



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

APLICACIÓN DE DATOS SATELITALES PARA EVALUAR LOS EFECTOS DE LOS INCENDIOS EN LA SELVA MAYA DE LA REGIÓN ORIENTAL DEL MUNICIPIO DE ESCÁRCEGA, CAMPECHE

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

ALFONSO CARBAJAL DOMÍNGUEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. LILIA DE LOURDES MANZO DELGADO

ENTIDAD DE ADSCRIPCIÓN

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, ENERO DE 2025.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



POSGRADO EN GEOGRAFÍA

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL (Graduación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado: "**Aplicación de datos satelitales para evaluar los efectos de los incendios en la Selva Maya de la Región Oriental del municipio de Escárcega, Campeche**", que presente para obtener el grado de doctorado, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi programa de posgrado, citando las fuentes, ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de graduación.

Atentamente


Alfonso Corbajal Domínguez

Nombre completo y firma del alumno

No. de cuenta 305314848

AGRADECIMIENTOS

Siempre estaré profundamente agradecido con el **Programa de Posgrado en Geografía** de la **Universidad Nacional Autónoma de México**, que por segunda vez me brindó la oportunidad de cumplir una meta importante en mi vida profesional: alcanzar el grado de Doctor en Geografía. Este posgrado no solo me ofreció una formación académica de excelencia, sino también un espacio de crecimiento personal y profesional que valoro enormemente.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)**, mi gratitud por haberme otorgado una beca (**CVU: 488616**), sin la cual esta investigación no habría sido posible. Su apoyo financiero fue clave para desarrollar este proyecto y concentrarme plenamente en mis objetivos académicos.

A la **Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado**, quien me honró al aceptarme como su estudiante. Nunca olvidaré su guía, paciencia y compromiso durante todo este proceso. Su confianza en mi trabajo y sus consejos fueron fundamentales para que esta investigación llegara a buen término. ¡Gracias, Doctora!, por todo su tiempo, apoyo y atención!

A mi comité tutorial, la **Dra. Claudia María Monzón Alvarado** y el **Dr. Christoph Neger**, les expreso mi más sincero agradecimiento por su dedicación y por compartir conmigo su vasta experiencia. Sus recomendaciones, observaciones y ánimo constante fueron esenciales para dar solidez a esta investigación. ¡Gracias infinitas por su generosidad y respaldo!

A los profesionales que me brindaron su tiempo y experiencia en el tema de incendios forestales en la Península de Yucatán: el **Ing. Pánfilo Flores**, la **Mtra. Diana López**, el **Biól. José Arnoldo Villaseñor** y el **Ing. Román Gómez**. Sus conocimientos y aportaciones enriquecieron enormemente mi perspectiva y análisis.

A mi buen amigo **Gerardo Williams**, del posgrado de ECOSUR Campeche, por las charlas enriquecedoras, las sugerencias acertadas y el apoyo constante durante mi estancia en Campeche.

A los combatientes de incendios de la **CONAFOR** en **Campeche** y **Escárcega**: **Flavio Octavio Gómez, Marcos Esquivel, Gustavo Adolfo Dzul, Osvaldo Martínez, Tania Camal, Carlos Hernán Acal y Armando Román**. Agradezco profundamente su disposición para responder las entrevistas, así como su valiosa labor en el campo, que refleja su compromiso con la protección de sus selvas.

A los ejidatarios que generosamente compartieron su tiempo, su hospitalidad y sus conocimientos conmigo: **Ventura, Chepe, Santos, Jesús Martínez, Francisco Sánchez García, Jorge Oropeza Moreno, José de Carmen, Juan Mendoza, Ernesto Oropeza, Alberto Castillo, Javier Coj, Alfredo Uce, Faustino García, Melquiades Damián, Arturo Audeves, Emer, Abundio, Izai, Miguel Raygoza, Joel Astudillo y Reinaldo Macías**. En especial, mi gratitud infinita a **Ángel Coj y su familia**, quien no solo me apoyó incansablemente durante cada visita de campo, sino que también me compartió su invaluable conocimiento y experiencia sobre la selva en la región oriental de Escárcega, Campeche. Su entusiasmo y dedicación fueron una fuente de inspiración.

A mi sínodo asignado, el **Dr. José López García**, el **Dr. José Manuel Espinoza Rodríguez** y la **Dra. Michelle Farfán Gutiérrez**, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por tomarse el tiempo de leer mi trabajo de investigación y por brindarme valiosas sugerencias, observaciones y recomendaciones que sin duda enriquecieron este proyecto. Su experiencia y dedicación fueron esenciales para mejorar la calidad de mi trabajo y para llevarlo a un nivel más sólido y significativo.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de una forma u otra, contribuyeron al desarrollo de esta investigación. Cada encuentro, conversación y consejo fue una pieza esencial para construir este trabajo que representa no solo un logro académico, sino también una experiencia de vida profundamente enriquecedora.

"Qualquier meta parece inalcanzable, hasta que recordamos que no estamos solos en el camino."

Agradecimientos personales

En primer lugar, mi más profundo agradecimiento a mi familia. A mi madre, **María Guadalupe Domínguez Gómez**, y a mi padre, **Alfonso Carbajal Juárez**, por su infinito apoyo, tiempo, enseñanzas y consejos. Su amor incondicional y acompañamiento a lo largo de estos años han sido una fuente invaluable de fortaleza y motivación para mí. Gracias por ser mi mayor inspiración.

A mis hermanos, sobrinos, tías y tíos, y primos, quienes siempre han estado presentes con palabras de aliento, risas, consejos y bromas que me han animado a seguir adelante. Su cariño y apoyo constante son un regalo que valoro profundamente. ¡Los quiero y aprecio muchísimo!

A mi querida abuelita, **María Melquiades Juárez Portillo (1922-2023)**, por los consejos y hasta los regaños que marcaron mi infancia y que con el tiempo se convirtieron en lecciones que llevo conmigo todos los días.

A mis amigos, esas personas con las que puedo contar en los momentos buenos y malos, y que siempre están ahí para compartir risas, viajes, aventuras y experiencias inolvidables: **Maviael Velázquez, Antonio Contreras, Marcela Jiménez, Fernando Pérez, Fabiola Gress, Pablo Leautaud, Ricardo Garnica, Abigahil Ochoa, Eduardo Bustamante, Jaime Ramos, y Gabriela Juárez.**

A todos mis amigos de la **Facultad de Ciencias**, del **Posgrado en Geografía**, del **Instituto de Biología y Geografía**, los queridos **QVG-Amigos** y **CSIPA-Amigos**, que hicieron de este camino algo mucho más enriquecedor y llevadero.

Finalmente, pero no menos importante, a mis compañeros y amigos de la **Universidad Nacional Rosario Castellanos**, quienes han sido una parte especial de esta etapa de mi vida. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este recorrido, y les estoy infinitamente agradecido por su amistad y compañía.

Gracias a todos por formar parte de esta travesía, por las risas, los momentos compartidos y por siempre estar ahí. Este logro no sería posible sin ustedes.

ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	16
I.1 Antecedentes	16
I.2 Planteamiento del problema.....	21
I.1 Justificación.....	23
I.2 Preguntas de investigación	25
I.3 Objetivos	26
I.3.1 Objetivo general.....	26
I.3.2 Objetivos particulares	26
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	27
II.1 Incendios en selvas.....	27
II.1.1 Ecosistemas de selva a nivel mundial	27
II.1.2 Incendios de selva en México.....	30
II.2 Regímenes de fuego en ecosistemas de selva.....	33
II.3 Índices espectrales para el análisis de la severidad de las áreas afectadas por incendios.....	35
II.4 Recuperación de la vegetación post incendio	38
II.5 Normativas sobre el uso del fuego en la gestión y conservación de la selva	43
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	52
III.1 Delimitación y descripción del área de estudio	52
III.2 Diseño y aplicación de entrevistas semiestructuradas	72
III.3 Adquisición de datos y procesamiento de imágenes de satélite	75
III.3.1 Puntos de calor en el área de estudio	75
III.3.2 Imágenes de satélite Landsat 8.....	76
III.4 Detección y delimitación de las áreas quemadas en la selva	79
III.4.1 Validación de las áreas quemadas	82
III.5 Estimación de la severidad de los incendios en selva.....	83
III.5.1 Clasificación de la severidad para vegetación de selva.....	85
III.5.2 Verificación de las categorías de severidad propuestas por Jenks. ..	87
III.6 Evaluación del impacto de la severidad de los incendios en la vegetación	89
III.6.1 Selección de los sitios de muestreo.....	90

