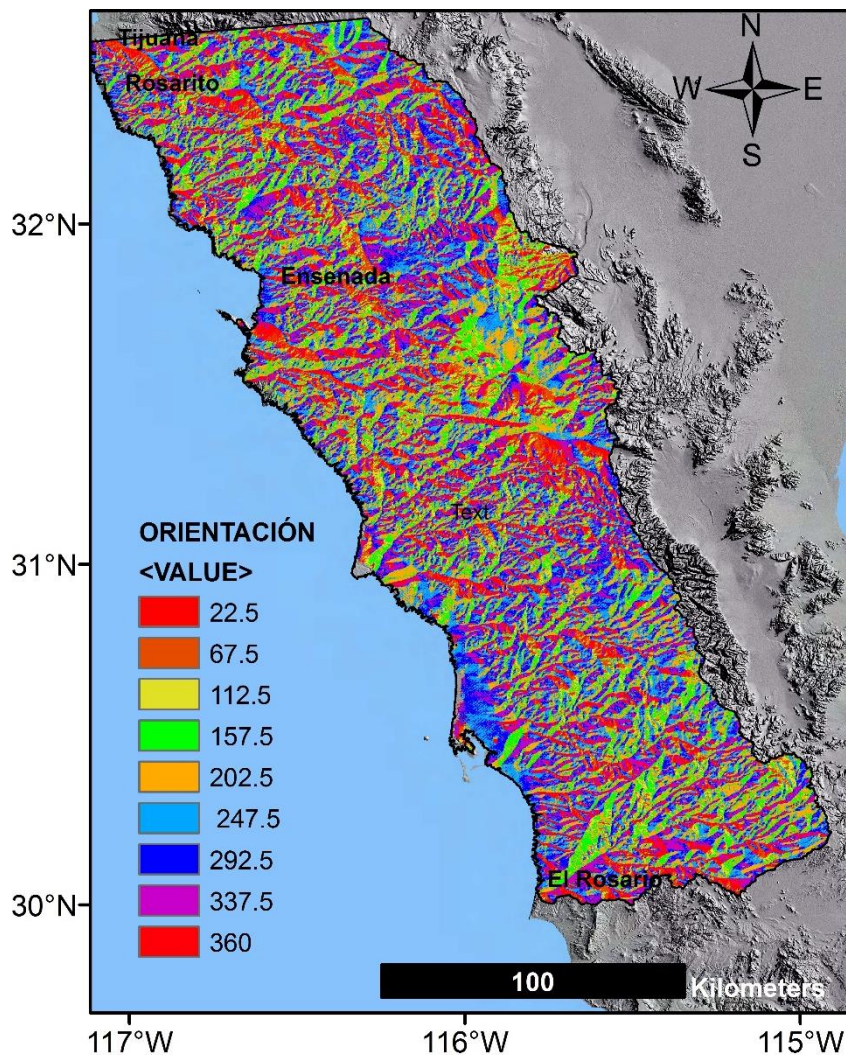


Figura 3. Mapa de la orientación de las laderas, en grados.

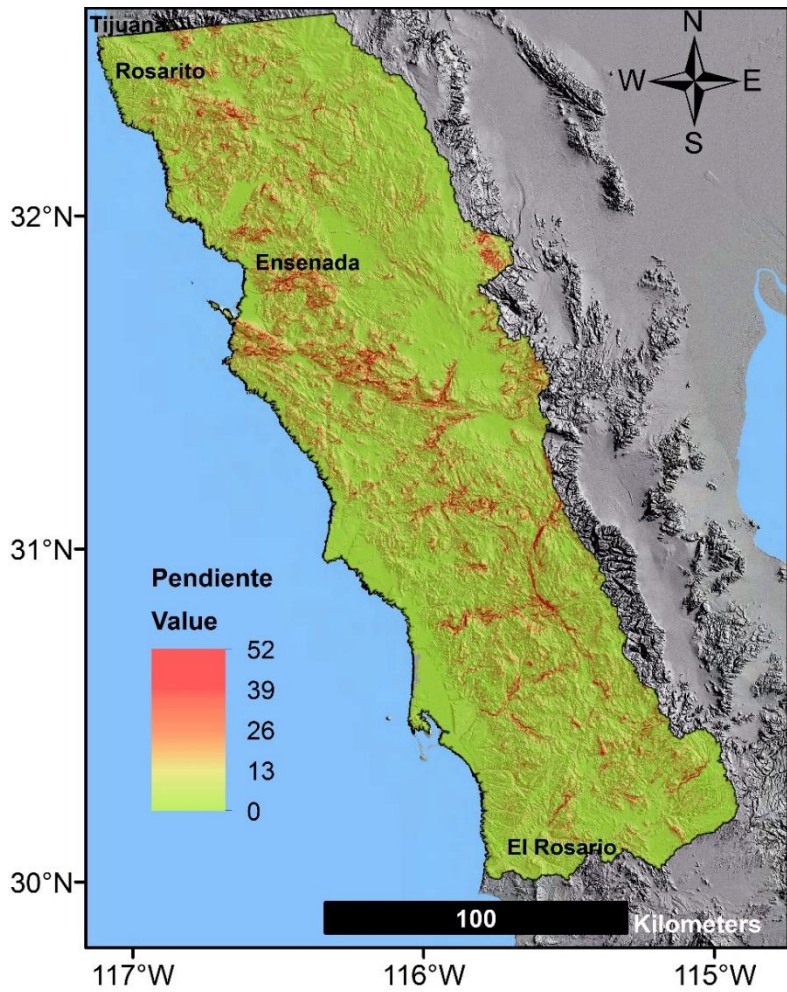


Figura 4. Mapa de la pendiente del terreno, en grados.

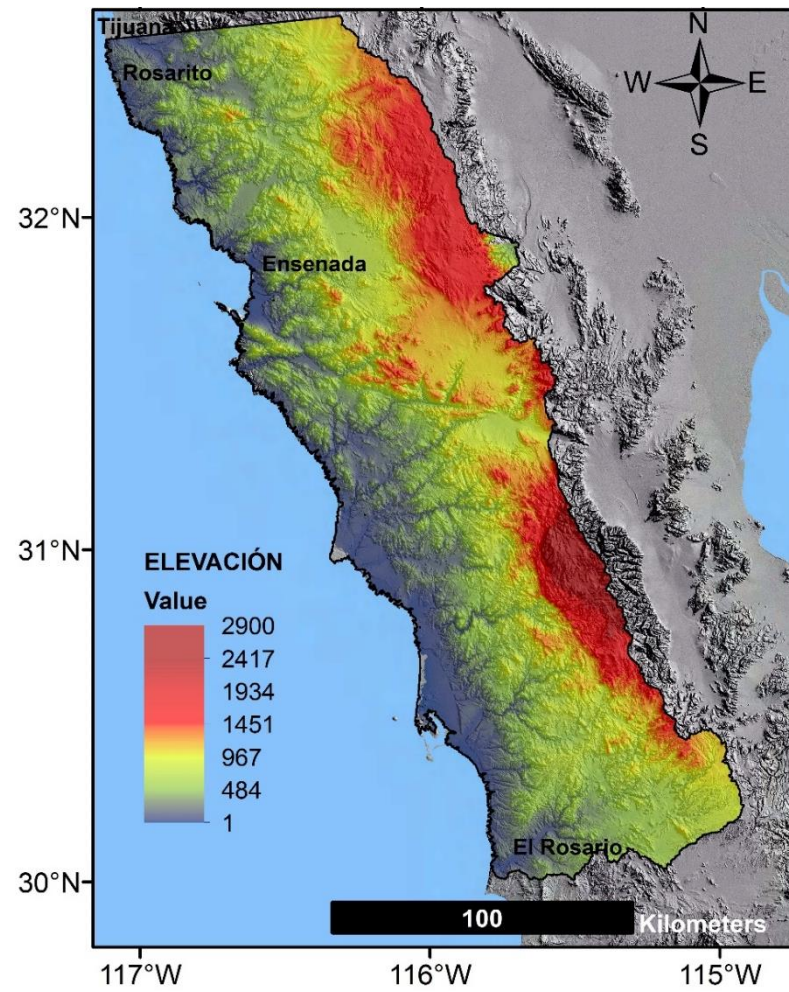


Figura 5. Mapa de la elevación del terreno, en metros s.n.m.

Por último, la herramienta *Acumulación de flujo*, calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente

Se utilizó el mapa de usos del suelo de INEGI (escala 1:250000 serie V, liga para descarga:<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/Default.aspx>) para crear un “área elegible” que, en lo posible, abarcara todas las zonas de matorral y excluyera las zonas urbanas, asentamientos humanos, carreteras, zonas de cultivo, zonas de bosque, dunas costeras, tular, vegetación de galería, vegetación introducida y cuerpos de agua (Figura 6A). El polígono resultante se utilizó como base para ubicar los sitios de muestreo (ver sección 2.3).

Los datos históricos de 12 estaciones meteorológicas fueron resumidos para representar la región entera con una secuencia de precipitación invernal (noviembre a abril). La precipitación invernal fue asignada al segundo año por la temporalidad del crecimiento de la vegetación. Las estaciones fueron: 2001 Agua Caliente, 2030 La Puerta, 2056 San Vicente, 2065 Santo Tomás, 2069 Valle de las Palmas, 2072 Presa Emilio López Zamora (Ensenada), 2121 El Hongo, 2124 El Carrizo, 2114 Ejido Carmen Serdán, 2120 Ejido México, 2153 Ejido Uruapan, 2164 Ejido El Porvenir (Figura 6B) La red no se presta a interpolación porque representa pobremente a las zonas de elevación mayor.

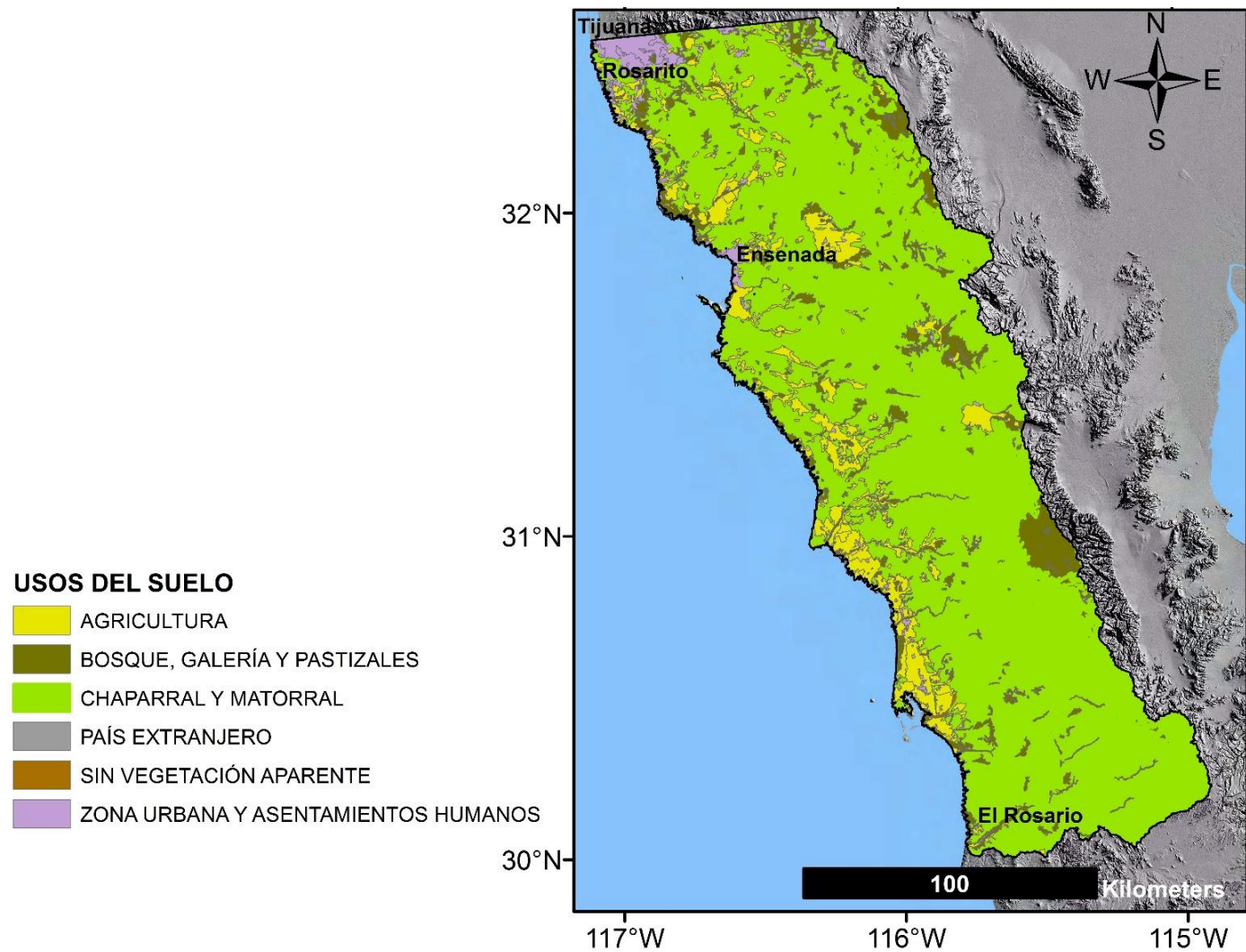


Figura 6A. Mapa de tipos de cobertura o uso del suelo (basado en INEGI) con reducción de sus 24 categorías. Este trabajo toma puntos de muestreo solamente de la zona de matorrales aquí indicado como “elegible”.

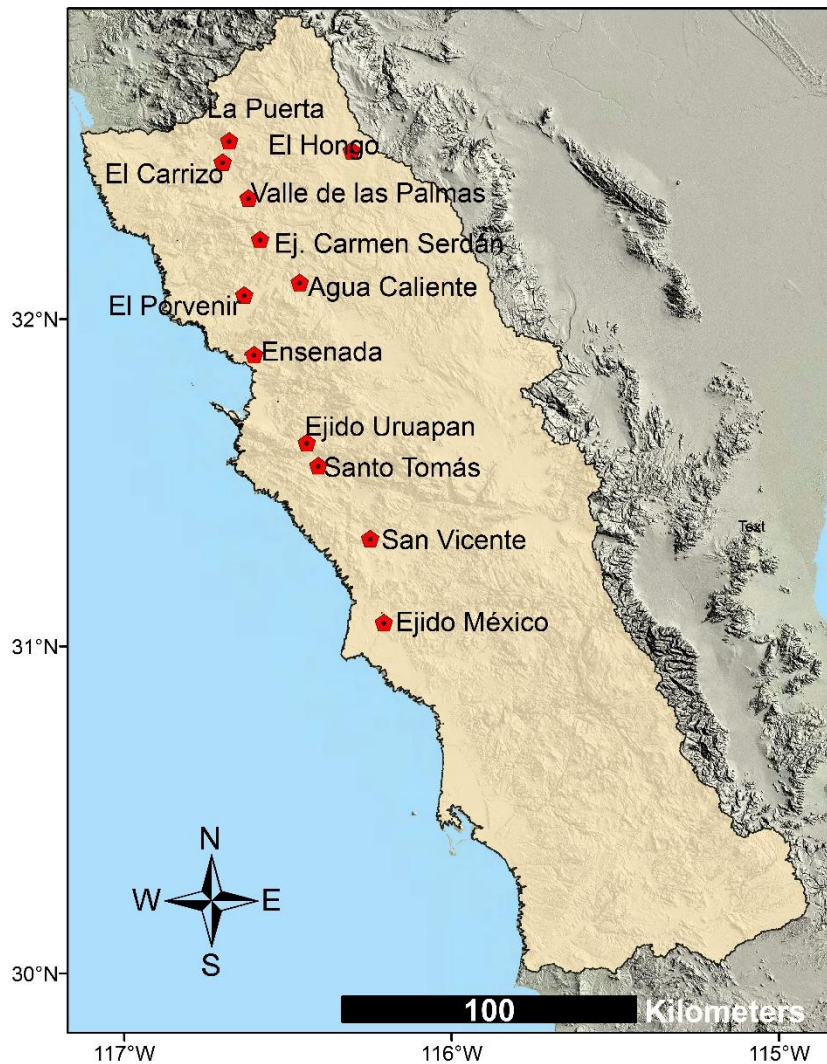


Figura 6B. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas (Fuente: A. Hinojosa).