III.6.2	Revisión de bases de datos de las especies vegetales de selva en el área de estudio	93
III.6.3	Medición de la estructura de la vegetación.....	93
III.6.4	Análisis estadístico de los sitios de muestreo.....	95
III.6.5	Análisis de la riqueza, diversidad y estructura de la vegetación en las áreas afectadas por incendios	95
III.6.6	Índice de Shannon-Wiener	95
III.6.7	Índice de Valor de Importancia	96
III.6.8	Sobre vuelo de las áreas muestreadas con Sistema de Aeronave Pilotado a Distancia (RPAS - Remotely Piloted Aircraft)	97
III.7	Análisis multitemporal de las áreas quemadas	103
III.7.1	Aplicación de bfast01 en las áreas quemadas	107
CAPÍTULO IV	RESULTADOS	111
IV.1	Análisis de la influencia de las acciones humanas en la severidad de los incendios y su impacto en los recursos de la selva.....	111
IV.1.1	Entrevistas con autoridades gubernamentales y no gubernamentales 113	
IV.1.2	Entrevistas con actores estatales y municipales.....	122
IV.1.3	Entrevistas con actores locales	132
IV.1.4	Hallazgos de las entrevistas semiestructuradas	144
IV.2	Distribución espacial y temporal de los incendios en la selva detectados con puntos de calor (2013-2020)	151
IV.3	Distribución espacial y temporal de las áreas quemadas en selva	156
IV.4	Caracterización de las áreas quemadas por tipo de vegetación de selva 159	
IV.5	Caracterización de las áreas quemadas por ejido	161
IV.6	Validación de la delimitación de las áreas quemadas	164
IV.7	Distribución espacial y temporal de la severidad de los incendios en la selva 168	
IV.7.1	Caracterización de la severidad de los incendios por tipo de vegetación	170
IV.7.2	Caracterización de la severidad de los incendios por ejido	171
IV.8	Evaluación del impacto de la severidad de los incendios en la vegetación 174	
IV.8.1	Análisis de la riqueza de especies en los sitios de muestreo	176

IV.8.2	Análisis del índice de Shannon-Wiener	178
IV.8.3	Evaluación de la desviación estándar.....	182
IV.8.4	Análisis del Índice de Valor de Importancia	184
IV.8.5	Análisis de las clases diamétricas	201
IV.8.6	Análisis de las clases de altura.....	209
IV.9	Análisis de serie de tiempo de las áreas de selva afectadas por el fuego 214	
IV.9.1	Tendencias anuales.....	222
IV.9.2	Tendencias por tipos vegetación	226
IV.9.1	Tendencias por ejido	228
CAPÍTULO V	DISCUSIÓN	231
V.1	Valoración de la influencia de la severidad de los incendios.....	231
V.2	Caracterización de las áreas quemadas	237
V.3	Distribución espacial y temporal de la severidad	240
V.4	Evaluación del impacto de la severidad	243
V.5	Análisis de serie de tiempo de áreas quemadas	251
CAPÍTULO VI	CONCLUSIÓN.....	254
CAPÍTULO VII	REFERENCIAS.....	258
CAPÍTULO VIII	ANEXOS	272
VIII.1	Entrevistas semiestructuradas	272
VIII.1.1	Entrevista semiestructurada aplicada de manera general a ejidatarios, autoridades locales (comisarios ejidales o miembros de los comités de incendios locales)	272
VIII.1.2	Entrevista considera a los brigadistas o combatientes contra incendios:277	
VIII.1.3	Entrevista a funcionarios y organizaciones no gubernamentales .	279

Índice de figuras

Figura 1. Ecorregiones prioritarias y regímenes del fuego dominantes.....	28
Figura 2. Distribución global de las selvas tropicales.	29
Figura 3. Adaptación de ecosistemas al fuego en México	32
Figura 4. Áreas susceptibles a incendios forestales.....	49
Figura 5. Área de estudio.	53
Figura 6. Ubicación del área en estudio a nivel municipal.....	54
Figura 7. Modelo Digital del Terreno en el área de estudio.....	55
Figura 8. Elementos hidrográficos en el área de estudio.	56
Figura 9. Edafología en el área de estudio.....	57
Figura 10. Climatología en el área de estudio.	58
Figura 11. Huracanes y tormentas tropicales.	62
Figura 12. Vegetación primaria y secundaria de selvas en el área de estudio.....	63
Figura 13. Tipos de vegetación de selvas en el área de estudio.....	64
Figura 14. Áreas de valor ambiental en el área en estudio.	65
Figura 15. Localidades en el área de estudio (CONABIO, 2014).	66
Figura 16. Distribución de los núcleos agrarios por municipio.....	70
Figura 17. Núcleos agrarios del área de estudio.	71
Figura 18. Sinopsis de la aplicación de entrevistas semiestructuradas.....	73
Figura 19. Procesamiento de áreas quemadas.....	81
Figura 20. Comparación categorías de severidad con imágenes Landsat 8 OLI post-incendio 25 de abril de 2019: A) Key and Benson (2006) y B) Ruptura natural de Jenks.	86
Figura 21. Comparación de la imagen A) Landsat 8 OLI post-incendio del 25 de abril de 2019 y B) Planet post-incendio del 26 de abril de 2019.....	88
Figura 22. Comparación de la imagen A) Planet post-incendio de 26 de abril de 2019 y B) Planet post-incendio de 11 de abril de 2020.	89
Figura 23. Ubicación espacial de los sitios de muestreo en el área en estudio.....	92
Figura 24. Toma de datos de campo de los sitios de muestreo.	94
Figura 25. Escape de fuego durante la preparación de terreno para cultivo en selva, captado con RPAS en el área de estudio (mayo de 2023).	97
Figura 26. Seguimiento a un área donde se realizó cambio de uso de suelo utilizando fuego en enero de 2023 en el área en estudio.	98
Figura 27. Comparación de la resolución espacial entre una imagen de RPAS (A) y la imagen Landsat 8 (B) en el área en estudio.	99
Figura 28. RPAS DJI Mini 2 utilizado para realizar los vuelos de las áreas afectadas por incendios.	100
Figura 29. Software Agisoft Photoscan Professional.....	102
Figura 30. Delimitación de polígonos de áreas afectadas y la cuantificación de superficies por incendios en el SIG.	103
Figura 31. Flujo de trabajo para la generación de la serie de tiempo y caracterización de cambios abruptos en el NDVI de áreas afectadas por incendios mediante bfast01.	107

Figura 32. Comportamiento de la tendencia del NDVI en un píxel afectado por el fuego (izquierda) y en un píxel que no ha sido afectado por el fuego (derecha).	109
Figura 33. Ejemplos de cambios (De Jong et al., 2013).....	110
Figura 34. Flujo de cooperación y comunicación de los actores involucrados en el manejo del fuego del área en estudio.	112
Figura 35. Representatividad de actores entrevistados para el área en estudio.	113
Figura 36. Ubicación espacial de las dependencias entrevistadas.	114
Figura 37. Ubicación Actividades de combate de incendios por parte de los brigadistas de CONAFOR, CONANP y SEMABICCE en la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche Fuente de las imágenes: SEMABICCE, 2022.	117
Figura 38. Cartucho de escopeta en el área en estudio.....	118
Figura 39. Entrevista con los brigadistas de Campeche y Escárcega.....	122
Figura 40. Campamentos entrevistados.....	123
Figura 41. Revisión de cartografía para la ubicación de los ejidos donde se atendió incendios por parte de las brigadas.....	124
Figura 42. Ejidos con atención a incendios por parte de las brigadas, en la región oriental de Escárcega, Campeche.	125
Figura 43. Atención a incendios por parte de CONAFOR las brigadas de Campeche y Escárcega.	126
Figura 44. Carteles y folletos sobre el manejo del fuego en CONAFOR, Campeche.....	128
Figura 45. Núcleos agrarios entrevistados.	133
Figura 46. Campamentos de CONAFOR en Campeche.....	134
Figura 47. Uso de brechas cortafuego en el núcleo agrario El Centenario obtenidas con RPAS.....	136
Figura 48. Calendario de quemas para Campeche 2022.....	137
Figura 49. Escape del fuego entre parcelas.....	138
Figura 50. Uso de fuego para la limpia de terrenos agropecuarios con la implementación de brechas cortafuego.....	139
Figura 51. Escapes de fuego en áreas de aprovechamiento agropecuario.	140
Figura 52. Puntos de calor 2013-2022.	142
Figura 53. Laguna de Silvituc, Escárcega.	143
Figura 54. Beneficios culturales y ecoturísticos de la selva.	144
Figura 55. Diagrama de flujo de historia de incendios del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.....	146
Figura 56. Diagrama de flujo de severidad de incendios del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.....	148
Figura 57. Diagrama de flujo de beneficios de la selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.....	150
Figura 58. Validación de los índices BAI y NBR utilizando los puntos de calor VIIRS. (A) Identificación de un área de selva afectada por el fuego. (B) Superposición de los puntos de calor en el área de selva afectada por el fuego. (C) Superposición de los puntos de calor y el índice BAI en el área afectada por el	

fuego. (D) Sobreposición de los puntos de calor y el índice NBR en el área afectada por el fuego.....	151
Figura 59. Área quemada de selva y los puntos de calor registrados.	153
Figura 60. Distribución espacial de los puntos de calor en el área en estudio. ...	154
Figura 61. Análisis mensual de puntos de calor 2013-2020.....	155
Figura 62. Calendario de quemas para Campeche 2022 y 2023.	156
Figura 63. Delimitación del área afectada por el fuego en abril 25 de 2019. En la imagen A se muestra el resultado obtenido del índice BAI y en la imagen B se muestra el resultado generado por el índice NBR.....	157
Figura 64. Representación de los cálculos anuales de superficies afectadas por incendios en selva con los índices BAI, NBR y la intersección de ambos índices.	158
Figura 65. Área quemada por tipo de vegetación.....	160
Figura 66. Distribución de los tipos de selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.....	161
Figura 67. Registro de incendios y distribución de las áreas quemadas del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.	164
Figura 68. Ubicación espacial de las áreas quemadas sometidas a validación. .	165
Figura 64. Error de omisión (A) y error de comisión (B) en la delimitación del área quemada (Sentinel-2- (color rojo) y Landsat 8 (color azul) para dos polígonos aleatorios.....	166
Figura 70. Severidad del periodo en estudio.	169
Figura 71. Severidad por tipo de vegetación	171
Figura 72. Severidad en los ejidos y área federal.	173
Figura 73. Clasificación de la severidad con la propuesta de ruptura natural de Jenks.....	175
Figura 74. Coeficiente de correlación lineal.	179
Figura 75. Relación entre la abundancia y riqueza de especies de acuerdo a la clasificación de la severidad.....	181
Figura 76. Ubicación y características de las especies observadas en los lugares de muestreo	183
Figura 77. Cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en el área en estudio.....	186
Figura 78. Presencia de la familia Convolvulaceae en áreas afectadas por severidad alta y moderada.	187
Figura 79. Presencia de monos saraguatos (<i>Alouatta villosa</i>) en especies de árboles de la familia Anacardiaceae.....	189
Figura 80. Presencia de especies de la familia Fabaceae en áreas afectadas por incendios con severidad baja.	190
Figura 81. Presencia de especies de la familia Moraceae en áreas afectadas por incendios con severidad baja.	191
Figura 82. Presencia de especies de la familia Burseraceae en el área en estudio.	193

Figura 83. Especies con el IVI en la clase de severidad alta: (A) <i>Asclepias curassavica</i> , (B) <i>Brachiaria fasciculata</i> , (C y D) <i>Ipomea sp.</i>	195
Figura 84. Especies con el IVI en la clase de severidad moderada y baja: (A) <i>Metopium brownei</i> (B) <i>Lysiloma latisiliquum</i> , (C) <i>Spondias mombin</i> y D) <i>Lonchocarpus xuul</i>	197
Figura 85. Especies con el IVI en la clase de severidad con recrecimiento y sitios de control: (A) <i>Brosimum alicastrum</i> , (B) <i>Bursera simaruba</i> y (C) <i>Ficus maxima</i> .198	
Figura 86. Área con cambio de uso de suelo para cultivo de maíz y calabaza en donde se mantuvo la presencia de la especie <i>Ficus maxima</i>	200
Figura 87. Distribución de las clases diamétricas agrupadas por severidad.	201
Figura 88. Proporción de las clases diamétricas agrupadas por severidad.	203
Figura 89. Vista aérea de la clasificación de severidad alta: (A) Actividades de pastoreo, (B) Escape de fuego con presencia de <i>Ipomea</i> y (C) Cambio de uso de suelo para cultivo.	204
Figura 90. Vista aérea de una zona en donde se identificó como severidad alta para cambio de uso de suelo: (A) Junio-2022; (B) Mayo-2023 y (C) Enero-2024 en el ejido El Centenario.	205
Figura 91. Vista aérea de la clasificación de severidad: (A) Moderada y (B) Baja.	206
Figura 92. Vista aérea de sitios clasificados como (A) Recrecimiento y (B) Sitio de control.	206
Figura 93. Restos de especies arbóreas en áreas consideradas con severidad alta.	209
Figura 94. Clases de altura de la selva y su severidad en los sitios de muestreo.	211
Figura 95. Proporción de clases de altura de la selva y su severidad en los sitios de muestreo.	212
Figura 96. Distribución espacial de los tipos de tendencias de la actividad de la vegetación en las áreas afectadas por incendios.	215
Figura 97. Ejemplos de tipos de tendencias identificados en el ejido el Centenario en el año 2019.	216
Figura 98. (A) Escape de fuego en mayo de 2023 y recuperación de la vegetación de selva en enero de 2024 (B).	217
Figura 99. En la imagen (A) y (B) se muestra el cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en la que se utilizó el fuego para remover la vegetación de selva.	218
Figura 100. En la imagen (A) se muestra el cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en 2022; en la imagen (B) se muestra la revegetación del área en 2024 en el ejido El Centenario.	218
Figura 101. Transformación de cubierta arbórea a vegetación herbácea tras pérdida por incendio en 2020.	219
Figura 102. Actividades agropecuarias en el área en estudio.	220
Figura 103. Tendencias del NDVI en selva para periodo de estudio.	223

Figura 104. Ejemplos de las tendencias del NDVI en selva para el año 2019 A (cambio de uso de suelo); B (quema por cacería) y C (escape de fuego).	224
Figura 105. Tendencias de la actividad por tipo de vegetación.....	227
Figura 106. Tendencias de la actividad de la vegetación en las áreas afectadas por incendios de los ejidos.	229
Figura 107. En la imagen (A) se muestra la cobertura forestal de selva de la zona federal en 2015. En la imagen (B) se muestra la cobertura forestal con quemas por el establecimiento de la localidad Lic. Andrés Manuel López Obrador (C) en 2023.	230

Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre el índice dNBR y la severidad.	37
Tabla 2. Susceptibilidad a los incendios forestales en el municipio de Escárcega.	49
Tabla 3. Listado de leyes, reglamentos, normas e instrumentos de gestión para Campeche.	51
Tabla 4. Temperatura máxima promedio 2013-2020.	59
Tabla 5. Comportamiento del ENOS (Valores en rojo indican una dominancia del fenómeno del niño y valores en azul indican una dominancia del fenómeno de la niña, mientras que valores en negritas indican una temporalidad neutral).....	60
Tabla 6. Precipitación anual 2013-2020.	61
Tabla 7. Vegetación de selva en el área de estudio.	63
Tabla 8. Localidades en el área de estudio.	67
Tabla 9. Núcleos agrarios en el área en estudio.	69
Tabla 10 Información de las entrevistas realizadas a los actores.	74
Tabla 11. Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas para la delimitación de las áreas quemadas 2013 a 2020.	77
Tabla 12. Información de los datos multiespectrales de las bandas de Landsat 8 OLI.	78
Tabla 13. Matriz de confusión empleada.	83
Tabla 14. Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas para el cálculo del dNBR (GloVis, 2021).	84
Tabla 15. Relación entre el índice dNBR y la severidad	84
Tabla 16. Sitios de muestreo.	91
Tabla 17. Catálogo de imágenes Landsat 8 con el que se realizó la serie de tiempo.	104
Tabla 18. Actividades para el manejo del fuego en quemas agropecuarias.	129
Tabla 19. Frecuencia y extensión de las áreas quemadas de selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.	152
Tabla 20. Cálculos anuales de superficies afectadas por incendios en la selva.	157
Tabla 21. Área quemada total por tipo de vegetación.	159
Tabla 22. Distribución de las áreas quemadas por ejido.	162
Tabla 23. Resultado de la validación de las áreas seleccionadas con la imagen Sentinel-2.	166
Tabla 24. Especies presentes en los sitios de muestreo.	176
Tabla 25 Sitios de muestreo por severidad.	177
Tabla 26. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las familias registradas en las clases de severidad de incendios.	184
Tabla 27. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las especies registradas en las clases de severidad de incendios.	193
Tabla 28. Prueba post-hoc de Dunn de los valores de p sin corrección de las clases diamétricas.	207

Tabla 29. Tendencia de los cambios en la región oriental del municipio de Escárcega.	221
---	-----

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

Los ecosistemas terrestres enfrentan actualmente serios problemas ambientales como consecuencia del cambio climático, contaminación, deforestación, degradación del suelo, escasez de agua, generación de residuos, extinción de especies y pérdida de biodiversidad, derivado de las actividades antrópicas (Beraldi-Campesi, 2014).

Los seres humanos bajo un sistema capitalista de desarrollo siempre han manipulado y alterado su entorno con el fin de satisfacer sus necesidades, causando impactos sobre el medio abiótico y biótico, lo que ha vulnerado el funcionamiento de los ecosistemas, teniendo graves repercusiones para el bienestar presente y futuro de la humanidad (CBD, 2010; Meira Cartea, 2013).