2.3 Sitios de muestreo.

Para analizar el cambio temporal del NDVI, se asignaron sitios de muestreo correspondientes a píxeles de MODIS. Para esto se creó una capa de puntos aleatorios, tomando como base el mapa de la zona de estudio con la herramienta *Crear puntos aleatorios*, contenida en el menú *Herramientas de gestión de datos* de la Caja de Herramientas de ArcGis 10.2.2 y se asignó una distancia mínima de 250 metros entre cada sitio para evitar que en un mismo píxel hubiera más de un sitio de muestreo.

Inicialmente se manejaron mil puntos, pero al extraer los valores de NDVI, se observaron valores anormales en algunos de ellos, por lo que, después de verificarlos por medio de imágenes satelitales si dichos puntos se encontraban en una zona de cultivo o un área urbanizada recientemente, quedó un total de 986 sitios de muestreo.

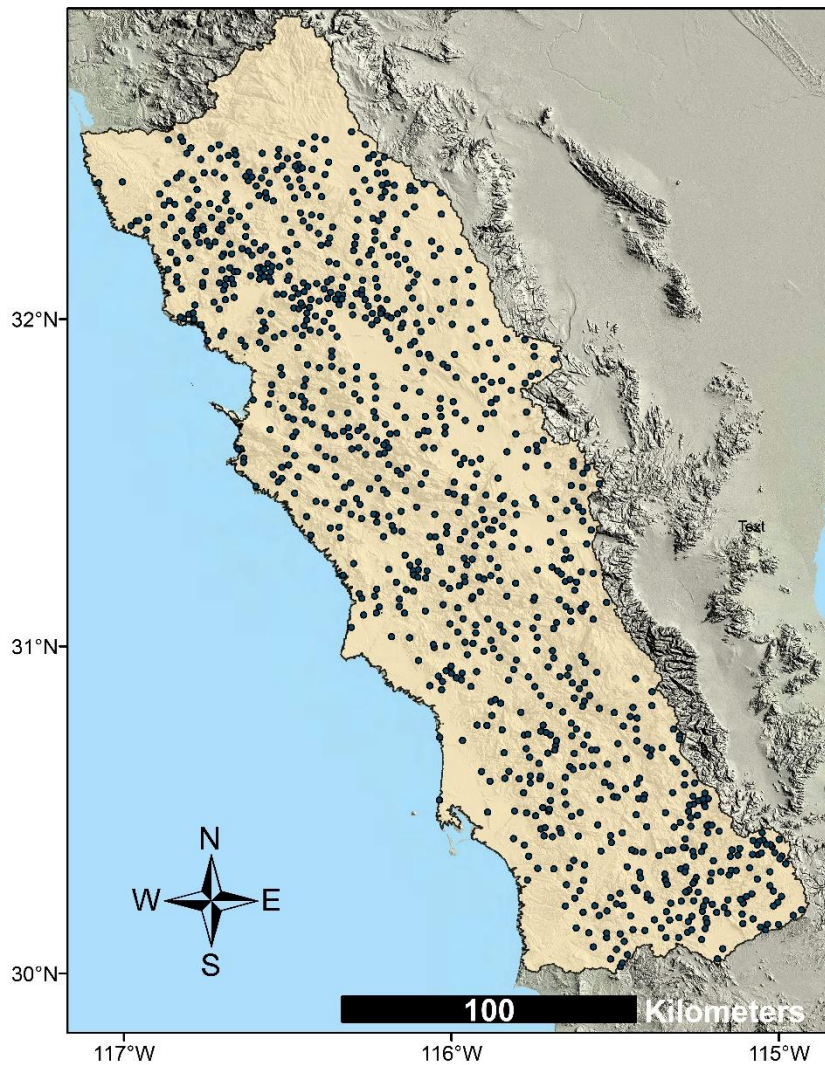


Figura 7. Mapa de ubicación de los 986 sitios de muestreo en la zona de estudio (Fuente: A. Hinojosa)..

2.4 Análisis de NDVI

Se tomaron datos de NVDI de las imágenes compuestas de MOD13Q1 (Figura 8), de abril (7 al 12), junio (10 al 25), agosto (13 al 28) y octubre (9 al 25) del año 2000 al 2014. Se tomaron estos meses para representar la variación fenológica de la vegetación en cuanto a verdor y turgencia como también en la desecación progresiva. En la práctica se enfocó en abril y agosto y su contraste.

MOD13Q1 (NDVI) es un producto de MODIS, que provee el cálculo del NDVI por cada 16 días (Figura 8) La imagen se genera a base de imágenes diarias pero para el producto se asigna a cada pixel el valor máximo que tuvo en condiciones no nubladas durante los 16 días. La tabla de características de MOD13Q1 puede verse en el apéndice 1. El producto reporta valores de $NDVI \cdot 1000$. En los sitios de muestreo y las fechas y el periodo de estudio, los valores de NDVI presentaron una distribución unimodal pero un tanto sesgada (Figura 9).

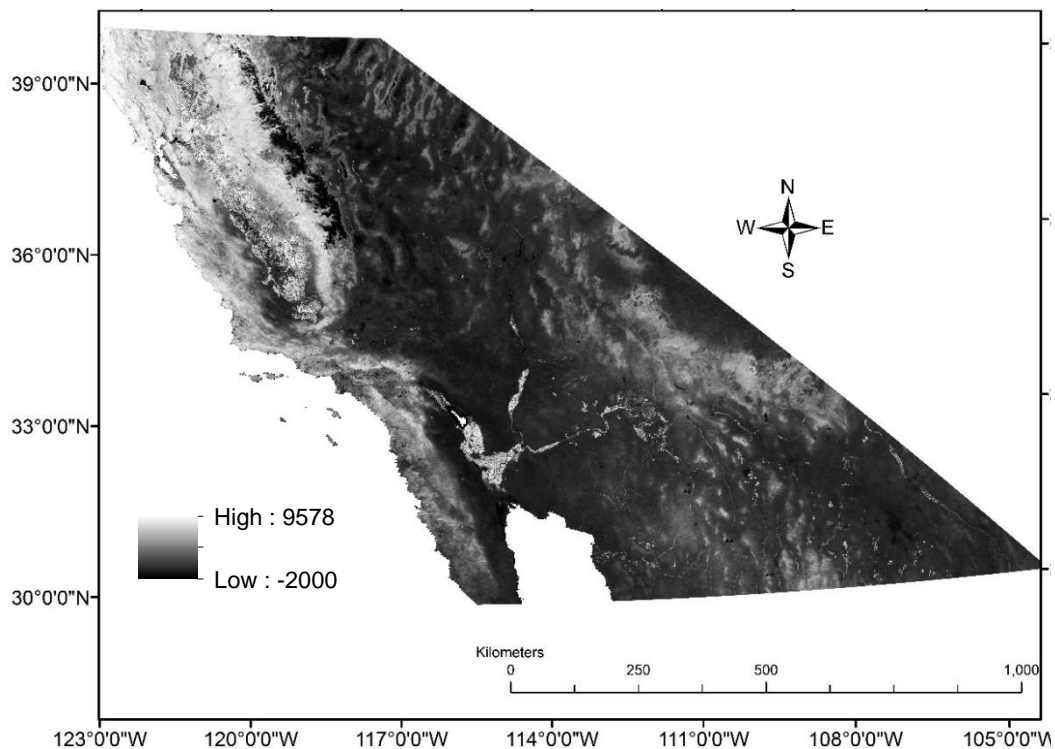


Fig. 8. Ejemplo de la huella de la imagen MODIS correspondiente al área de estudio, mostrando NDVI para el abril de 2003.

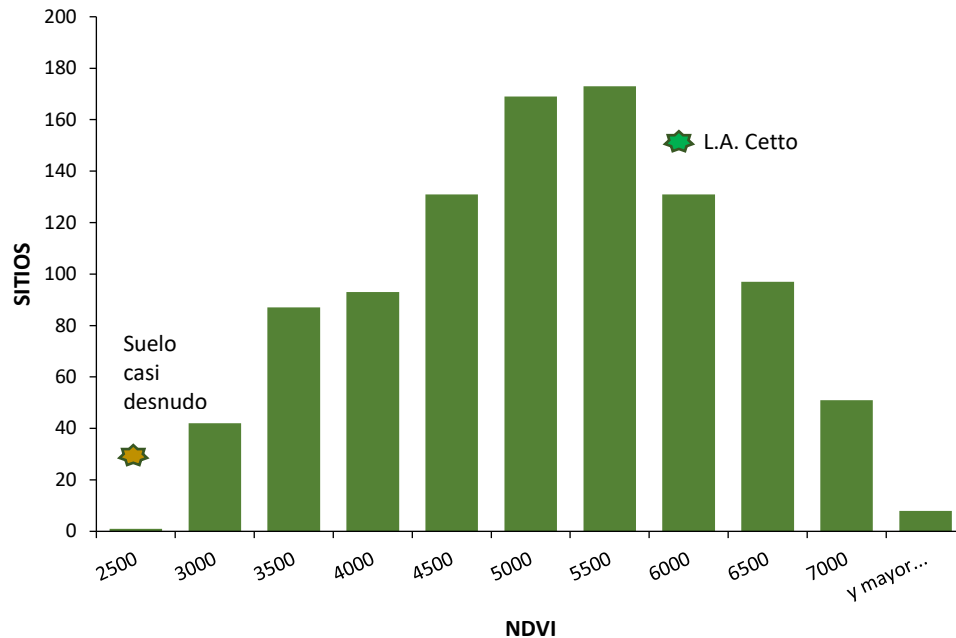


Figura 9. Frecuencias de niveles de NDVI entre todos los sitios, meses y años. Para comparación, se indican valores de NDVI para sitios con condiciones especiales, mar, suelo desnudo (relleno sanitario de Ensenada) y vegetación malacófila uniforme (cultivo de vid).

Como variables del estado de la vegetación, se utilizaron las diferencias en los índices de las imágenes de abril y agosto, obteniendo de éstas el porcentaje de vegetación caducifolia y el porcentaje de vegetación perenne.

El análisis y procesamiento de imágenes se llevó a cabo con el software ArcGis 10.2.2.

2.5 Percepción remota de incendios activos

FIRMS (Fire Information Resource Management System) forma parte de los productos de MODIS, detecta incendios activos y proporciona su ubicación casi en tiempo real. La información de los incendios se obtuvo descargando los datos anuales de FIRMS MODIS (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms/active-fire-data#tab-content-6>).

Esta información se cotejó con los sitios de muestreo para ubicar los puntos (píxeles) quemados en cada año y analizar el proceso de recuperación de la vegetación. De los sitios de estudio, 207 coincidieron con los puntos FIRMS y se tomaron como “sitios quemados”. Posteriormente, a partir de los datos de FIRMS, se obtuvieron las fechas exactas de quema para cada punto. En el apéndice xx se encuentra la tabla de valores de FIRMS.

Se extrajeron los valores del NDVI en todos los sitios de muestreo (quemados o no) para cada año, se calculó su promedio, mínimo y máximo, así como la relación entre los valores de abril y agosto por año en cada punto

Para conocer la trayectoria de recuperación de los sitios quemados se compararon y graficaron los valores de NDVI de estos puntos, por separado y en conjunto, en cada temporada, a lo largo de todo el período posterior a la quema.

Se calcularon los valores máximos y mínimos del NDVI para los puntos quemados y no quemados en todo el período y por temporadas, estos valores se compararon con los datos de pendiente, elevación, acumulación de flujo, orientación y tipo de roca del suelo para analizar si existe relación entre las características del suelo y la ocurrencia de incendios o la recuperación de la vegetación. También se analizaron los puntos quemados en los distintos tipos de suelo (roca), buscando alguna relación entre el tipo de roca y la frecuencia de los incendios.

2.6 Registros de incendios de CONAFOR.

Se obtuvieron los datos de incendios que maneja la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con la intención de verificar la información obtenida de los datos satelitales. Sin embargo, se presentaron un discrepancias al tratar de unificar la información de CONAFOR y FIRMS. Los datos geográficos de CONAFOR han sido limitados a algún punto en la quema y la superficie afectada.

Para comparar los datos de ambas partes, se agruparon los puntos FIRMS correspondientes a un mismo incendio, según la ubicación y fecha reportadas por CONAFOR. Sin embargo al calcular las áreas de éstos polígonos, para un mismo incendio se observó una diferencia marcada entre las áreas de los incendios reportados por CONAFOR y las calculadas con los puntos de FIRMS.

Aunque la información de CONAFOR no se pudo traducir a mapas ni emplear en el análisis de NDVI, sí se tomó en cuenta para otros datos importantes, como las causas de los incendios, el tipo de vegetación quemada y para comparación al analizar los patrones históricos y estacionales y la superficie por quema.

2.7 Detección y análisis de cicatrices de incendios.

Para la delimitación precisa de unas cicatrices de incendio y caracterización del NDVI tanto antes y después como adentro y afuera, se utilizaron los puntos de calor de FIRMS, los puntos cercanos con las mismas fechas se tomaron como un incendio. Una vez ubicados los incendios, se procesaron imágenes Landsat (5, 7 y 8), enfocando en cuatro incendios: A) 30 de abril de 2004, 6330.39 ha, centrado cercano a 32°10'N y 116°50'W; B) 14 de mayo de 2014, 662.21 ha, centrado cercano a 32°10'N, 117°W; C) 26 al 28 de agosto de 2009, 3771.37 ha, centrado cercano a 31°30'N, 116°W; D) 06 de mayo de 2004, 1823.018 ha, centrado cercano a 31°40'N, 116°W°. Para el proceso de detección de las cicatrices se utilizaron imágenes pre y post incendio, de las fechas indicadas a continuación: A) 31 de marzo de 2014 y 2 de mayo de 2014, B) 02 de mayo de 2014 y 19 de junio de 2014, C) 08 de agosto de 2009 y 03 de octubre de 2009, D) 11 de abril de 2004 y 27 de agosto de 2004. La selección de las fechas estuvo limitada a la disponibilidad de imágenes sin nubes

Para la detección de cicatrices de incendios se aplicó el cociente de quema normalizado **NBR** (*Normalized Burned Ratio*) en imágenes Landsat.

Para calcularlo, se utilizaron la banda del infrarrojo cercano (sensible a agua en suelo y en vegetación) y la del infrarrojo de onda corta (sensible a vegetación muerta) (Figura 10).

Se calculó con la ecuación (2), con la herramienta *Calculadora de ráster* del ArcGis. Los datos de entrada son las bandas correspondientes de cada imagen.

Posteriormente se calculó el **DNBR** o **ΔNBR** que es la diferencia entre el NBR anterior al incendio y el NBR posterior al mismo, con el algoritmo:

$$\Delta NBR = NBR_{anterior} - NBR_{posterior} \quad (3)$$

Por último, con la herramienta *Ráster a polígono* se obtuvieron los polígonos correspondientes a las cicatrices de incendio.