Los ecosistemas terrestres tienen una gran diversidad y riqueza biológica de plantas y animales que se extiende sobre la zona continental e insular recorriendo una gran extensión de cobertura vegetal como bosques, matorrales, pastizales y selvas por mencionar algunos de los más comunes y representativos (Armenteras et al., 2020; SEMARNAT, 2016)

La cobertura vegetal desde hace más de 300 millones de años ha soportado incendios ocasionados por fenómenos como tormentas y actividad volcánica. El fuego es un elemento importante para el funcionamiento de diferentes ecosistemas terrestres, el cual les permite renovarse siempre que el incendio permanezca dentro de los límites naturales, lo que permite la prevalencia de sus ciclos de vida a través de los años (Hirschberger, 2016).

En la actualidad, debido a la actividad antrópica y el cambio climático los regímenes de fuego de los ecosistemas se han modificado lo que ha ocasionado incendios más frecuentes, con mayor extensión y con daños más severos, ocasionando cambios

en la composición de especies y en la reducción de las superficies de estos ecosistemas (Hirschberger, 2016; Rodríguez Trejo, 2014).

La frecuencia e intensidad de los incendios depende de factores naturales como el clima, tipo de cobertura vegetal, tormentas, biomasa acumulada o las condiciones del terreno. Estos factores, influenciados por el ecosistema y su modificación por la actividad humana, han alterado los regímenes de incendios. Según Oddi (2018), un régimen de incendios se refiere al patrón espacial y temporal de la ocurrencia de incendios en una zona determinada durante un período específico. En las selvas, los incendios son poco comunes debido a las condiciones de baja inflamabilidad que predominan en regiones con escasa o nula alteración humana. Sin embargo, la remoción y modificación de la composición de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas introducen nuevos tipos de combustible vegetal. Esto ha generado una alteración en los regímenes de fuego, aumentando su frecuencia y provocando incendios más prolongados, severos y destructivos. Además, estudios meteorológicos recientes han revelado que la temporada de incendios se ha extendido en promedio 14 días a nivel global (Hirschberger, 2016; Kelly et al., 2024; Rodríguez Trejo, 2014).

En este contexto el uso de datos satelitales ha demostrado ser una herramienta valiosa para analizar e interpretar estos fenómenos, permitiendo un monitoreo eficiente de los incendios, que pueden considerarse tanto como fenómenos naturales como impactos ambientales. La capacidad de acceder a información oportuna y de libre acceso ha sido crucial para la investigación en este ámbito. A lo largo de los años, la tecnología ha avanzado significativamente en la fabricación de satélites equipados con sensores de percepción remota, incorporando nuevas características. Entre ellas, destaca la capacidad de adquirir un mayor número de bandas, que corresponden a los diferentes rangos de longitud de onda que el satélite puede captar, así como una mejor resolución espacial, que se refiere al tamaño del área en el terreno que un píxel en la imagen representa. Además, la resolución temporal, que es la frecuencia con la que un satélite puede captar

imágenes del mismo lugar, también ha mejorado, facilitando el estudio detallado de la superficie terrestre desde los primeros lanzamientos en 1972, hasta la fecha (Chuvieco & Kasischke, 2007; Chuvieco Salinero, 2009).

Las imágenes obtenidas a partir de los satélites Landsat han permitido analizar las anomalías térmicas asociadas a la quema de biomasa, utilizando la banda NIR (*Near Infrared*, en español Infrarrojo Cercano) y la banda SWIR (*Short-Wave Infrared*, en español Infrarrojo de Onda Corta). Por ejemplo, el satélite Landsat 5, fue puesto en órbita en 1984, mientras que Landsat 7 fue enviado en 1999. En febrero de 2013 la NASA puso en órbita el satélite Landsat 8, éste incorpora dos sensores nombrados como OLI (*Operational Land Imager*, en español Generador de Imágenes Terrestre Operativo) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*, en español Sensor de Infrarrojos Térmicos), a una altitud de 705 km lo cual permite tener un ciclo de repetición de imágenes cada 16 días. El satélite Landsat 8 ha sido una herramienta importante para identificar anomalías térmicas permitiendo desarrollar combinación de bandas y algoritmos para la detección activa de incendios en la cobertura forestal, quemas en tierras de cultivo, quema de gas en áreas de extracción de hidrocarburos y anomalías térmicas en volcanes activos, lo cual confirma la capacidad de las imágenes y los algoritmos para el estudio de incendios en vegetación (Schroeder et al., 2016).

Los estudios sobre la identificación de incendios han tenido una mejora en los últimos veinte años, productos de los satélites Landsat han aportado información sobre este fenómeno permitiendo analizar los incendios a una escala de paisaje en la cual la parte ambiental, social y política son partícipes para entender el origen y afectación de la quema de la cobertura vegetal. Esta escala y disponibilidad de imágenes es tal que permite realizar un seguimiento de la integridad de los ecosistemas, principalmente la cobertura vegetal de selva que en los últimos años se ha descrito como la más vulnerable por la quema (Hirschberger, 2016).

En México la temporada de incendios generalmente ocurre durante la primavera de enero a mayo, antes de las lluvias de verano, siendo el mes de abril el que registra el mayor número de incendios (Manzo-Delgado et al., 2009). El fuego forma parte de diversos ecosistemas y su funcionamiento, como es el caso de los bosques de pino (*Pinus sp.*) que son especies adaptadas al fuego y que lo requieren para su ciclo de vida. Sin embargo, en otros tipos de ecosistemas un incendio puede desencadenar un efecto negativo, contribuyendo a problemas ambientales como cambio climático, contaminación, deforestación, degradación del suelo, extinción de especies y pérdida de biodiversidad (Rodríguez Trejo, 2014).

El crecimiento poblacional ha impactado todos los ecosistemas terrestres, generando una mayor demanda de espacio y alimentos. Esto ha provocado la reducción de la cobertura vegetal, la transformación de los ecosistemas, y la pérdida de su biodiversidad y servicios ecosistémicos. En México, las selvas tienen una cobertura original de 30,457,116 hectáreas, según el INEGI (2018). Sin embargo, en el último medio siglo, actividades como la agricultura, la ganadería, la explotación forestal y el crecimiento poblacional han reducido significativamente su extensión (Rodríguez Trejo, 2014). Actualmente, solo permanecen 11,478,307 hectáreas en condición primaria y 18,978,808 hectáreas en condición secundaria (INEGI, 2018). Las selvas en el sur de México son importantes debido a los servicios ambientales que ofrecen, como captación, infiltración y provisión de agua; conservación de la biodiversidad; mitigación de los efectos del cambio climático mediante la captura y almacenamiento de carbono, retención, formación de suelo y belleza escénica (Balvanera & Cotler, 2007; Ceballos et al., 2010). Sin embargo, se ha comprobado que los incendios en selvas repercuten en pérdida de los servicios ambientales, como la capacidad de retener agua, erosión, cambio climático por la liberación de Gases de Efecto Invernadero, pérdida de biodiversidad vegetal y mortalidad de la fauna de lento desplazamiento (Cochrane, 2009).

En México, la Gerencia de Manejo del Fuego, liderada por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), es responsable de impulsar acciones de capacitación,

prevención, combate, investigación y monitoreo de los incendios forestales, en coordinación con las entidades federativas, municipios y demarcaciones. Esta gerencia lleva un registro de los incendios forestales, y según sus datos, en los últimos 10 años (periodo 2010-2020) se han registrado 82,703 incendios en el territorio nacional, afectando un promedio de 4,529,113 hectáreas. Los años 2011, 2013, y 2017 presentaron la mayor superficie afectada por incendios, con 956,405 ha, 413,215 ha, y 725,461 ha respectivamente. Durante el mismo periodo de diez años, el estado de Campeche reportó 200 incendios que afectaron 66,301.5 hectáreas, lo que representa el 1.46% de la superficie quemada a nivel nacional. En este periodo, los incendios afectaron 40,080 hectáreas de vegetación herbácea, 10,909 hectáreas de estrato arbustivo, y 15,309 hectáreas de vegetación arbórea, incluyendo arbolado adulto y renuevo (SNIGF, 2020). Dado que el registro nacional no especifica detalladamente la cobertura de vegetación afectada, se considera importante realizar un estudio más profundo para conocer la distribución espacial y la recurrencia de las áreas impactadas por los incendios.