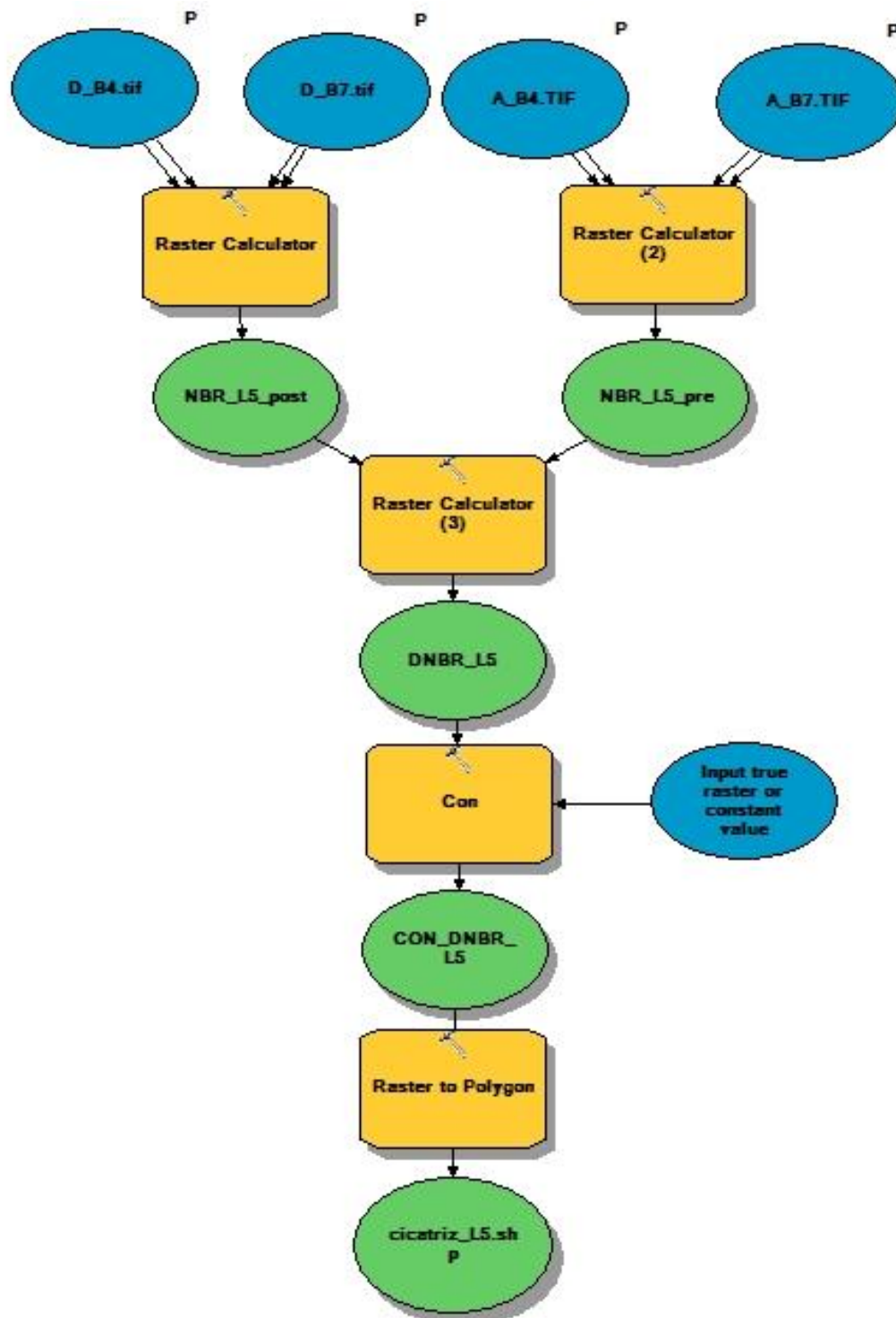


Figura 10. Modelo para detectar las cicatrices de incendio por el cociente de quema normalizado (NBR), creado con la herramienta *Model Builder* de ArcGIS 10.3.

Para conocer el valor del NDVI dentro y fuera de la cicatriz, se delimitaron dos zonas de muestreo, siendo el área de la cicatriz y el área del buffer, una franja de 500 metros de ancho que rodea exteriormente al borde de la cicatriz. Posteriormente se crearon capas de 500 puntos aleatorios para extraer los valores del NDVI en las tres zonas y conocer el cambio del mismo de una zona a otra.

2.8 Análisis estadístico.

Se utilizaron principalmente métodos estadísticos no paramétricos, incluyendo la comparación de dos series por rangos en forma de las pruebas U de Mann-Whitney, esta prueba tiene su base en la diferencia de rango y es la contraparte de la t de Student que se emplea en las variables cuantitativas con distribución normal. La comparación de distribuciones Kolmogorov-Smirnov, la prueba determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. La correlación de Spearman, que es adecuada para medir la relación entre dos variables cuando no se cumplen los supuestos de normalidad en la distribución de los valores. El coeficiente de correlación de Spearman se designa por r .

Para evaluar un modelo de factores múltiples en la regeneración, se usaron árboles de regresión. Las relaciones entre precipitación y NDVI se analizaron con regresión no lineal. Los análisis se realizaron con el software Systat, con un nivel de significancia de 0.5.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Patrones generales de los incendios.

3.1.1 Superficie quemada y número de incendios por año.

Según los registros de CONAFOR, la superficie quemada por año en el noroeste de Baja California ha variado entre 30,000 y 130,000 ha/año en el período de estudio, excepto los años 2000 y 2001 donde se presentó escasez de siniestros (Figura 11).

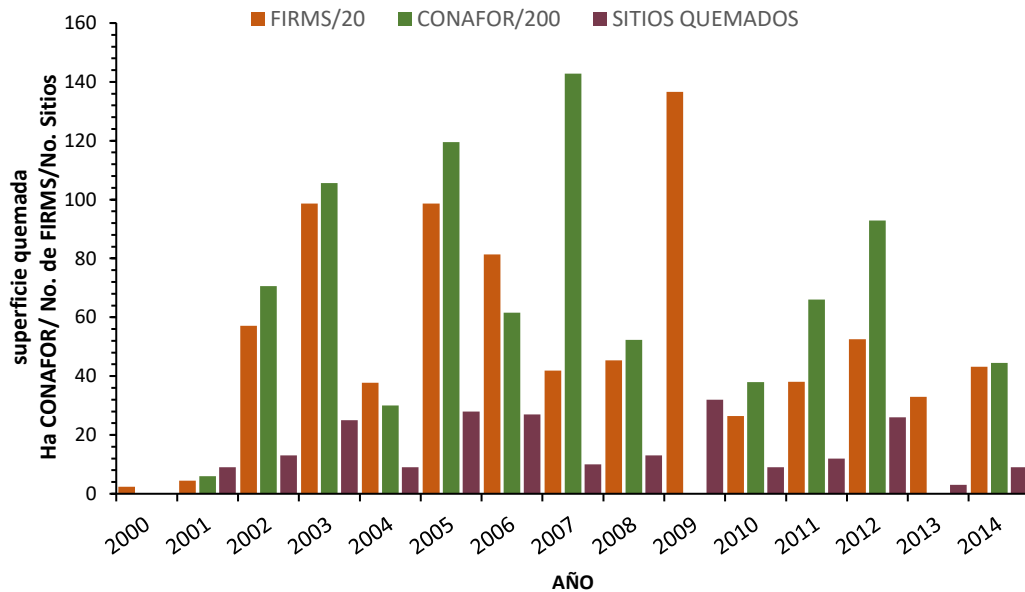


Figura 11. Superficie quemada por año en ha (registro CONAFOR de incendios afectando matorral, verde), en número de puntos de calor (registro FIRMS, naranja) y número de sitios aleatorios quemados (según FIRMS, morado).

Al comparar las mediciones de área quemada obtenidas de CONAFOR con el área calculada con los puntos de calor FIRMS, hubo problemas de escalamiento, sin embargo su variación temporal fue similar. La discrepancia entre las áreas por año puede deberse a una sobreestimación por qué la resolución del pixel de MODIS de 250 m es baja.

Por otro lado, incendios abarcando principalmente pastizales pueden haber aumentado la cifra basada en datos de CONAFOR. Cabe señalar que no se cuenta con datos de incendios por parte de CONAFOR para los años 2000, 2009 y 2013.

3.1.2 Estacionalidad

La variación estacional en la superficie quemada se representa por promedios mensuales entre 2000 y 2014 (Figura 12). Entre abril y junio comienza la temporada de incendios aunque se consideran como quemas tempranas. El promedio acumulado de área quemada por FIRMS entre abril y junio es de 189300 ha, y 35000 ha por CONAFOR. De julio a septiembre, el área quemada aumenta, 390900 ha quemadas según por FIRMS y 76000 ha según CONAFOR. El periodo de más alta extensión de territorio quemado es de julio a septiembre, en cuanto al promedio entre años. Como en es el caso de la suma de área quemada por año, hay una diferencia de escala entre los datos de CONAFOR y FIRMS.

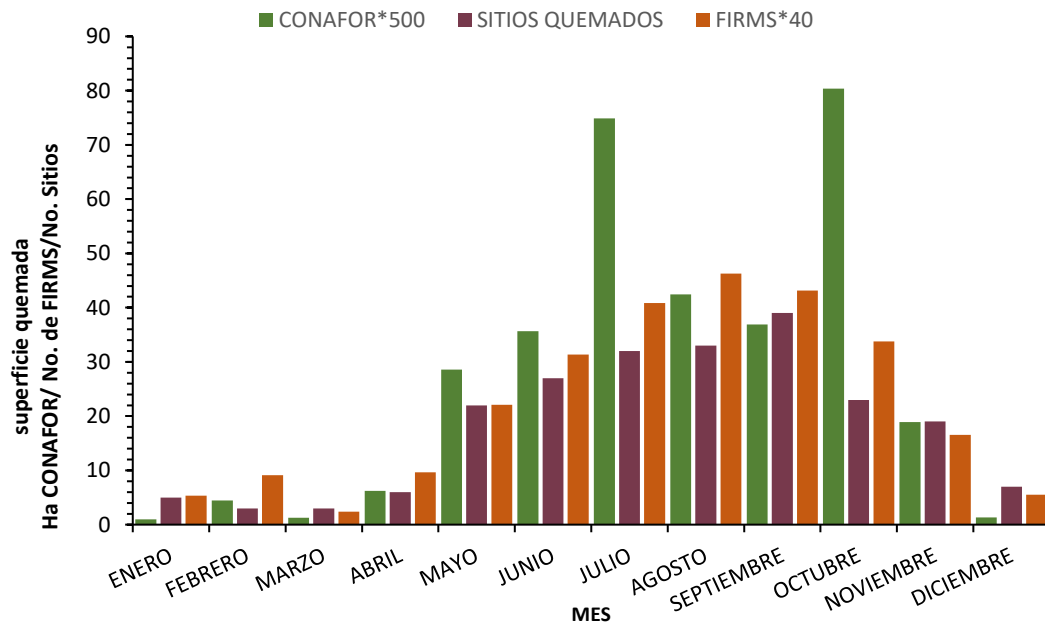


Figura 12. Promedio por mes, para los años 2000 a 2014, de la superficie quemada en ha (registro CONAFOR de incendios afectando matorral, verde), en número de puntos de calor (registro FIRMS, naranja) y número de sitios aleatorios quemados (según FIRMS, morado).

3.1.3 Tamaño de quemas individuales

Con la información obtenida de CONAFOR, se obtuvo la frecuencia de incendios según la superficie quemada (Figura 13), incluyendo únicamente las áreas correspondientes a matorral.

Si bien un 63 % de las quemas fueron de menos de 8 ha, fueron frecuentes las afectaciones entre 16 y 512 ha, indicando la facilidad de extenderse. Por otro lado, las quemas de más de 4000 ha, siendo tan solo 21 siniestros de los 2369 reportados, comprendieron el 94 % de la superficie total quemado en el periodo de estudio.

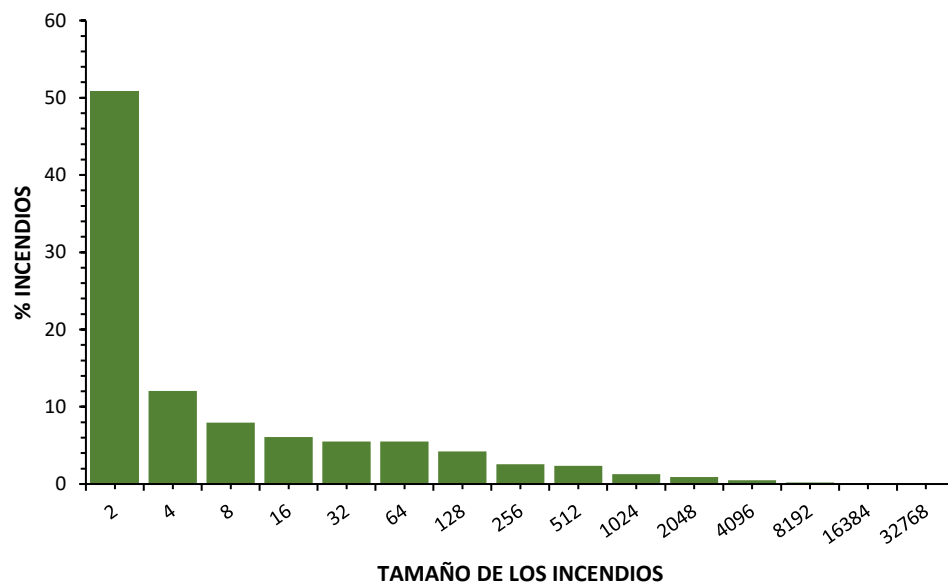
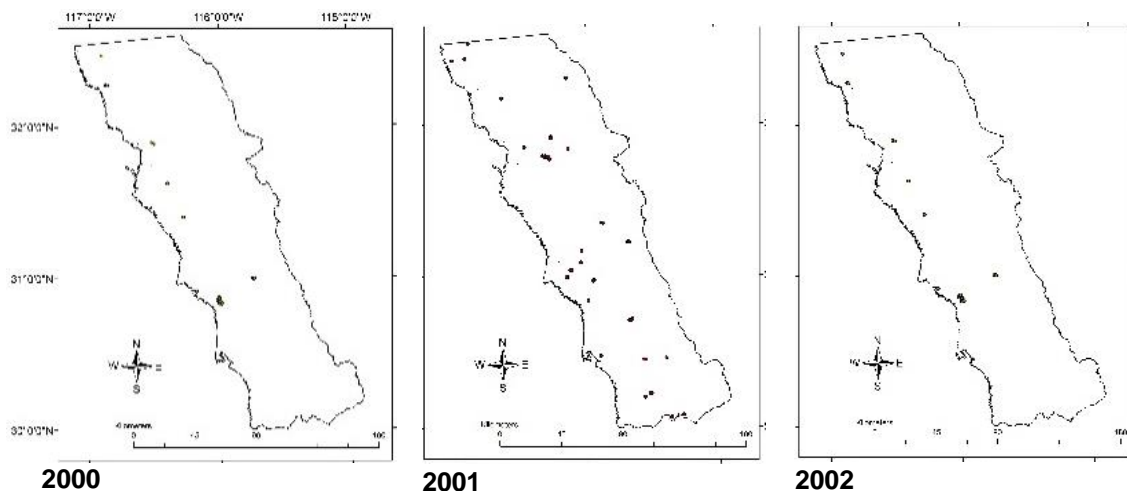


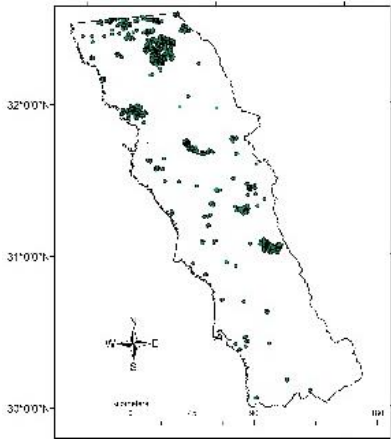
Figura 13. Porcentaje de incendios por categorías de la superficie (ha) de incendios individuales, según registros de CONAFOR, para eventos afectando matorral.