I.2 Planteamiento del problema

En México, el fuego juega un papel fundamental en la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas. Algunos de estos ecosistemas están adaptados al fuego, como los bosques de encino y pino, el matorral, el mezquital, los palmares, los pastizales y las sabanas. Otros son independientes del fuego, como el bosque de mezquite, el bosque inducido, el matorral rosetófilo y el matorral costero. Por otro lado, existen ecosistemas sensibles al fuego, como los bosques de galería, de oyamel y mesófilo de montaña, así como los manglares y las selvas (CONAFOR, 2021). No obstante, su propagación descontrolada en la vegetación puede causar problemas ambientales significativos, como el cambio climático, la erosión y la alteración de la estructura y composición de la vegetación (Villers Ruiz & López Blanco, 2004). En los ambientes selváticos, donde las plantas son sensibles y no están adaptadas al fuego, este puede ser perjudicial para su supervivencia y el equilibrio del complejo ecosistema (Cochrane, 2009).

El estado de Campeche, por su ubicación geográfica, alberga una extensa superficie de selva que representa el 69.3% de su territorio. Sin embargo, solo el 15.9% se conserva como vegetación primaria, mientras que el 53.5% ha sido transformado en vegetación secundaria (INEGI, 2018). Las principales amenazas para la cobertura vegetal de selva en Campeche incluyen el cambio de uso del suelo, las actividades agropecuarias y la práctica de Roza-Tumba-Quema (R-T-Q) para el cultivo de milpa. Esta práctica implica la selección de un área con cubierta forestal, la tala de la vegetación y la quema de residuos, lo que limpia el área y facilita la disponibilidad de nutrientes para futuros cultivos (Chang-Martínez, 2017).

Desde el punto de vista ambiental, Escárcega y Calakmul son los municipios más relevantes en el estado de Campeche debido a su extensa superficie de selva (INEGI, 2018) y a los valiosos servicios ambientales que proporciona esta vegetación. Sin embargo, en los últimos años, esta región ha experimentado un notable aumento en la frecuencia de incendios forestales y quemas agropecuarias

(CONABIO, 2020). Este incremento, sumado al crecimiento demográfico en la zona (INEGI, 2021), podría generar una mayor demanda de superficie para la agricultura y la ganadería.

El uso tradicional del fuego en la selva es una práctica ancestral que ha facilitado el aprovechamiento agrícola en regiones cálidas y templadas. Este sistema, conocido como roza-tumba-quema, consistía en preparar la parcela mediante la tala y quema de la vegetación durante la temporada seca. Posteriormente, se sembraba maíz al inicio de la temporada de lluvias, entre mayo y junio, y la cosecha se realizaba entre octubre y noviembre, al final de las lluvias. Tras la cosecha, la parcela fue abandonada para permitir la regeneración natural de la vegetación. Este periodo de descanso, conocido como barbecho, solía durar entre 8 y 15 años, lo que permitía la acumulación de vegetación que funcionaba como material combustible, y la quema liberaba nutrientes que enriquecen el suelo para el siguiente ciclo agrícola (Nigh & Diemont, 2013; Rodríguez Trejo, 2014).

No obstante, en las últimas décadas, el aumento de actividades humanas y la variabilidad climática han alterado los regímenes de fuego en la selva. Esto ha incrementado la frecuencia, extensión y severidad de los incendios, generando un mayor impacto sobre estos ecosistemas (Hirschberger, 2016; Kelly et al., 2024).

Esta problemática ambiental no solo conlleva la reducción de la extensión de la selva, sino también la afectación de servicios ambientales cruciales, como la disminución de la recarga de acuíferos, la captura de carbono, el desarrollo del suelo, la producción de oxígeno y la pérdida de biodiversidad vegetal y animal (Cochrane, 2009).

I.1 Justificación

Trumbore et al. (2015) mencionan que para monitorear la salud forestal se necesita el uso de técnicas de teledetección y trabajo a nivel parcela a largo plazo para identificar la recuperación o el declive de las funciones forestales derivados de factores antrópicos, climáticos y bióticos. Actualmente la tala, las plagas de insectos, las enfermedades, los fenómenos meteorológicos, y los incendios forestales han causado la degradación de la vegetación.

El uso del fuego en actividades agropecuarias está provocando incendios recurrentes en la selva de Campeche. De acuerdo con la carta de USV serie VII del INEGI, los municipios de Escárcega y Calakmul mantienen la mayor superficie de selva en estado conservado. Por lo tanto, comprender cómo influyen los incendios y su recurrencia en este tipo de vegetación es determinante para su conservación. Actualmente, la alteración del régimen de fuego en estos ecosistemas tiene repercusiones directas en la provisión de servicios ambientales para las comunidades que dependen de ellos.

Por ello, la justificación de este proyecto de investigación radica en analizar la distribución espacial y temporal de los incendios que afectan la vegetación de selva durante el periodo de 2013 a 2020. Este rango temporal permite identificar tendencias recientes en la ocurrencia de incendios en la región, considerando años con registros significativos de actividad ígnea y la influencia de eventos climáticos, como El Niño. Asimismo, este periodo ofrece acceso a datos satelitales consistentes y detallados que facilitan un análisis preciso de los patrones espaciales y temporales de la vegetación afectada por los incendios. Estos incendios se han documentado en el municipio de Escárcega y en su propagación hacia municipios colindantes, como Calakmul, que alberga la mayor superficie de selva en estado conservado. Estas áreas poseen un alto valor ambiental y servicios ecosistémicos cruciales para la funcionalidad ambiental de la región. Además, un análisis de susceptibilidad a incendios ha revelado que el 19% de esta superficie presenta un alto riesgo de

incendio, con una limitada capacidad de recuperación del 0.98% (POEOGCEC, 2015).

Para preservar el valor ambiental de la región, se propone una estrategia centrada en evaluar el impacto de los incendios. Mediante el uso de imágenes satelitales, se podrán identificar y analizar la severidad de los incendios utilizando índices espectrales, como el Índice de Superficie Quemada (BAI, por sus siglas en inglés Burnt Area Index), el Índice de Área Quemada Normalizado (NBR, por sus siglas en inglés Normalized Burn Ratio) y la Diferencia del Índice NBR (dNBR). Además, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index) permitirá evaluar la respuesta de la vegetación post-incendio. Las técnicas de campo complementarán este análisis al diagnosticar las áreas afectadas y llevar a cabo entrevistas semiestructuradas a nivel federal, estatal, municipal y local. Se espera que este enfoque multinivel e integral proporcione una evaluación detallada de cómo los incendios y su severidad, entendida como el efecto de un incendio en las propiedades del ecosistema vegetativo, a menudo definido por el grado de quemado, consumo y mortalidad de la vegetación y la recuperación vegetativa proyectada o final, impactan la selva maya de Escárcega (Lentile et al., 2006; Morgan et al., 2001).

I.2 Preguntas de investigación

1. ¿De qué manera la severidad de los incendios ha afectado la selva de la región oriental de Escárcega?
2. ¿Qué nivel de confiabilidad presentan los índices de área quemada BAI y NBR en la detección de incendios en las regiones tropicales?
3. ¿Cómo se relaciona la variación del índice espectral Delta NBR con la severidad de las áreas de selva afectadas por incendios?
4. ¿Cuáles son los posibles patrones temporales observados en el comportamiento del NDVI en las selvas afectadas por incendios?

I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo general

Analizar los impactos de los incendios ocurridos entre 2013 y 2020 en la selva de la región oriental del municipio de Escárcega, Campeche, mediante datos satelitales y participación de actores sociales.

I.3.2 Objetivos particulares

1. Conocer el impacto de la severidad de los incendios en la vegetación de selva mediante actores sociales.
2. Caracterizar la distribución espacial y temporal de los incendios mediante imágenes de satélite.
3. Evaluar la severidad de los incendios en la selva mediante el análisis del comportamiento espectral, imágenes obtenidas con aeronaves pilotadas a distancia y trabajo de campo
4. Conocer la variabilidad espectral de la vegetación afectada por incendios utilizando series multitemporales.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

II.1 Incendios en selvas

II.1.1 *Ecosistemas de selva a nivel mundial*

Los ecosistemas han evolucionado experimentando disturbios y perturbaciones como sequías, vientos, plagas de insectos, enfermedades e incendios. Esto en la actualidad junto con nuevos factores de estrés hacia los ecosistemas forestales, como deforestación por actividades antrópicas, cambio climático y especies invasoras, están imposibilitando que los ecosistemas se adapten evolutivamente tan rápido a estos cambios. Lo que significa que la vegetación deberá responder a múltiples factores que abarcan escalas locales hasta globales a futuro (Cash et al., 2006; Trumbore et al., 2015).

Las selvas tropicales, los ecosistemas más ricos en biodiversidad del planeta, enfrentan una situación alarmante. Su vegetación está desapareciendo a un ritmo acelerado, poniendo en peligro innumerables especies y el equilibrio ecológico global (Gentry, 1992). Los disturbios o perturbaciones en la vegetación de selva pueden ocasionar la modificación de la temperatura, la precipitación, la infiltración de agua, los sumideros de carbono y pérdida de biodiversidad tanto vegetal como animal (Cochrane, 2009).

Un estudio realizado por The Nature Conservancy (2004) indica que el 36% de las ecorregiones son sensibles al fuego, 46% son dependientes del fuego o se encuentran influidas por el fuego y solo el 18% es independiente del fuego. El 36% de las ecorregiones sensibles al fuego se ubican en los ecosistemas de selvas tropicales (**Figura 1**).

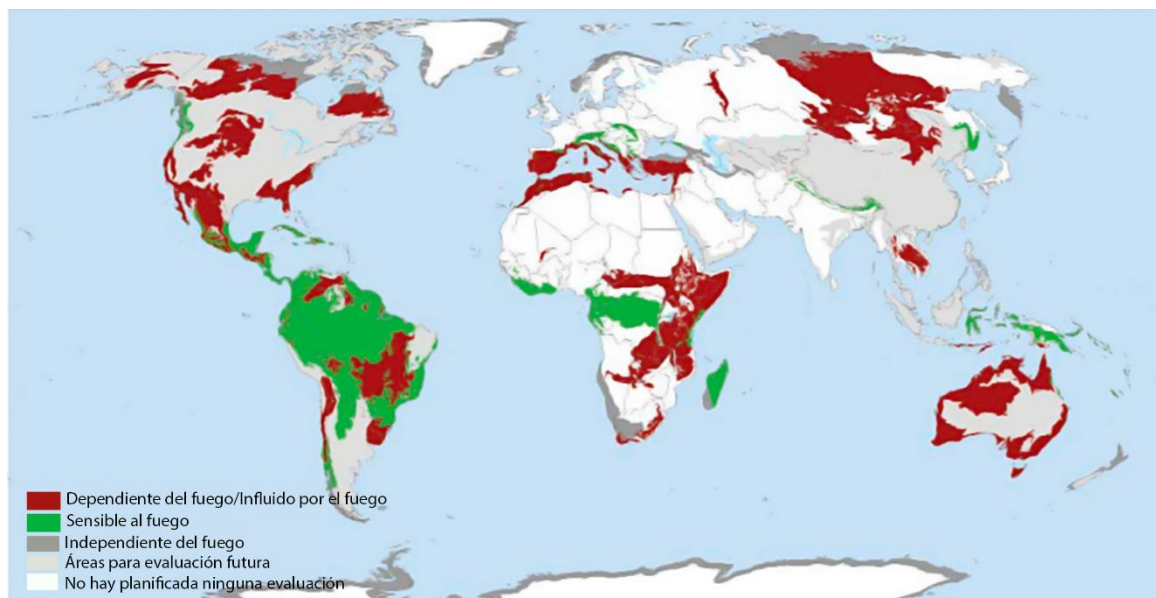


Figura 1. Ecorregiones prioritarias y regímenes del fuego dominantes.

Fuente: The Nature Conservancy, 2004; modificado.

Las selvas tropicales se distribuyen geográficamente entre las latitudes 23.5° N y 23.5° S (**Figura 2**). Su caracterización y delimitación dependen principalmente de la distribución anual de las lluvias, la elevación y el tipo de suelo. Estas condiciones propician un elevado flujo de energía solar, una alta tasa de evaporación del agua oceánica y de evapotranspiración en superficies terrestres tropicales, lo que genera una columna ascendente de aire cálido y húmedo, favoreciendo el desarrollo de esta densa vegetación (Thomas & Baltzer, 2002).

Las selvas que mantienen condiciones constantemente húmedas, sin meses con menos de 100 mm de precipitación, se conocen como selvas lluviosas tropicales. Por otro lado, las selvas secas tropicales experimentan un período de sequía severa, durante el cual la mayoría de los árboles pierden sus hojas para reducir la pérdida de agua. Finalmente, las selvas tropicales subperennifolias tienen un período de sequía menos extremo, en el que la pérdida de hojas no es tan pronunciada como en las selvas secas. Además, existen subdivisiones adicionales basadas en la elevación, tipo de suelo y diferencias estructurales, que incluyen la altura del dosel, la forma de la copa, la morfología de las hojas, la posición de flores

y frutos, así como la presencia de plantas trepadoras o epífitas (Thomas & Baltzer, 2002).

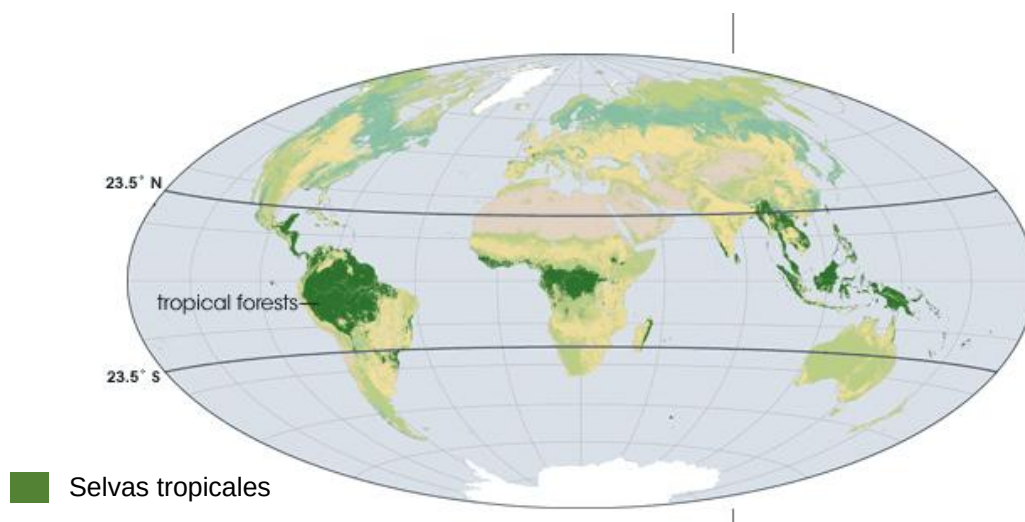


Figura 2. Distribución global de las selvas tropicales.

Fuente: Thomas & Baltzer, 2002

En el año 2015 se documentó que 98 millones de ha fueron afectadas por incendios, principalmente en los trópicos donde se distribuye la vegetación de selva, en donde se afectó un total de 4% de la superficie forestal principalmente en América del Sur y África. El cambio climático ha originado temporadas de incendios más largas y más severas en gran parte del mundo, por citar algunos ejemplos: Australia, Brasil, Grecia, Rusia y Estados Unidos (FAO & PNUMA, 2020).

El fuego ha sido una herramienta muy importante en la ordenación territorial, que ha ocasionado incendios forestales, originados por las personas deliberadamente. Un ejemplo de esta situación son las selvas tropicales, que están sometidos a incendios recurrentes causados por los seres humanos con el fin de remover árboles para prácticas agropecuarias. Sin embargo, factores como el crecimiento y desarrollo en comunidades donde predominan los ecosistemas forestales ha revelado que existe una incidencia de incendios relacionados con el cambio y uso del suelo y desarrollo de caminos (Cruz Espíndola et al., 2017; The Nature Conservancy, 2004).

Para mitigar los efectos negativos de los incendios forestales y reducir su frecuencia, es esencial implementar una gestión del fuego y un manejo forestal inteligente que tome en cuenta tanto las realidades socioculturales como la ecología de las áreas afectadas acorde con el contexto actual del calentamiento global (FAO & PNUMA, 2020; IPCC, 2022).

II.1.2 Incendios de selva en México

En México, el uso del fuego por parte de las personas ha tenido históricamente diversos fines, como abrirse camino entre la vegetación, preparar terrenos para cultivos o pastizales, facilitar la cacería y establecerse en nuevos asentamientos. En la actualidad, el fuego sigue siendo utilizado en la agricultura para limpiar la cubierta forestal y preparar terrenos para el cultivo, una práctica que tiene más de 3,000 años y que fue implementada por pueblos mesoamericanos como los mayas y los olmecas (Martínez Domínguez & Rodríguez Trejo, 2008).

En las áreas tropicales con vegetación de selva y suelos pedregosos y poco profundos, se aplica el método conocido como 'roza, tumba y quema', considerado un sistema agroforestal eficiente (Martínez Domínguez & Rodríguez Trejo, 2008). Sin embargo, aproximadamente entre 20 y 30 años, el periodo de barbecho o descanso, que solía durar varias décadas, se ha reducido a sólo dos o tres años. Esta reducción ha intensificado la deforestación y aumentado el riesgo de incendios en las zonas tropicales donde prevalece la vegetación de selva en el país.

La CONAFOR (2021) desarrolló cartografía (**Figura 3**) para identificar los ecosistemas según su relación con el fuego, clasificándolos en cuatro categorías principales. Según esta cartografía, el 40% de los ecosistemas están adaptados al fuego. Estos ecosistemas cuentan con estrategias específicas para manejar este fenómeno, como la regeneración rápida de la vegetación tras un incendio, semillas resistentes al calor y cortezas gruesas que protegen a los árboles de daños severos.