3.2 Distribución de incendios.

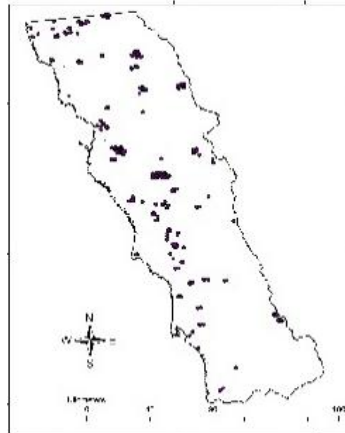
3.2.1 Distribución geográfica

La distribución de incendios quedó caracterizada por los datos de FIRMS (Figura 14), dado que los de CONAFOR son registros de un punto por incendio, con muy pocos incendios registrados como polígonos. Los datos de FIRMS son píxeles y muchos pueden pertenecer a un mismo incendio, pero, faltando los polígonos, ofrecen la mejor perspectiva. De los 982356 píxeles MODIS en la región de estudio, respetando las varias exclusiones, 206 píxeles presentaron al menos un incendio entre 2000 y 2014. Zonas de ocurrencia repetida de incendios aparecen en una franja fronteriza y en un triángulo entre Colonet, Valle de la Trinidad y San Quintín. Al contrario, hay una escasez persistente de incendios tierra adentro de las mesetas costeras al sur de la brecha de El Socorro a El Salto. Muchos de los siniestros ocurrieron sobre las carreteras y brechas (relacionados con el 20.8% de los incendios iniciados por colillas de cigarro). También, excepto por el Municipio de Tecate, parece ser que la zona de menos elevación o costera tiende a una mayor frecuencia de incendios.

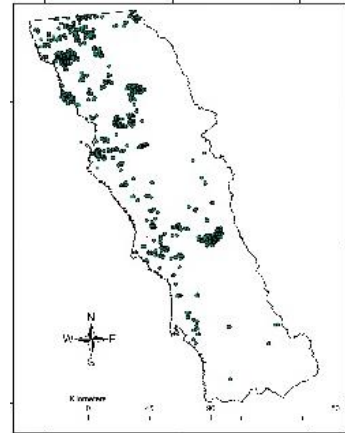




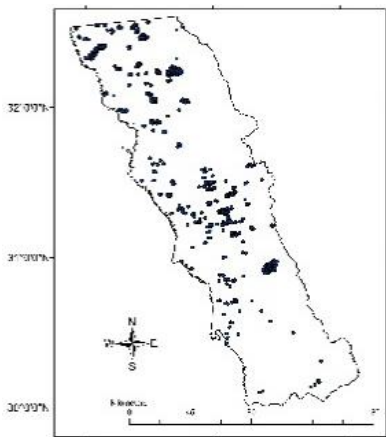
2003



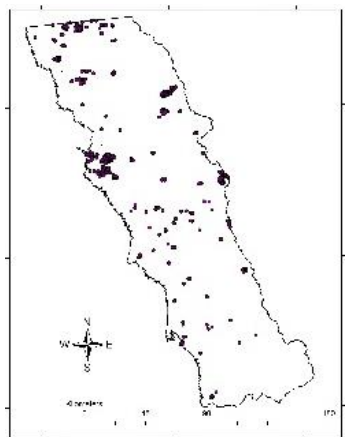
2004



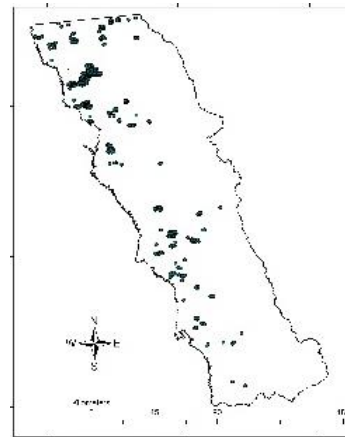
2005



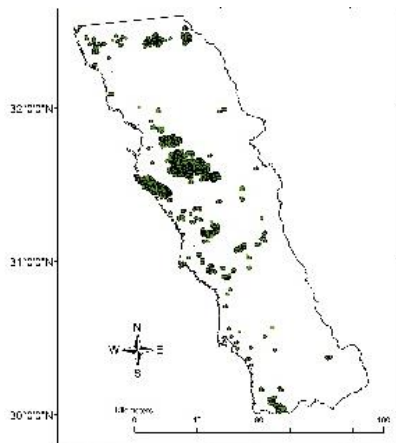
2006



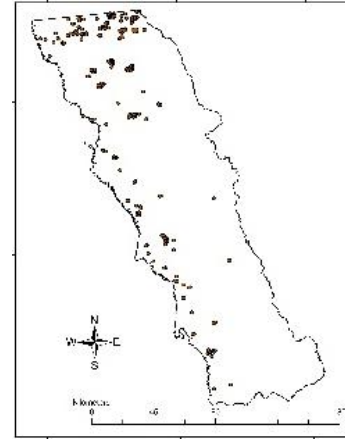
2007



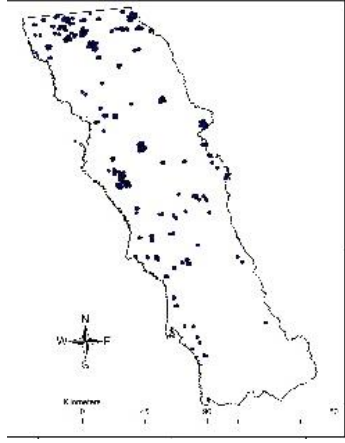
2008



2009



2010



2011

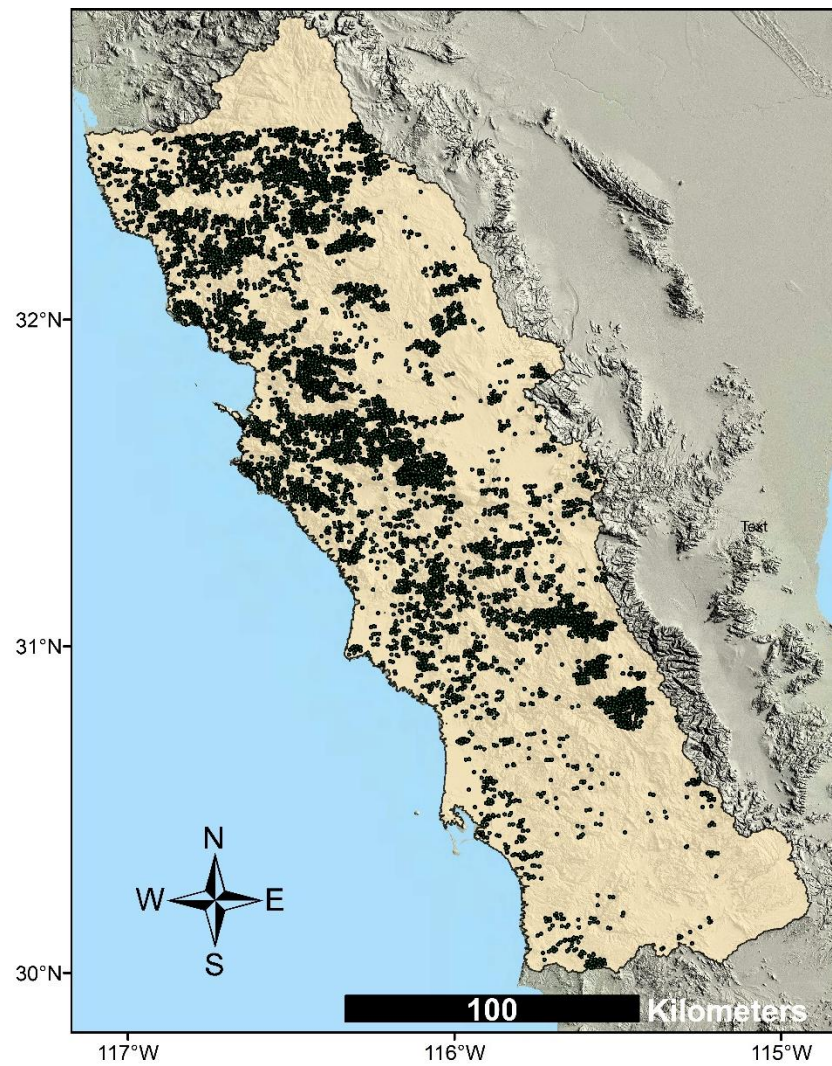
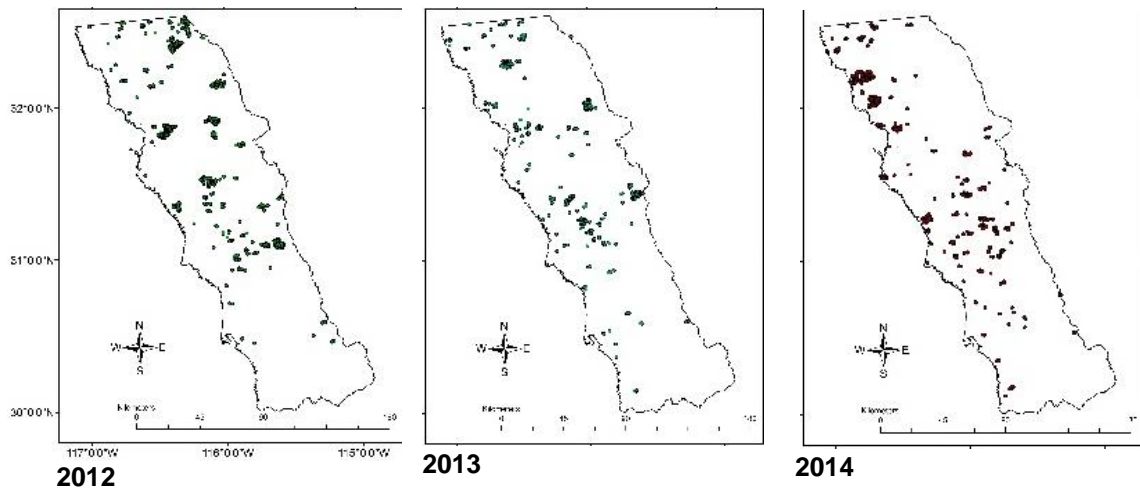


Figura 14. A -O) Puntos calientes según FIRMS, para cada año de 2000 a 2014. P) Mapa acumulativo de los puntos de calor 2000 a 2014.

3.2.2 Distribución en relación con el terreno.

Para conocer si existe influencia de las características del terreno de un lugar en la posibilidad de quemarse, se usaron los valores de la elevación, orientación, pendiente y acumulación de flujo, contrastando los sitios de muestreo quemados y no quemados.

En su mayoría, los sitios de muestreo se localizan en zonas entre 400 m y 1200 m de elevación. Las distribuciones de los sitios quemados y no quemados fueron parecidas (Fig. 15) y su comparación por la prueba de Mann-Whitney no sostuvo alguna diferencia, tal que no se puede rechazar la hipótesis que la elevación del terreno no afecta la probabilidad de quemarse o no de un sitio. No obstante, hubo otro contraste con respecto a la elevación. La correlación por rangos entre la elevación y el NDVI de los sitios no quemados no fue significativo (Tabla 1; promedio por sitio de los meses de abril o de agosto entre todos los años, como también el máximo y el mínimo). Pero, para los sitios quemados, las relaciones se mostraron significativas en sentido positivo (Tabla 1; para NDVI de los años antes de quemarse).

En cuanto a la orientación de las laderas, poco más del 50% de los sitios de muestreo se encuentran orientados al cuadrante Norte, entre 292.5° y 67° (Fig. 16). Parecido a la elevación, no se rechazó la hipótesis que los sitios quemados tienen una distribución de orientaciones no distinguible de los sitios no quemados. Los análisis de correlación con respecto a las variables de NDVI para sitios no quemados y quemados mostraron un efecto entre los no quemados para abril y para el mínimo de abril pre-incendio para los quemados (Tabla 1).

Hay que recordar que estos datos vienen del análisis de un modelo digital de elevación con una resolución de 50 m y que se utilizan 8 píxeles adyacentes para calcular un valor de orientación. No se trató de limitar el análisis de esta variable a laderas presentando un plano uniforme mayor.

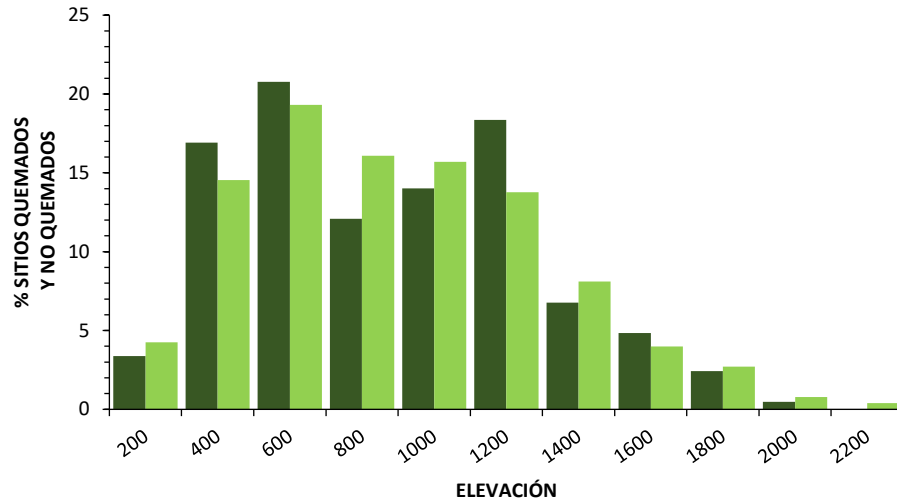


Figura 15. Frecuencia de sitios no quemados (gris) y quemados (negro) (2000 a 2014) según categorías de la elevación del sitio, de un total de 983 sitios quemados y 207 sitios no quemados.

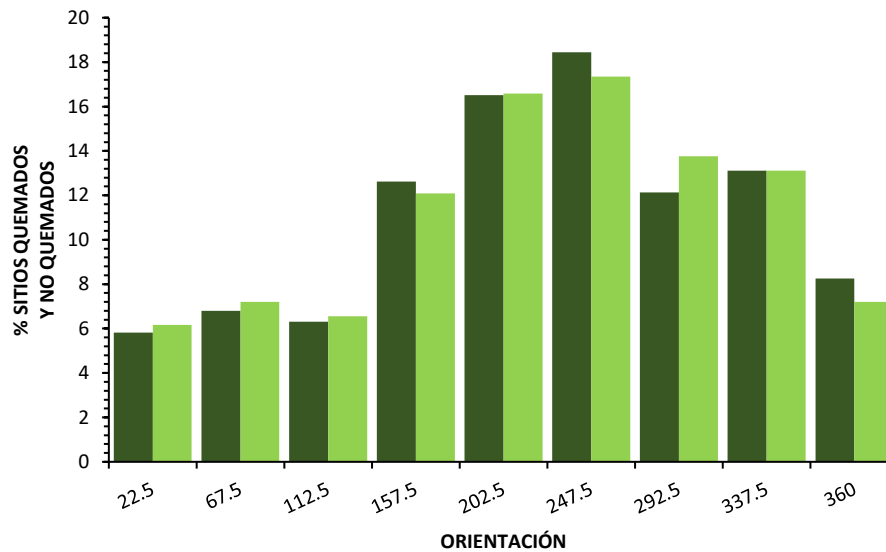


Figura 16. Frecuencia de sitios no quemados (gris) y quemados (negro) (2000 a 2014) según la orientación del sitio. Los valores de 0 a 22.5 corresponden a la orientación Norte; 22.5 a 67.5, al Noreste; 67.5 a 112.5, al Este; 112.5 a 157.5; al Sureste; 157.5 a 202.5, al Sur; 202.5 a 247.5, al Suroeste; 247.5 a 292.5, al Oeste; 292.5 a 337.5, al Noroeste y de 337.5 a 360, nuevamente al Norte.