Por otro lado, el 17% de los ecosistemas se consideran independientes del fuego, ya que no dependen de este para su dinámica ecológica, aunque pueden tolerar su presencia ocasional. El restante corresponde a ecosistemas sensibles al fuego, los cuales abarcan aproximadamente el 19% de la superficie forestal del país. Estos ecosistemas incluyen selvas alta, mediana y baja, así como selvas perennifolias, subperennifolias y caducifolias (INEGI, 2018). También se encuentran ecosistemas particularmente vulnerables, como las selvas de galería y la vegetación de petén, que desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono (Cochrane, 2009).

Los incendios en estos ecosistemas sensibles tienen consecuencias devastadoras, ya que alteran profundamente su estructura y función ecológica, comprometiendo la regeneración natural y poniendo en riesgo especies endémicas. Además, el cambio climático y las actividades humanas, como la agricultura, la ganadería y los asentamientos irregulares, están incrementando la frecuencia, intensidad y extensión de los incendios (Ceballos et al., 2010; Cochrane, 2009; Estrada & Coates-Estrada, 2003; Zamora-Crescencio et al., 2017).

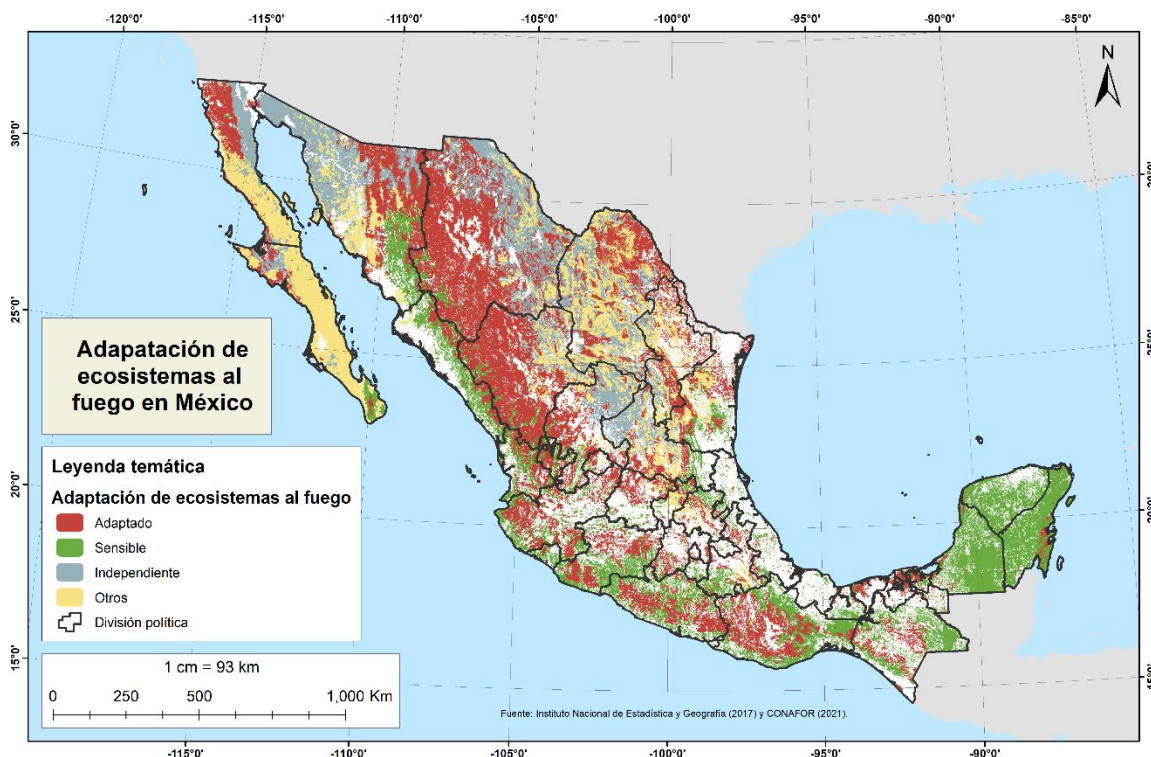


Figura 3. Adaptación de ecosistemas al fuego en México

Fuente: CONAFOR, 2021.

La falta de una cultura forestal y la pobreza han jugado un papel muy importante respecto al uso del fuego. Las quemas en terrenos agrícolas con fines de limpieza, fertilización, control de plagas que, junto con la denominada roza, tumba y quema, forma parte del principal grupo causal de incendios forestales. Esto ha derivado en un cambio de uso de suelo forestal para terrenos agrícolas y de pastizal (Martínez Domínguez & Rodríguez Trejo, 2008).

Los incendios forestales que con su intensidad y recurrencia han sido la principal causa de afectación a la vegetación de selva. Se consideran tres tipos de incendios forestales: superficiales, donde el fuego consume los combustibles que se han depositado sobre el suelo, como hierbas, zacates, leñas, hojarascas, sin quemar todo el cuerpo de los árboles. Subterráneos, el fuego quema el mantillo y raíces bajo la superficie del suelo o la materia orgánica acumulada en las fracturas de grandes afloramientos de roca y por último los incendios de copa o corona, los cuales son

poco frecuentes en México (Villers Ruiz & López Blanco, 2004). En la selva los incendios suelen ser superficiales y subterráneos, en el primer caso se quema la hojarasca y en el segundo caso se queman los materiales en descomposición a menudo hojas y ramillas. Sin embargo, el paso de los huracanes suele incrementar la cantidad de hojas y ramas para alimentar el fuego superficial, así como el derribo de árboles completos incrementando la carga de combustibles superficiales (Rodríguez Trejo, 2014).

Está bien documentado que el periodo de retorno de los incendios forestales en selvas poco o no perturbadas suelen ser de siglos, esto debido a la permanente y elevada humedad que presentan (Rodríguez-Trejo et al., 2019). Sin embargo, la probabilidad de incendios no solo ha aumentado debido a la deforestación causada por actividades humanas, el cambio climático y la mayor disponibilidad de combustibles, sino también por la irresponsabilidad en el manejo del fuego en estos ecosistemas (Rodríguez-Trejo et al., 2011). Además, la invasión de helechos pirófilos y el aumento de la radiación solar contribuyen a que los combustibles estén disponibles. Esto se conjuga con una, mayor presencia de fuentes de ignición debido a actividades agropecuarias que incrementa el riesgo de incendios (Rodríguez-Trejo et al., 2019; Trumbore et al., 2015).

II.2 Regímenes de fuego en ecosistemas de selva

El régimen de fuego es la amplitud de la variación natural o histórica en la frecuencia, estacionalidad, intensidad, severidad y tamaño de los eventos de incendios y su asociación con otros agentes de perturbación, a la que ha estado sometido un ecosistema por un período de tiempo. Actualmente los regímenes del fuego en los ecosistemas han cambiado a través de la historia, especialmente en relación con los cambios en el clima y las actividades humanas (Oddi, 2018).

Gutiérrez Martínez et al. (2014) mencionan que los periodos de recurrencia de incendios difieren de un año a otro. Estos dependen de la cantidad de lluvia del año

anterior, ya que en años lluviosos suele ser mayor la cantidad de biomasa. En temporada de sequía, dicha biomasa en conjunción con las temperaturas altas, la velocidad y dirección de los vientos, se convierte en combustible disponible y altamente inflamable. Esta combinación de factores ambientales junto con la actividad antropogénica, incrementa la probabilidades de ignición e incendios catastróficos que llegan a afectar cientos de hectáreas.

El fuego de origen natural en las selvas es casi nulo, dadas las condiciones de baja inflamabilidad presentes en las regiones con poca o nula alteración humana. En el caso de la selva baja suele de ser de 10 años a décadas. En el caso de la selva mediana o alta es de varias décadas a siglos. Estos eventos son considerados de baja intensidad pero alta severidad y catastróficos cuando existe material acumulado (Rodríguez-Trejo, 2014).

En selvas afectadas por perturbaciones humanas, donde hay una mayor presencia de fuentes de ignición cercanas, la probabilidad de incendio aumenta debido a la disponibilidad de combustibles, la presencia de vegetación herbácea y arbustiva, el incremento de la radiación solar que facilita la disponibilidad de estos combustibles, y, principalmente, la cercanía de terrenos agropecuarios (Rodríguez-Trejo, 2014). En América Central y México en 1988 y 2000 se registraron incendios de gran magnitud y destructivos en vegetación de selva que fueron provocados por la tala a gran escala, la construcción de caminos y el aumento de los asentamientos humanos en las áreas protegidas y sus zonas aledañas a las que se sumaron factores como sequías prolongada y severas por el fenómeno de El Niño acentuado por el calentamiento global (The Nature Conservancy, 2004).