Tabla 1. Tabla de valores p del coeficiente de correlación de Spearman para el NDVI, en sitios quemados y no quemados, con la geología y las variables del terreno. Los valores significativos aparecen en negritas.

NDVI	ELEVACIÓN		PENDIENTE		ACUMULACIÓN DE FLUJO		ORIENTACIÓN		GEOLOGÍA	
	Sitios Q	Sitios NQ	Sitios Q	Sitios NQ	Sitios Q	Sitios NQ	Sitios Q	Sitios NQ	Sitios Q	Sitios NQ
Max abril	< 0.0001	0.493	0.947	0.56	0.448	0.746	0.249	0.048	0.061	0.121
Min abril	0.009	0.686	0.328	0.544	0.153	0.893	0.033	0.066	0.692	0.593
Promedio abril	0.001	0.471	0.712	0.788	0.182	0.798	0.09	0.052	0.224	0.961
Max agosto	0.004	0.695	0.393	0.486	0.608	0.749	0.183	0.141	0.875	0.848
Min agosto	< 0.0001	0.483	0.516	0.907	0.407	0.785	0.089	0.236	0.945	0.491
Promedio agosto	0.002	0.645	0.42	0.776	0.371	0.951	0.135	0.261	0.821	0.823

En cuanto a la pendiente o grado de inclinación del terreno, un 45 % de los sitios no quemados fueron casi planos (pendiente $<10^\circ$) y 36% fueron de baja a moderada pendiente ($10 < \text{pendiente} < 30$) (Fig. 17). El contraste entre quemado y no quemado no permitió rechazar su similitud en esta característica. Los análisis de correlación de NDVI con pendiente no mostraron correlación significativa alguna en los sitios de muestreo, tanto quemados como los que no se quemaron.

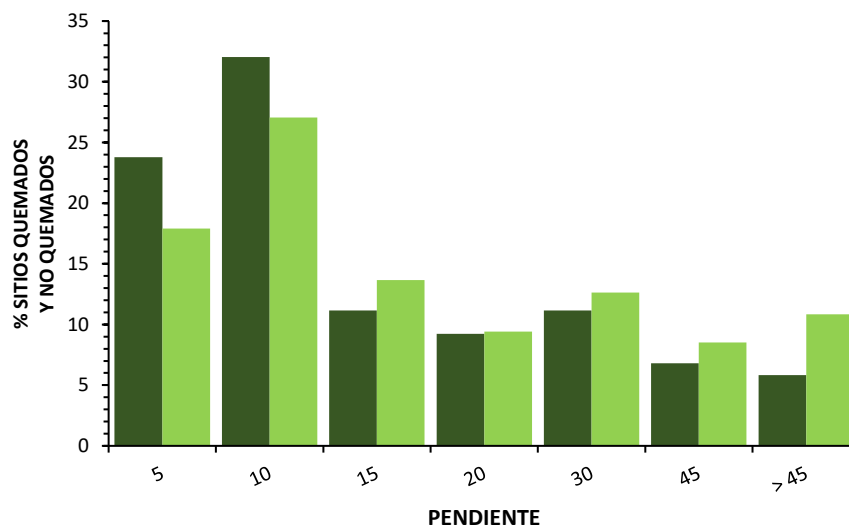


Figura 17. Frecuencia de sitios no quemados (gris) y quemados (negro) (2000 a 2014) según categorías de la pendiente del sitio, en grados.

A pesar de haber pendientes típicamente bajas, la distribución de acumulación de flujo evidenció laderas típicamente muy cortas: 60% de los sitios no quemados tenían áreas de <4 píxeles (Fig. 18). En este caso las distribuciones de no quemados y quemados no mostraron alguna diferencia y los análisis de correlación con NDVI no mostraron algún caso significativo.

De los 984 sitios, cerca del 50% se ubicaron sobre roca ígnea intrusiva (ácida, intermedia y básica) y el 20% sobre roca ígnea extrusiva intermedia y básica. El resto se distribuyó en varias rocas menos comunes. El porcentaje de sitios quemados y no quemados fue casi el mismo en cada categoría (Figura 19).

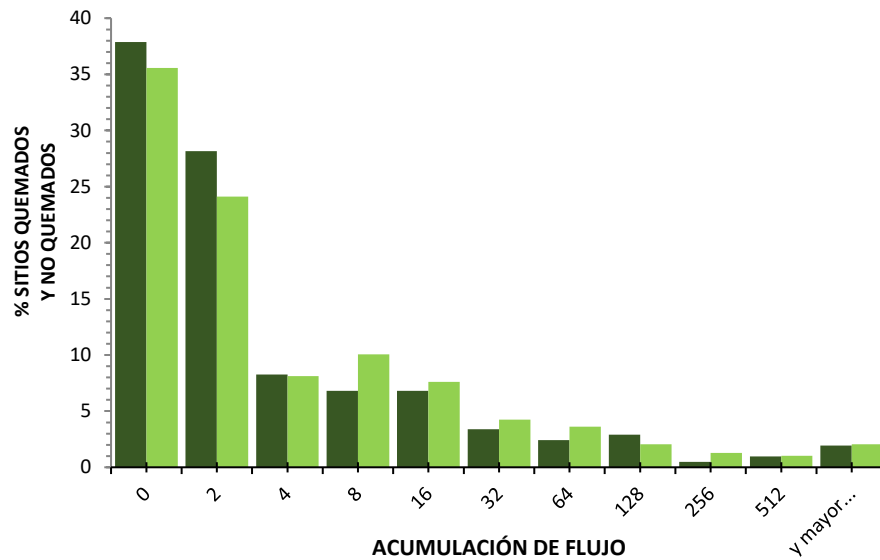


Figura 18. Porcentaje de sitios no quemados (gris) y quemados (negro) (2000 a 2014) según categorías de la acumulación de flujo del sitio, celdas arriba.

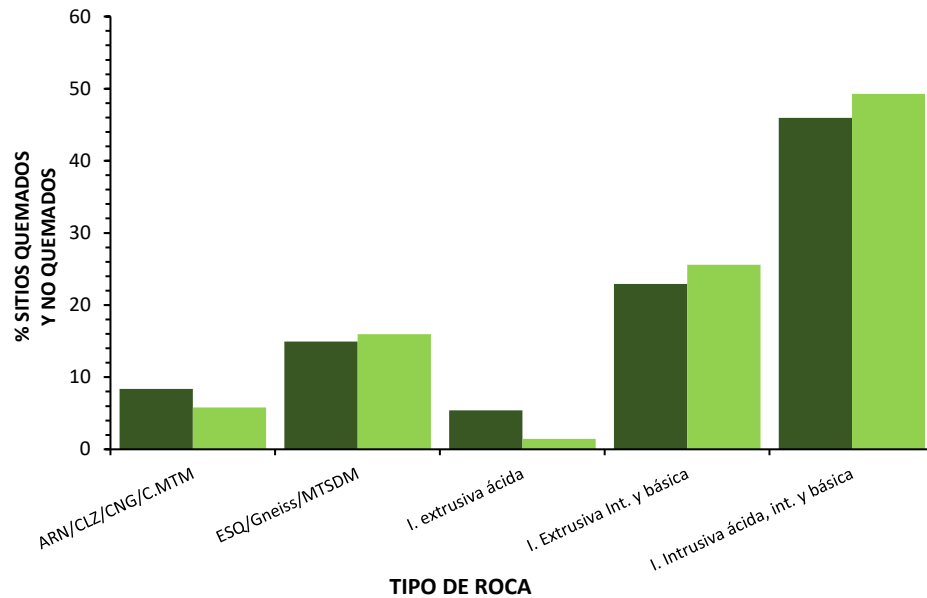


Figura 19. Frecuencia de sitios no quemados (verde claro) y quemados (verde oscuro) (2000 a 2014) según categorías geológicas de sustrato. ARN/CLZ/CNG/C.MTM, es el grupo de arenisca, caliza, conglomerado y complejo metamórfico; ESQ/Gneiss/MTSDM, el de esquistos, gneiss y metasedimentaria; ígnea extrusiva ácida; Ígnea extrusiva intermedia y básica e ígnea intrusiva ácida, intermedia y básica.

3.3 Estimación de la vegetación.

3.3.1 Variación temporal de NDVI.

Observando las variaciones interanuales de la precipitación y de los promedios del NDVI en sitios no quemados, tanto en abril como en agosto, se puede ver que estas presentaron variaciones semejantes (Figura 20). El índice promedio en agosto siempre fue menor al de abril, con casi el mismo patrón de altas y bajas pero con menor amplitud de variación. La precipitación del invierno anterior (noviembre a abril) presentó variaciones parecidas a estas.

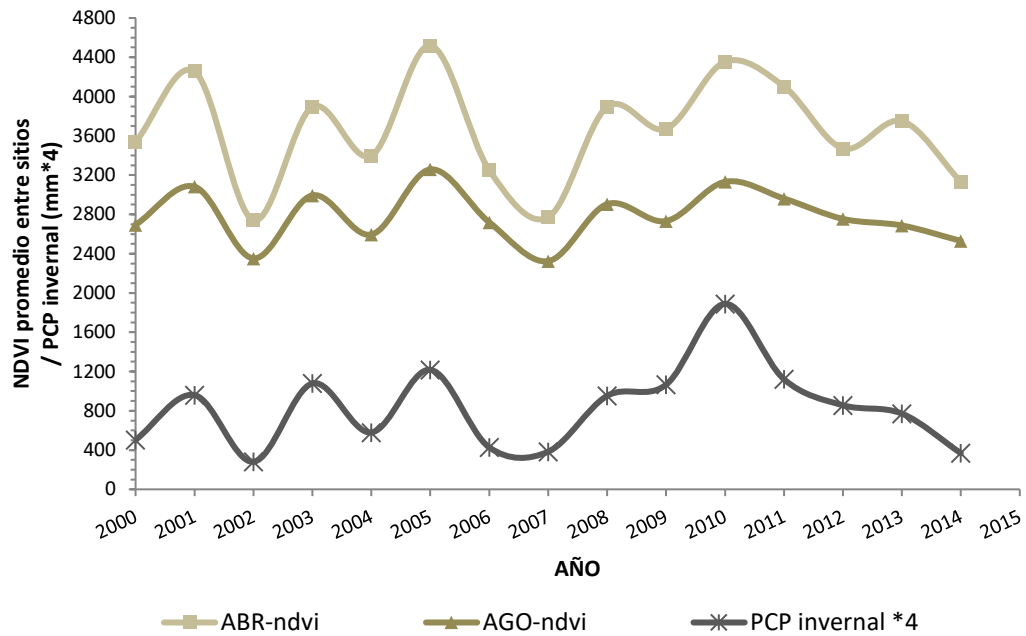


Figura 20. Series de tiempo del NDVI promedio entre sitios no quemados (2000- 2014) en abril y agosto, y de la precipitación total invernial (noviembre a abril) promedio entre 12 estaciones.

Para hacer las comparaciones más explícitas, se quitó la dimensión de tiempo y se hicieron regresiones de NDVI en sitios no quemados con la precipitación (Figura 21). La relación entre NDVI de abril y la precipitación fue muy fuerte pero notablemente no lineal. La misma relación funcionó bien para agosto, pero se destaca que el rango de variación en NDVI fue menor.

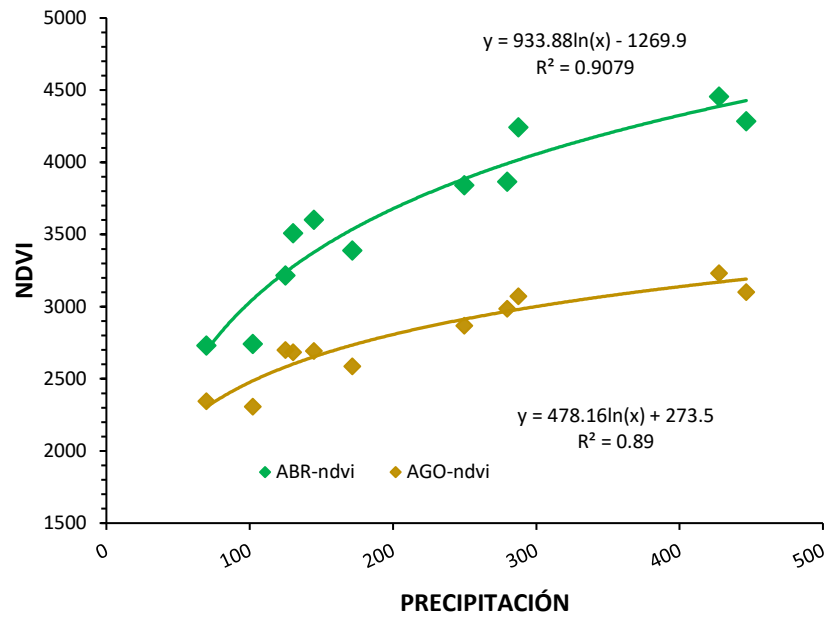


Figura 21. Relación entre NDVI promedio entre sitios no quemados y precipitación regionalizada del invierno previo, para NDVI de abril (gris) y de agosto (negro). Cada punto es el dato de un año.

3.3.2 NDVI en general y por sitios quemados.

La distribución de NDVI, promedio de abril de los 15 años en sitios que no se quemaron, se mostró casi unimodal (Fig. 22). En cambio para sitios que se quemaron, el NDVI de abril del año del incendio fue mayor y con una distribución más plana ($p < 0.0005$).

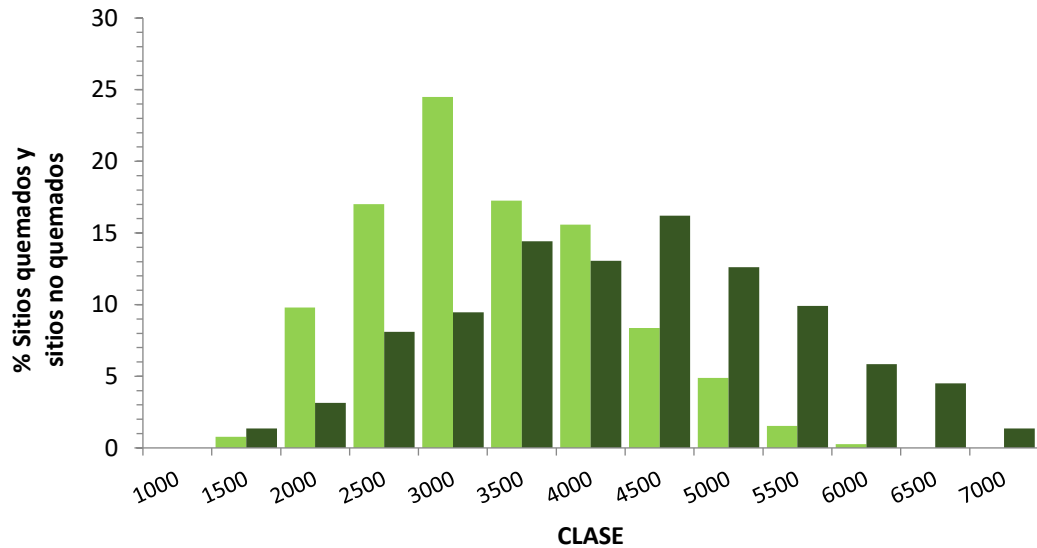


Figura 22. Porcentaje de sitios por categorías de NDVI, en abril en el año de quemarse (oscuro) y el promedio de abril de los años 2000 a 2014 para sitios que no se quemaron (claro), para un total de 983 sitios.

3.4 Recuperación de incendios.

3.4.1 En relación a la precipitación posterior.

Dado que el vigor de la vegetación fue estrechamente relacionado con la precipitación y para conocer qué tanta influencia tenía esta relación con la recuperación de la vegetación después de los incendios, se separaron los sitios quemados en dos grupos según la precipitación total en el invierno siguiente del incendio. El grupo de “primer invierno post incendio húmedo” (piH) experimentó precipitación mayor al promedio anual de los 15 años y el grupo de primer invierno seco (piS) experimentó un total menor al promedio. Esto correspondió a agrupar, para el grupo de las condiciones húmedas, a los incendios de los años 2000, 2002, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010 y 211, y para el grupo de las condiciones secas, agrupar a los incendios de los años 2003, 2005, 2006, 2012, 2013 y 2014. En todos los casos, los datos por sitios fueron organizados por años pre y post incendio, dejando el año calendario sin considerar. Se analizaron por separado los datos

de NDVI de abril y de agosto. Los promedios entre sitios para cada año de cada una de las cuatro series se presentan en la Figura 23.

El NDVI de abril, tanto pre y post incendio como del grupo piH y del piS, fue mayor que el de agosto. En agosto, los cambios en el promedio del NDVI se mostraron menos marcados que en abril, cuando se observaron picos muy altos o muy bajos en algunos años. En todos los casos, los análisis estadísticos fueron no-paramétricos.

Comparando NDVI entre casos con relativa sequía en el primer invierno (piS) post incendio contra los con condiciones más húmedas (piH) se encontró que hubo un menor NDVI con la sequía, tanto en abril como en agosto (Mann-Whitney $U = 5516.00$, $p < 0.0$ y $U = 5055.00$, $p < 0.0$, respectivamente). El NDVI mayor con piH que piS se mantuvo para los primeros tres años después de un incendio, para abril y para agosto (abril, $U > 3579.500$, $p < 0.019$; agosto $U > 3516.00$, $p < 0.031$). Para el cuarto año y para el promedio de los años cinco a nueve post incendio, las diferencias generadas en el primer invierno no se sostuvieron ($U > 1896$, $p > 0.08$).

Como otra indicación de la recuperación en sitios quemados se comparó el NDVI de años previos y posteriores al incendio, en particular el promedio del periodo de cinco a un año antes del incendio con el de cinco a nueve años después. Los resultados mostraron que los valores de abril no mostraron diferencias sustanciales ($U = 11030$, $p < 0.059$) mientras se rechazó la similitud para agosto ($U = 10483$, $p < 0.011$) con los valores posteriores al incendio todavía tendientes a ser menores a los previos.

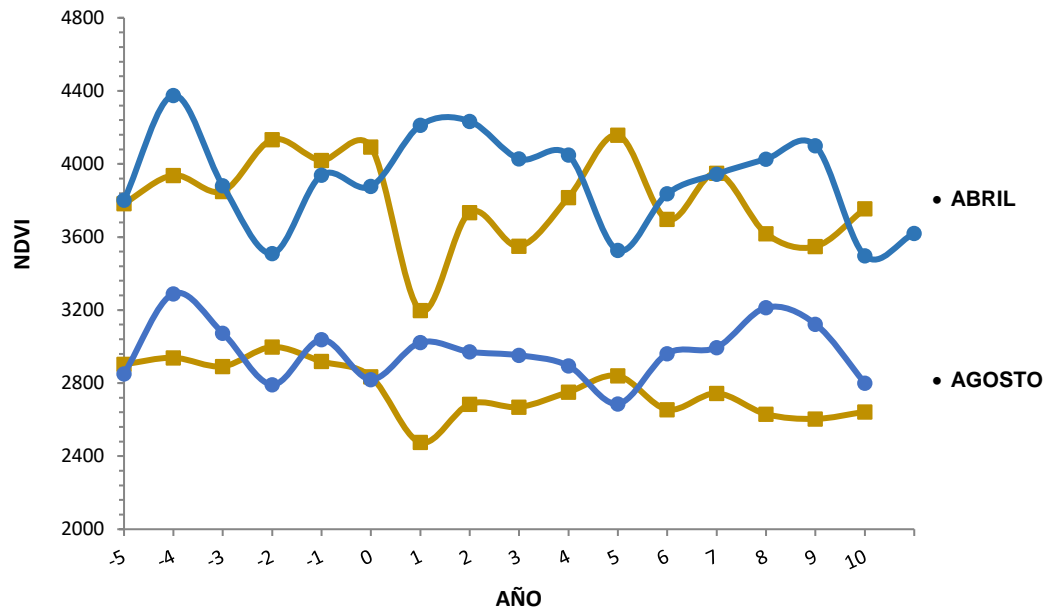


Figura 23. Series de tiempo de NDVI promedio para abril y agosto, para sitios que se quemaron, con datos ordenados por el número de años pre o post incendio, no por años calendario. Se separan los incendios en dos grupos, según la precipitación en el invierno siguiente al incendio fue mayor (años húmedos, azul) o menor (años secos, café) que la precipitación promedio.

3.4.2 En relación al terreno y NDVI anterior

Para evaluar simultáneamente a posibles efectos en la regeneración de las características del terreno y el NDVI pre-incendio, se empleó el análisis de árboles de regresión, el cuál encuentra efectos en jerarquía y admite la posibilidad de varias combinaciones (cada una jerárquica) de factores, o sea más de un modelo en un paisaje complejo. Considerando la recuperación del índice de abril (a 1, 2, 3, 4 y 5 a 9 años posteriores), la única variable significativa en la recuperación fue el NDVI promedio de abril previos al incendio, excepto por un efecto de la precipitación en el primer año. Para la recuperación de estatus que presenta la vegetación en agosto, la vegetación de abril previos fue significativo y menor posición la elevación del sitio.

3.4.3 En cicatrices particulares.

Dados los problemas de localización de áreas quemadas con los datos de FIRMS y de CONAFOR, y por ende de la incertidumbre si los valores de NDVI pertenecieron a píxeles quemados o no, se probó el análisis de NDVI pre y post incendio para cuatro quemas delimitadas por sus cicatrices, aplicando el cociente de quema normalizado o NBR (ver procedimiento en el capítulo 2) con píxeles de 30 m (Figura 18).

Se obtuvieron los valores de NDVI en 500 píxeles, dentro y fuera de la cicatriz. Los valores dentro de tres cicatrices de incendio se observaron notoriamente disminuidos en las fechas posteriores al incendio, comparados a los de fechas antes de la quema (Figura 23 A, B, D). Sin embargo, en el tercer caso, a pesar de identificar una cicatriz por Δ NBR, no se pudo apreciar afectación alguna por el incendio al NDVI (Figura 23C). Por otro lado, en el área búfer hubo cambio apreciable en un solo caso (Figura 23D). Pareciera posible que las cicatrices tuvieron NDVI mayor que el búfer antes del incendio, pero no se aplicaron pruebas a este limitado grupo de casos. Al menos es aparente que el NDVI en el borde de incendio no fue fuertemente contrastante con el del área quemada.

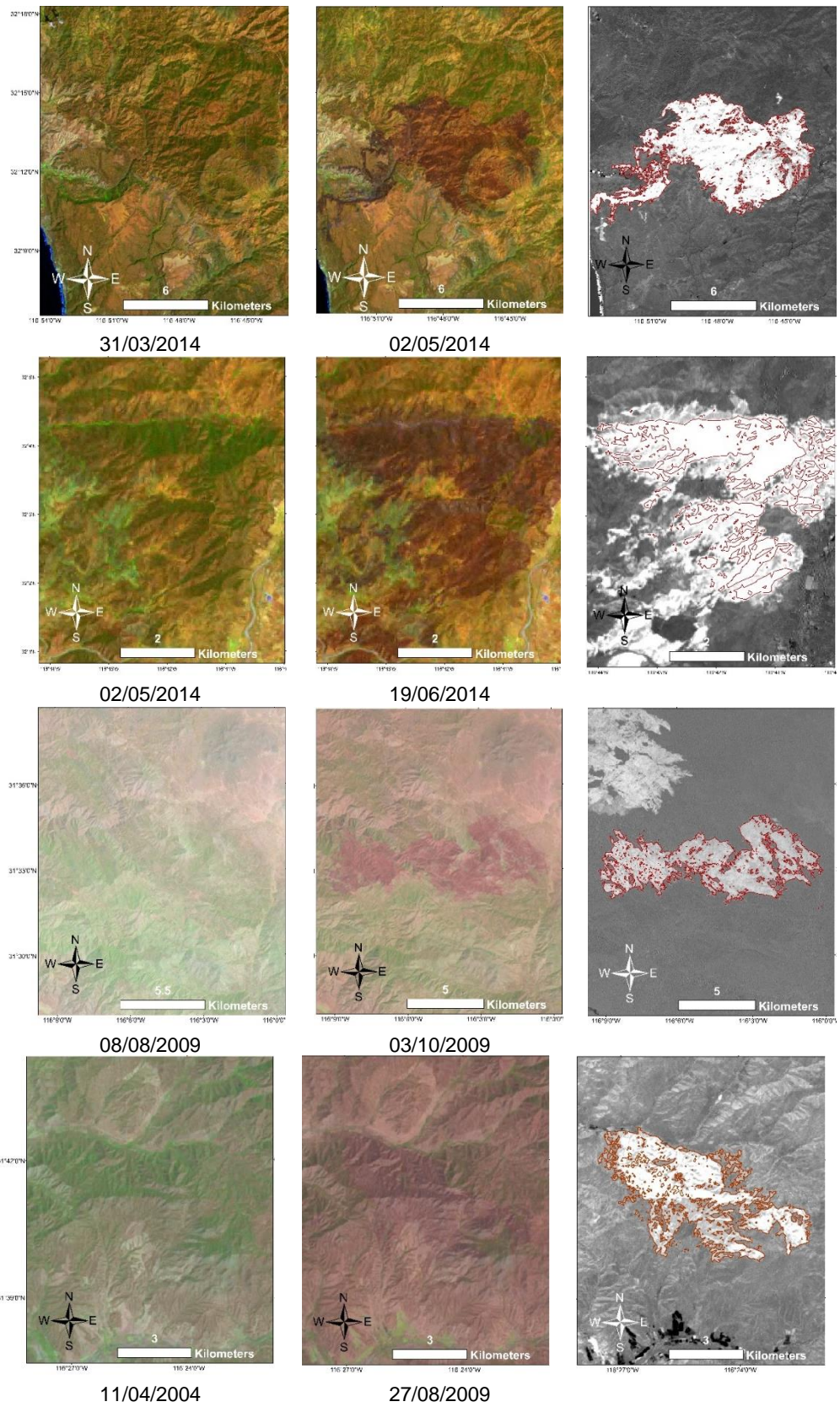


Figura 24. Ejemplos de las imágenes pre-incendio (izquierda), post-incendio (centro) y del Δ NBR (derecha) calculado por diferencia entre NBR pre y post incendio, aplicando ArcGis a la delimitación de las cicatrices.

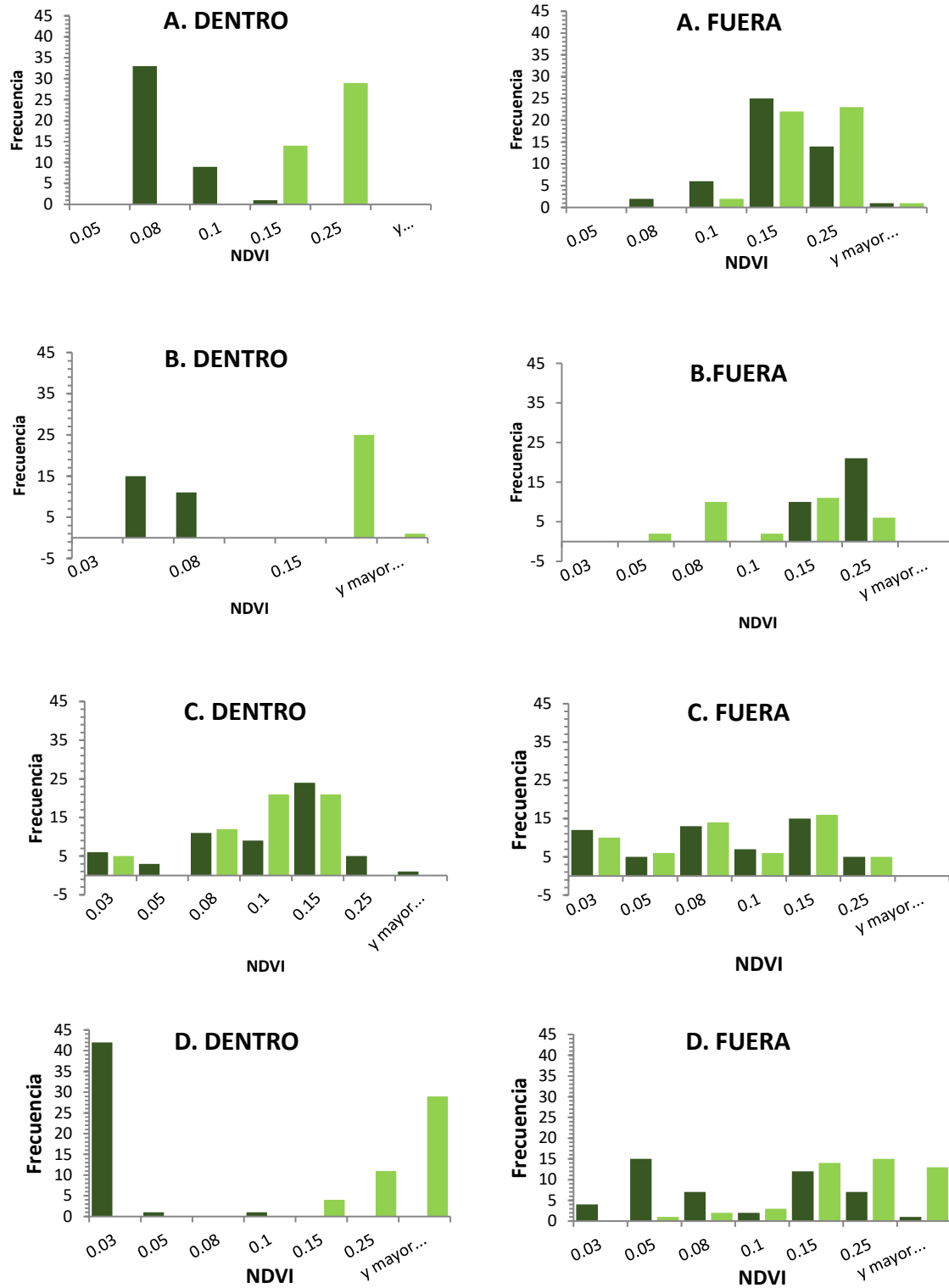


Figura 25. Frecuencia de niveles de NDVI en imágenes Landsat 8 (A y B), Landsat 7 (C) y Landsat 5 (D), en las áreas de los cuatro incendios focales, pre incendio (verde claro) y post incendio (verde oscuro) del incendio en el área quemada y en un buffer alrededor .

Para la cicatriz D, se recuperó la trayectoria del NDVI, en abril y agosto, de los años 2000 al 2014 (Figura 24) con las imágenes MOD13Q1 de MODIS, usando 500 píxeles MODIS en el interior de la cicatriz. El incendio ocurrió en mayo de 2004 y con los valores de NDVI de agosto se observa el efecto del incendio en el mismo año. El NDVI aumentó en 2005 para volver a disminuir en 2006 y 2007. Observando los valores en relación con la precipitación invernal (Figura 19), siendo un caso correspondiente a los de “primer invierno húmedo”, se puede notar que su NDVI sigue una trayectoria similar. Pareciera haber recuperado la mitad de lo perdido para 2008 en adelante, sin mantener una tendencia de aumento.

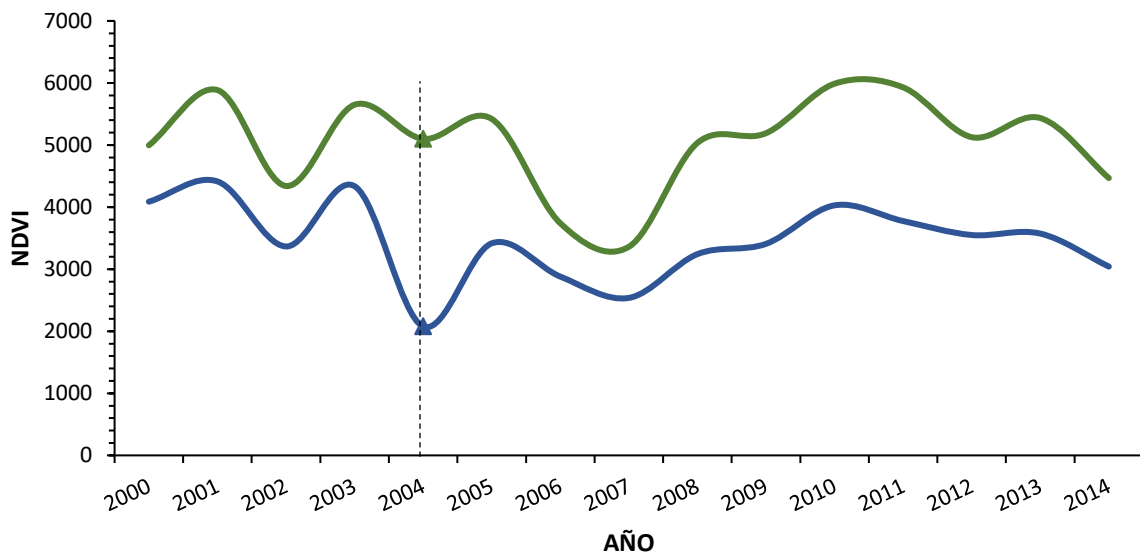


Figura 26. Serie de tiempo del promedio de NDVI (MODIS) en abril (verde) y agosto (azul) años antes y después del incendio en los sitios focales. El marcador indica el año del incendio (mayo de 2004).

Capítulo 4. Discusión.

4.1 Los siniestros y el ecosistema

Los incendios en los matorrales mediterráneos del noroeste de Baja California presentan una variación estacional muy fuerte, con el máximo de superficie quemada entre los meses de julio y septiembre. Las condiciones atmosféricas son muy importantes, particularmente la sequía de verano, pero en cierta medida y ocasiones especiales, también la desecación aguda y viento de la condición "Santa Ana". Por el lado espacial, es claro que hay zonas más propensas a incendios, resultado que se relaciona con las fuentes de ignición, casi exclusivamente antropogénicas (CONAFOR, datos no publicados). A una escala interanual, no hay relación aparente inmediata ni rezagada entre precipitación y superficie quemada.

También en el panorama general, se debe hacer hincapié en la poca extensión de la gran mayoría de incendios y extrema importancia, por superficie, del 1% que llegan a ser grandes (Keeley et al 1999). El presente estudio de sitios aleatorios no es lo mejor para representar estos grandes incendios, aunque sea apropiada para la hipótesis de control de la incidencia del fuego por el combustible a escalas finas de espacio y tiempo (Minnich 2001)

De cualquier forma, se hace hincapié en la similitud (en cuanto a NVDI y NBR) de la vegetación que se quema y la que forma el entorno de la quema: este estudio no demostró alguna barrera vegetal a la propagación del incendio. A escala regional se notó un enorme solapamiento de NDVI entre los sitios quemados y no; solamente a NDVI < 1500 no hubo sitio no quemados y a >7000 no hubo quemados. Se concluye que las condiciones de ignición y el estado de tiempo puedan ser más influyentes que el estado del combustible, lo que concuerda con otros estudios (p.ej Henry & Hope 1998).

El análisis mostró que la precipitación es un factor dominante en el desarrollo anual de la vegetación (NDVI), con influencia por el terreno solamente en cuanto a elevación (posiblemente por su efecto en la precipitación). Mientras tanto, hay que recordar que el NDVI representa cantidad de clorofila y estado de turgencia de la vegetación y no

crecimiento ni reproducción, y menos la composición o estructura leñosa de la vegetación. Hanes (1977) menciona que los factores que afectan la recuperación estructural y florístico post-incendio del chaparral incluyen la elevación, topografía, pendiente, aspecto y patrones climáticos. Estudios posteriores sostienen la influencia de estos factores en la vegetación si bien pocos tratan de la recuperación (Hanes 1971, Franklin et al 2000, Meentemeyer et al 2001). El presente trabajo, al apuntar a una muestra grande en poco tiempo, se sostiene con un índice de vegetación. En cuanto a la geología de la zona y características del terreno, no se observó una relación entre la distribución de incendios o la recuperación de matorral. Falta considerar los suelos, con los cuales hay mucho por hacer en mejorar el entendimiento y mapeo en la región y su relación con el terreno y la geología. Posiblemente habría mayor provecho con estudios de índices espectrales relevantes a la fracción leñosa en vegetación viva.

Se observa un alto impacto de incendios seguidos por años de sequía. Keeley & Keeley (1981) encontraron que los cambios tempranos en la cobertura temporal después de un incendio están fuertemente relacionados con los patrones de precipitación. En coincidencia, Henry & Hope (1998) reportaron que ni el NDVI ni el SAVI siguieron los patrones esperados de recuperación post-incendio. Explican que las variaciones interanuales de precipitación tienen un efecto dominante en las variaciones de los índices espectrales de chaparral. Los presentes resultados también demuestran un efecto fuerte (y multianual) de la poca o mucha precipitación del primero año posterior al incendio. A plazo un poco más largo, el análisis demostró que existe recuperación del NDVI en sitios quemados en un periodo de 9 años, especialmente si hay buena precipitación en el invierno siguiente del incendio. Mientras tanto, las variaciones o cambios multianuales puedan estar llevando el sistema por otro rumbo: la vegetación no quemada parece mostrar en peor estado en los últimos años del estudio que en los primeros.

En California se ha reportado un abundante crecimiento de herbáceas durante el primer año posterior al incendio, que va disminuyendo hacia el tercer año, cuando los arbustos empiezan a ganar cobertura a las herbáceas (Keeley xxx, Keeley & Keeley 1981). En el presente estudio, los mayores valores y eventual mayor recuperación del NDVI para abril que para agosto podría reflejar mayor contribución por las hierbas que arbustos, pero hacen falta comprobaciones extensas en campo.

En cuanto a la resiliencia, ha habido varios estudios indicando la posibilidad de desviar la recuperación de los matorrales. Una vía reconocida es un intervalo corto entre incendios (p. ej. Zedler 1982), el cual no permite la reproducción de ciertas especies que mueren en los incendios. Otra vía es un por la invasión de plantas herbáceas exóticas, compitiendo exitosamente por agua con los arbustos y proveyendo a muy corto plazo suficiente combustible para sostener otro incendio. Por ambas vías la regeneración de los arbustos se reduce (Minnich & Dezzani 1998). Hay que notar que estos escenarios refieren a cambios en la estructura y la composición de la vegetación, y su dinámica, pero no hacen referencia a cambios en la cobertura. En este aspecto, los resultados sobre los efectos a corto plazo de variación climática, de Henry & Hope (1998) y otros, más el presente estudio, son de mayor relevancia.

4.2 Problemas de localización

Para todos los propósitos de este trabajo como también para aminorar riesgos y enfrentar siniestros, es importante el correcto mapeo de incendios y las cicatrices que éstos dejan.

En este trabajo, para calcular el área quemada por año, como para identificar los sitios donde estudiar recuperación, se utilizaron los puntos calientes FIRMS. También se obtuvo una base de datos de incendios de CONAFOR con el propósito de complementar el estudio. No obstante, al tratar de unificar la información, se encontraron discrepancias entre el tamaño de las áreas y la ubicación de los incendios. Estas discrepancias pueden deberse a la forma en que se toman o procesan los datos en ambos casos. Por ejemplo, los datos de CONAFOR, se ha presentado como un solo punto por incendio, pero los puntos no son siempre centrales o de un costado determinado, ni ha habido otra información sobre la geometría de la superficie quemada. (Recientemente se han registrado algunos polígonos.) Por su lado, los datos de FIRMS no se refieren al píxel mínimo de los sensores de MODIS, sino a una superficie de un kilómetro cuadrado. De haber píxeles de detección calientes adyacentes, que debería ocurrir con frecuencia, se aumenta la incertidumbre adentro de los píxeles del producto. Para los propósitos de presente trabajo, la incertidumbre sobre los píxeles afectados del MOD13Q1 implica que

este trabajo podría haber incorporado una cantidad desconocida de píxeles no quemados en la categoría de quemados, subestimando efectos del incendio y sobreestimando recuperación. Otro tipo de incertidumbre importante con FIRMS es que la imagen refiere a un instante, pero el paso de los incendios es típicamente rápido. FIRMS reporta sobre una escala cuantitativa. Sin embargo, la representación de tierras quemadas en las últimas 24 horas es difícil de apreciar. Esta representación seguramente varía con la condición previa de la vegetación y las condiciones físicas durante la quema. Confirmar las quemas de FIRMS podría proveer datos para probar esta idea.

Respecto a la compaginación de datos de CONAFOR y FIRMS, se verificó que no se debiera a un corrimiento de las capas, particularmente considerando la diferencia en las resoluciones espaciales de las mismas.

También se observó una gran diferencia entre la superficie total quemada cada año calculada con FIRMS y las sumadas de los registros por CONAFOR, siendo mucho mayores las áreas según FIRMS en todos los años. Puede ser que el mismo sistema de FIRMS de generalizar a 1 km sea responsable, siendo poco probable que cada píxel se haya quemado justamente en su totalidad. Los patrones de los dos registros fueron muy parecidos, tanto que su correlación lineal de 0.6. Tanto para la perspectiva histórica como para el registro contemporáneo, habría que sostener el mapeo y estadística en Landsat y ΔNBR o de percepción remota de mayor resolución (siempre con el problema de nubosidad para imágenes satelitales de días individuales), o bien, en registros terrestres completos. Por supuesto el sistema FIRMS sigue siendo una herramienta importante para ayudar en la detección de incendios en terreno inaccesible.

Por azar, se presentó un caso de poder delimitar con ΔNBR a un incendio detectado por Landsat 8, en el cual el incendio no tuvo efecto aparente en la vegetación en la misma cicatriz. De especial curiosidad es que los píxeles de muestreo (MODIS, 250 m) tuvieron una distribución multimodal parecida antes y después del incendio, con una $r = -0.609$. Sin estudio en el sitio, se puede proponer algunas interpretaciones como hipótesis alternativas. 1) Por la forma irregular de la quema, muchos píxeles de MODIS solapan el borde y el área exterior. 2) La quema incluye muchos manchones de vegetación no quemada adentro (resultado notorio en otro caso estudiado). 3) La vegetación difiere de

otros sitios por tener componentes importantes de plantas suculentas; al quemarse los arbustos y hierbas no suculentas (tal vez ya en pobre estado de “verdor”), se dejó una huella para Δ NBR pero no un efecto fuerte en NDVI.

Con el análisis de las cicatrices delimitadas por Δ NBR, pudo observarse el efecto del incendio dentro de tres de cuatro cicatrices, con una disminución notoria en NDVI respecto al exterior. Al mismo tiempo, se pudo observar solapamiento de las distribuciones de NDVI, lo cual hace evidente que los incendios no arrasaron con todo. Por otro lado, sujeto a estudio a una escala más fina y en especial con el mismo NBR, los datos no indicaron que los incendios fueron limitados en mayor medida por encontrarse con otra vegetación, al menos en cuanto a NDVI. El inconveniente que presenta este método es que, debido a la nubosidad que presentan las imágenes Landsat, es difícil trabajar con fechas más o menos específicas, y se tiene que aceptar que no sean muy próximas al mismo incendio.

4.3 Recomendaciones

Se recomienda el mapeo en tierra de decenas de incendios para evaluar similitudes y diferencias de los perímetros con aquellos que se puede reconstruir por NBR y FIRMS.

Suponiendo que NBR se muestra robusto, es preciso y prioritario un estudio de 40 años mediante NBR con imágenes Landsat, para establecer la base más confiable de perímetros e intensidades de los incendios y permitir estudios precisos de recuperación y de recurrencia. Esto implica un trabajo masivo de procesamiento y filtrado de imágenes, al menos semi-supervisado.

Falta mucho trabajo en campo para relacionar NDVI y otros índices con variaciones tanto estructurales como de composición de la vegetación, de preferencia con conocida edad y en al menos abril y agosto, en años secos y húmedos.

Debido a que este trabajo se llevó a cabo con imágenes de MODIS, el período de muestreo es corto comparado con la vida potencial de las plantas dominantes y el tiempo

esperado (en teoría) de recurrencia de incendios. Faltan décadas de estudio para estudiar y observar un proceso más o menos completo de recuperación, o una base fuerte en el estudio retrospectivo mencionado.

Por más que el presente trabajo es muy extensivo (por número de sitios y por la región estudiada), la variedad de condiciones del terreno y la secuencia de condiciones climáticas, combinadas con contar solamente con 15 años, hacen que el número de incendios en la muestra sea relativamente bajo para ponderar los efectos. Se hace hincapié en la necesidad de estudios a largo plazo.

Se enfatiza lo que ya se sabe, que los incendios en matorrales de Baja California son principalmente antropogénicos. Hay mucho que hacer para reducir su incidencia.

Si el sistema de procesamiento de FIRMS no se hace más fino, sería altamente recomendable no utilizarlo para el mapeo sino que aumentar esfuerzos para registrar los perímetros de todos los incendios en campo. Esto puede corresponder a un consorcio de Protección Civil y las Secretarías de Protección al Ambiente y Fomento Agropecuario de Estado, CONAFOR y SAGARPA y otros.

Faltan series de tiempo y datos actuales de precipitación, temperaturas (y humedad relativa) para sitios entre 600 y 2000 (o 3000) metros elevación para poder entender los parámetros de la dinámica planta-clima.

Faltan mapas con muy fuertes bases en muestreo, de la profundidad del suelo y su textura, para poder probar esta base influye en la recuperación de la vegetación o en su susceptibilidad a quemarse.

Capítulo 5. Conclusiones.

De los varios análisis que se realizaron, en cuanto a la distribución de los incendios, los resultados mostraron que las características del terreno no tienen influencia en la posibilidad de quemarse de la vegetación. Lo anterior puede deberse por un lado a la variabilidad de los insumos utilizados y, por otro, tanto a que los matorrales del noroeste de Baja California presentan una dinámica propia e independiente de los factores topográficos, como a la cantidad de combustible presente en el sitio antes de incendiarse.

La precipitación invernal resultó ser influyente en la recuperación de la vegetación a corto plazo, por otro lado, un factor persistente en todos los casos fue el estado previo de la vegetación en abril anteriores. Podría decirse que es el sitio en sí el que determina el estado de la vegetación, independientemente de la recuperación. Las características del terreno no afectaron la recuperación de los matorrales, a excepción de la elevación para el NDVI de agosto. Aunque por falta de una caracterización de suelos adecuada para ese tipo de estudios, como en el caso de topografía, ésta suposición no es concluyente.

En cuanto a la distribución temporal de los incendios, se presenta la máxima superficie quemada entre los meses de julio y septiembre, lo que está asociado a las temporadas en que la vegetación es más combustible debido a escasas de lluvia y al aumento de la temperatura, a escala interanual no parece haber un efecto definido de precipitación total en la superficie quemada por año.

Hablando de recuperación, es importante aclarar que lo que se está analizando con el NDVI es la recuperación del “verdor” de la vegetación, es decir de la cobertura, que es lo que nos interesa en cuanto a reducción de erosión y de albedo. Este proceso es rápido (10 años o menos) en relación con la recuperación en cuanto a estructura y composición de la vegetación (15 a 20 años o más).

El cociente de quema normalizado (NBR) es una mejor opción para mapear y delimitar cicatrices de incendio, para posteriormente, analizar la recuperación de la vegetación

apoyándose en índices de vegetación. Los registros de CONAFOR y FIRMS no son adecuados para delimitar superficies quemadas, por lo tanto meten incertidumbre en el análisis de la recuperación.

Literatura Citada

- De Jesús Angoa-Román, M., Bullock, S. H., & Kawashima, T. 2005. Composition and dynamics of the seed bank of coastal scrub in Baja California. *Madroño*, 52(1), 11-20.
- Black, C. H. 1987. Biomass, nitrogen, and phosphorus accumulation over a southern California fire cycle chronosequence. In *Plant response to stress* (pp. 445-458). Springer Berlin Heidelberg.
- Brandege, T. S. 1891. The vegetation of "burns.". *Zoe*, 2, 118-122.
- Branson, F. A. 1975. Natural and modified plant communities as related to runoff and sediment yields. In *Coupling of Land and Water Systems* (pp. 157-172). Springer Berlin Heidelberg.
- Bullock, S. H. 1999. La vegetación del noroeste de Baja California en el contexto de la inestabilidad ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72, 501-516.
- Carpenter, S. R., Mooney, H. A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R. S., Díaz, S., Dietz, T., Duraiappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Henrique, M.P., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhán, J., Scholes, R.J. & Whyte, A. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 1305-1312.
- Chen, F., Weber, K. T., & Schnase, J. L. 2012. Assessing the Success of Postfire Reseeding in Semiarid Rangelands Using Terra MODIS. *Rangeland Ecology & Management*, 65(5), 468-474.
- Chou, Y. H., Minnich, R. A., & Dezzani, R. J. 1993. Do fire sizes differ between southern California and Baja California?. *Forest Science*, 39(4), 835-844.
- Cocke, A. E., Fulé, P. Z., & Crouse, J. E. 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 189-198.
- Cooper, W. S. 1922. *The broad-sclerophyll vegetation of California: an ecological study of the chaparral and its related communities* (No. 319). Carnegie Institution of Washington.
- Countryman, C. M. & Philpot, C.W. 1970. Physical characteristics of chamise as a wildland fuel. USDA Forest Service Research Papers PSW-66. 16 pp.
- Delgadillo, J. 1992. *Floristic and ecological study of northern Baja California*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Desimone, S. A., & Burk, J. H. 1992. Local variation in floristics and distributional factors in Californian coastal sage scrub. *Madrono*, 170-188.

- Dozier, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of environment*, 11, 221-229.
- Duncan, J., Stow, D., Franklin, J., & Hope, A. 1993. Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 14(18), 3395-3416.
- Engel, E., & Abella, S. R. 2011. Vegetation recovery in a desert landscape after wildfires: influences of community type, time since fire and contingency effects. *Journal of Applied Ecology*, 48(6), 1401-1410.
- Ernst, W. G., Van de Ven, C. M., & Lyon, R. J. P. 2003. Relationships among vegetation, climatic zonation, soil, and bedrock in the central White-Inyo Range, eastern California: A ground-based and remote-sensing study. *Geological Society of America Bulletin*, 115(12), 1583-1597.
- Field, C. B., Daily, G. C., Davis, F. W., Gaines, S., Matson, P. A., Melack, J., & Miller, N. L. 1999. Confronting climate change in California. *Ecological impacts on the Golden State. A report of the Union of Concerned Scientists, Cambridge, Massachusetts, and the Ecological Society of America, Washington, DC.*
- Franklin, J., McCullough, P., & Gray, C. 2000. Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California. *Terrain analysis: principles and applications/edited by John P. Wilson, John C. Gallant.*
- Franklin, J., Syphard, A. D., He, H. S., & Mladenoff, D. J. 2005. Altered fire regimes affect landscape patterns of plant succession in the foothills and mountains of southern California. *Ecosystems*, 8(8), 885-898.
- Fraser, R. H., Li, Z., & Cihlar, J. 2000. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 362-376.
- García, M., & Chuvieco, E. (2004). Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 414-423.
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., ... & Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5(1), 28-41.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote sensing of environment*, 87(2), 273-282.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10).
- Goetz, A. F., Rock, B. N., & Rowan, L. C. (1983). Remote sensing for exploration; an overview. *Economic Geology*, 78(4), 573-590.

- González-Abraham, C. E., Garcillán, P. P., & Ezcurra, E. (2010). Ecorregiones de la península de Baja California: Una síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (87), 69-82.
- González-Abraham, C.E., Garcillán, P.P., Ezcurra, E., Allen, M., Barrows, C., Beltrán, J.M., Delgadillo, J., Felger, R.S., Franco-Vizcaíno, E., Gondor, A., Hinojosa, A., León de la Luz, J.L., Mellink, E., Morrison, S., Oberbauer, T.A., Preston, K., Rotenberry, J., Salazar, M. & Vanderplank, S. 2010. Ecoregiones de la península de Baja California: una síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 87: 69-82.
- González-Botello, M. A., & Bullock, S. H. (2012). Erosion-reducing cover in semi-arid shrubland. *Journal of Arid Environments*, 84, 19-25.
- Haidinger, T. L., & Keeley, J. E. (1993). Role of high fire frequency in destruction of mixed chaparral. *Madrono*, 141-147.
- Hanes, T. L. (1971). Succession after fire in the chaparral of southern California. *Ecological monographs*, 41(1), 27-52.
- Henry, M. C., & Hope, A. S. (1998). Monitoring post-burn recovery of chaparral vegetation in southern California using multi-temporal satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(16), 3097-3107.
- Horton, J. S., & Kraebel, C. J. (1955). Development of vegetation after fire in the chamise chaparral of southern California. *Ecology*, 36(2), 244-262.
- Huete, A. R. (1989). Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. *Theory and applications of optical remote sensing*, 107-141.
- Hunt, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30(1), 43-54.
- Keeley, J. E. (1991). Seed germination and life history syndromes in the California chaparral. *The Botanical Review*, 57(2), 81-116.
- Keeley, J. E., & Fotheringham, C. J. (2001). Historic fire regime in southern California shrublands. *Conservation Biology*, 15(6), 1536-1548.
- Keeley, J. E., & Fotheringham, C. J. (2001). History and Management of Crown-Fire Ecosystems: a Summary and Response. *Conservation Biology*, 15(6), 1561-1567.
- Keeley, J. E., Fotheringham, C. J., & Morais, M. (1999). Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes. *Science*, 284(5421), 1829-1832.
- Keeley, J. E., & Keeley, S. C. (1981). Post-fire regeneration of southern California chaparral. *American Journal of Botany*, 524-530.
- Keeley, J. E., & Keeley, S. C. (1984). Postfire recovery of California coastal sage scrub. *American Midland Naturalist*, 105-117.

- Keeley, J. E., & Keeley, S. C. (1987). Role of fire in the germination of chaparral herbs and suffrutescents. *Madroño*, 240-249.
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system Ogden, Utah: USDA Forest Service, Rocky Mountain Res. Station.*
- Knight, A., Connor, E. & Rubenstein, P. 1984. Effects of shrubland management on streams. Pp. 61-73 en: DeVries, J.J. (ed.), *Shrublands in California: Literature Review and Research Needed for Management*. Contribution 191. Water Resources Center, University of California, Davis.
- Garcia, M. L., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1), 31-37.
- Marchetti, M., Ricotta, C., & Volpe, F. (1995). A qualitative approach to the mapping of post-fire regrowth in Mediterranean vegetation with Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(13), 2487-2494.
- Matson, M., & Dozier, J. (1981). Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(9), 1311-1318.
- McMichael, C. E., Hope, A. S., Roberts, D. A., & Anaya, M. R. (2004). Post-fire recovery of leaf area index in California chaparral: a remote sensing-chronosequence approach. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21), 4743-4760.
- Meentemeyer, R. K., Moody, A., & Franklin, J. (2001). Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral—the role of topographically mediated resource gradients. *Plant Ecology*, 156(1), 19-41.
- Meng, R., Dennison, P. E., D'Antonio, C. M., & Moritz, M. A. (2014). Remote sensing analysis of vegetation recovery following short-interval fires in southern California shrublands. *PloS one*, 9(10), e110637.
- Assessment, M. E. (2003). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 200). Washington, DC: Island Press.
- Miller, J. D., & Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66-80.
- Minnich, R. A. (1983). Fire mosaics in southern California and northern Baja California. *Science*, 219(4590), 1287-1294.
- Minnich, R. A. (2001). An integrated model of two fire regimes. *Conservation Biology*, 15(6), 1549-1553.

- Minnich, R. A., & Dezzani, R. J. (1998). Historical decline of coastal sage scrub in the Riverside-Perris Plain, California. *Western Birds*, 29(4), 366-391.
- Mooney, H. A., Field, C., Gulmon, S. L., & Bazzaz, F. A. (1981). Photosynthetic capacity in relation to leaf position in desert versus old-field annuals. *Oecologia*, 50(1), 109-112.
- Mooney, H. A., & Harrison, A. T. (1972). The vegetational gradient on the lower slopes of the Sierra San Pedro Martir in northwest Baja California. *Madroño*, 21(6), 439-445.
- Mooney, H. A., & Parsons, D. J. (1973). Structure and function of the California chaparral—an example from San Dimas. In *Mediterranean Type Ecosystems*(pp. 83-112). Springer Berlin Heidelberg.
- Moritz, M. A., Keeley, J. E., Johnson, E. A., & Schaffner, A. A. (2004). Testing a basic assumption of shrubland fire management: how important is fuel age?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(2), 67-72.
- Okin, G. S. (2008). A new model of wind erosion in the presence of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
- Parsons, D. J. (1976). Vegetation structure in the mediterranean scrub communities of California and Chile. *The Journal of Ecology*, 435-447.
- Pase, C.P. & Brown, D.E. 1982a. Californian coastal scrub. en: Brown, D.E. (ed.), Biotic Communities of the American Southwest: United States and Mexico. Desert Plants 4: 86-90
- Pase, C.P. & Brown, D.E. 1982b. Interior chaparral. en: Brown, D.E. (ed.) Biotic Communities of the American Southwest: United States and Mexico. Desert Plants 4: 95-99.
- Paysen, T. E., & Cohen, J. D. (1990). Chamise chaparral dead fuel fraction is not reliably predicted by age. *Western Journal of Applied Forestry*, 5(4), 127-131.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 4(2), 439-473.
- Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., & Running, S. W. (2002). The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), 1705-1719.
- Pitman, A. J., Narisma, G. T., Pielke, R. A., & Holbrook, N. J. (2004). Impact of land cover change on the climate of southwest Western Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D18).

- Rice, R.M. 1973. The hydrology of chaparral watersheds. Pp. 27-34 en: Proceedings, Symposium on Living with the Chaparral. Sierra Club, San Francisco.
- Rice, R. M., Crobett, E. S., & Bailey, R. G. (1969). Soil slips related to vegetation, topography, and soil in southern California. *Water Resources Research*, 5(3), 647-659.
- Rogan, J. & Franklin, J. 2001. Mapping wildfire burn severity in southern California forests and shrublands using Enhanced Thematic Mapper imagery. *GeoCarto International* 16:89-99.
- Rogan, J., Miller, J., Stow, D., Franklin, J., Levien, L. & Fischer, C.. 2003. Land cover change monitoring in southern California using multitemporal Landsat TM and ancillary data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69: 793-804.
- Roy, D. P., Boschetti, L., & Trigg, S. N. (2006). Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 112-116.
- Sabins, F.F. 1997. Remote sensing: principles and interpretation. W.H. Freeman, .
- Serrano, L., Gamon, J. A., & Peñuelas, J. (2000). Estimation of canopy photosynthetic and nonphotosynthetic components from spectral transmittance. *Ecology*, 81(11), 3149-3162.
- Smith, S. V., Bullock, S. H., Hinojosa-Corona, A., Franco-Vizcaíno, E., Escoto-Rodríguez, M., Kretschmar, T. G.,... & Salazar-Cesena, J. M. (2007). Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous Mediterranean-climate watershed. *Ecological Applications*, 17(5), 1379-1387.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., & Huete, A. (2010). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). *Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona*, 1-38.
- Syphard, A. D., Franklin, J., & Keeley, J. E. (2006). Simulating the effects of frequent fire on southern California coastal shrublands. *Ecological Applications*, 16(5), 1744-1756.
- Stylinski, C., Gamon, J., & Oechel, W. (2002). Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia*, 131(3), 366-374.
- Wallace, C. S., Webb, R. H., & Thomas, K. A. (2008). Estimation of perennial vegetation cover distribution in the Mojave Desert using MODIS-EVI data. *GIScience & Remote Sensing*, 45(2), 167-187.
- Washington-Allen, R. A., West, N. E., Ramsey, R. D., & Efroymson, R. A. (2006). A protocol for retrospective remote sensing-based ecological monitoring of rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 59(1), 19-29.

- Weise, D. R., Zhou, X., Sun, L., & Mahalingam, S. (2005). Fire spread in chaparral—'go or no-go?'. *International Journal of Wildland Fire*, 14(1), 99-106.
- Wells, M. L., O'leary, J. F., Franklin, J., Michaelsen, J., & McKinsey, D. E. (2004). Variations in a regional fire regime related to vegetation type in San Diego County, California (USA). *Landscape Ecology*, 19(2), 139-152.
- Wells, W. G. (1987). The effects of fire on the generation of debris flows in southern California. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 105-114.
- Westman, W. E., & O'Leary, J. F. (1986). Measures of resilience: the response of coastal sage scrub to fire. *Vegetatio*, 65(3), 179-189.
- Westman, W.E., O'Leary, J.F. & Malanson, G.P. 1981. The effects of fire intensity, aspects and substrate on post-fire growth of Californian coastal sage scrub. Pp. 151-179 en: Margaris, N.S. & Mooney, H.A. (eds.), Components of Productivity of Mediterranean-Climate Regions: Basic and Applied Aspects. Dr W. Junk Publishers, The Hague.
- Zedler, P.H. 1982. Plant demography and chaparral management in southern California. Pp. 123-127 In: Conrad, C.E. & Oechel, W.C. (eds.), Proceedings of the Symposium on the Dynamics and Management of Mediterranean Type Ecosystems. USDA Forest Service, Washington.
- Zippin, D.B. & Vanderwier, J.M. 1994. Scrub community descriptions of the Baja California peninsula, Mexico. *Madroño* 41:85-119.