El uso continuo del fuego en la práctica agrícola y en la técnica tradicional de roza-tumba-quema (Martínez Domínguez & Rodríguez Trejo, 2008), junto con la deforestación, el cambio climático y actividades ilegales como la caza furtiva (Monzón Alvarado, 2018; Pérez Rodríguez et al., 2018), está provocando que

grandes superficies de selva se vean afectadas por incendios. Esta situación altera los regímenes de fuego, generando impactos que requieren ser evaluados en términos de frecuencia e intensidad, permitiendo así estimar la recuperación de las funciones de estos ecosistemas, en particular los bienes y servicios ambientales que proporcionan.

II.3 Índices espectrales para el análisis de la severidad de las áreas afectadas por incendios

El comportamiento de los incendios forestales, que se refiere a la forma en que el fuego se propaga, se desarrolla y afecta el entorno, está determinado por la interacción entre el combustible presente, las condiciones meteorológicas y la topografía (Rodríguez-Trejo et al., 2019; The Nature Conservancy, 2004). Este comportamiento es de particular interés cuando se puede obtener información sobre la intensidad del fuego y la capacidad de recuperación de un ecosistema. La intensidad del fuego refleja la magnitud del calor liberado al quemarse el combustible, y dependiendo de su grado, se pueden generar cambios en la vegetación que están directamente relacionados con la severidad del incendio definido como la magnitud de la biomasa consumida por el fuego (Guillem-Cogollos, et al., 2017).

Tras un incendio de vegetación se originan cambios como la pérdida de la materia orgánica, cambios químicos y físicos en la materia inorgánica, así como un impacto en el potencial de sobrevivencia de la vegetación a corto y mediano plazo (Guillem-Cogollos et al., 2017).

La severidad del fuego es un factor crítico en la dinámica de las áreas quemadas por la relación directa con la cantidad de biomasa consumida y la recuperación vegetal. Una alta severidad está vinculada al potencial de recuperación de vegetación más bajas que las áreas de baja severidad (Chuvieco Salinero, 2009; Montorio Llovería et al., 2014).

Para evaluar la severidad del incendio, se han utilizado imágenes de satélite, al considerar que un proceso de combustión supone cambios en la reflectividad superficial, asociado a la eliminación de la vegetación, la exposición del suelo, los cambios en el contenido de humedad y la aparición de nueva vegetación. Por ello el índice espectral *Normalized Burn Ratio* (NBR) ha sido el más utilizado y con mejores resultados que otros índices al combinar las dos bandas espectrales que responden al fuego de manera contrastada utilizando la banda de infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio de onda corta (SWIR) tal y como se describe en la ecuación, donde R_{NIR} es la reflectividad en la banda NIR y R_{SWIR} es la reflectividad en la banda del SWIR (Montorio Llovería et al., 2014; Viana-Soto et al., 2017).

$$NBR = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}} \quad (1)$$

El índice NBR en los últimos años ha demostrado tener resultados más robustos, para la estimación del grado de severidad de los incendios, el cual se ha permitido trabajar con distintos sensores y satélites como MODIS, Landsat y actualmente Sentinel-2 con lo que se ha buscado obtener una mejora en la estimación de la severidad de incendios y también para los procesos de recuperación post fuego (Delegido et al., 2018).

Para analizar la severidad se desarrolló el índice *delta Normalized Burn Ratio* (dNBR), para estimar la recuperación de la biomasa a través del espacio, el tiempo tal y como se describe en la ecuación (Montorio-Llovería, et al., 2014).

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \quad (2)$$

Para aplicar este tipo de índice dNBR se necesitan dos imágenes una previa al incendio y otra posterior. Este índice suele trabajar con valores establecidos bajo

condiciones específicas para Estados Unidos, y no tiene por qué ser válidos al extrapolar a otra zona de estudio (**Tabla 1**) (Guillem-Cogollos et al., 2017).

Tabla 1. Relación entre el índice dNBR y la severidad.

dNBR	Severidad del incendio
< -0.25	Alto repoblamiento
-0.25 a -0.1	Bajo repoblamiento
-0.1 a 0.1	Sin quemar
0.1 a 0.27	Baja severidad
0.27 a 0.44	Moderada severidad
0.44 a 0.66	Moderada-Alta severidad
>0.66	Alta severidad

Los resultados obtenidos de este índice para otros tipos de vegetación permiten delimitar perfectamente las áreas afectadas por los incendios, pero al momento de utilizar la **Tabla 1** no se ajustan a la realidad debido a la diferencia que hay entre los tipos y características de vegetación, por lo que al tratarse de algún otro tipo de vegetación los valores establecidos de severidad deberán de ajustarse de acuerdo al ecosistema en el que se utilice este método (Guillem-Cogollos, et al., 2017).

El análisis de áreas post-incendio nos permite evaluar rastros dejados por el fuego, como cenizas, carbón y cambios en la vegetación. En teoría, estos elementos pueden visualizarse en cualquier tipo de vegetación, lo que nos permite obtener el perímetro, el área y una estimación de los daños causados por incendios forestales. Estos factores se consideraron para aplicar el índice dNBR en la región del río Amazonas, utilizando imágenes MODIS, donde la vegetación predominante son los bosques tropicales y donde este tipo de estudios es escaso.

La vegetación analizada se clasificó como Bosque Submontano Ombrófilo Abierto, con áreas de sabana forestal y bosque estacional semideciduo submontano. Esto difiere considerablemente de la vegetación en Estados Unidos, donde se ha implementado el índice dNBR para evaluar la severidad de incendios y donde se han establecido valores específicos. Los resultados obtenidos con el índice dNBR demostraron su precisión al utilizar imágenes pre y post-incendio; sin embargo, se

identificaron limitaciones relacionadas con la intensa dinámica de la deforestación y la deficiencia del índice NBR para medir la gravedad de las quemas en los bosques tropicales. Esto podría deberse a la resolución espacial de las imágenes MODIS y a las pequeñas áreas quemadas, problemas que podrían mitigarse utilizando imágenes de mayor resolución y ajustando los valores de clasificación para la severidad (Santana et al., 2018) .

El trabajo realizado por Manzo Delgado & López García, (2013) para la detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando los índices NBR y BAI con compuestos MODIS, evidencia que es necesario realizar ajustes en los umbrales pre y post-incendio de los índices debido a que las condiciones ambientales tropicales en el sureste de México difieren de las condiciones promedio de Latinoamérica, generando una respuesta espectral menor post-incendio. Esto permite identificar nuevas superficies quemadas y mejorar el desempeño de estos índices.

Las imágenes Landsat a través del tiempo han provisto información para la detección y delimitación cartográfica de las áreas quemadas, al proveer una mayor resolución, los resultados suelen ser más robustos. En un caso de estudio aplicando el índice NBR con imágenes pre y post incendio en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, en Chiapas, se demostró que la respuesta espectral de la vegetación de selva con imágenes previas y posteriores permitió analizar los efectos del fuego. Lo que ha demostrado buen resultado al trabajar con este tipo de vegetación en México. La mayoría de estudios se han realizado con bosques de coníferas en países como Estados Unidos o España dejando a un lado el análisis de este índice en bosques tropicales (Manzo-Delgado & López-García, 2020).

II.4 Recuperación de la vegetación post incendio

Los incendios forestales son considerados un problema ambiental, al originar alteraciones en los ecosistemas como la degradación de suelos, agua y

biodiversidad. Por esta razón en los últimos años ha sido de suma importancia el uso de datos satelitales para analizar la dinámica ecológica después de un incendio y la recuperación de la vegetación (Viana-Soto et al., 2017).

La evaluación de la recuperación de la vegetación post incendio se puede observar a partir de la estimación visual en campo tomando datos para determinar especies, densidad, estrato, cobertura y frecuencia de las plantas en las áreas quemadas. Lo que conlleva un gasto en términos de tiempo y dinero, especialmente para áreas remotas, extensas o de difícil acceso (Montorio Llovería et al., 2014). Una alternativa para la evaluación de la regeneración de vegetación a partir de datos satelitales es las series de tiempo para analizar las diferentes respuestas espectrales pre y post fuego.

Los incendios recurrentes modifican las características de los ecosistemas provocando que tipos de vegetación se transformen en sábanas en donde una temporada seca hace que la mortalidad aumente drásticamente habiendo una recurrencia del fuego lo que hace muy difícil que estos tipos de vegetación se recuperen (Verbesselt et al., 2016).

Verbesselt et al. (2016) llevaron a cabo un estudio sobre la resiliencia del ecosistema, definida como la capacidad de un ecosistema para recuperarse rápidamente de perturbaciones. La resiliencia refleja tanto la resistencia como la capacidad de recuperación del ecosistema, permitiendo que este regrese a condiciones similares a las previas al disturbio y restablezca los atributos afectados (Guerra Martínez et al., 2020; Verbesselt et al., 2016). En su investigación, exploraron si existía una desaceleración en la velocidad de recuperación de los ecosistemas, utilizando patrones de autocorrelación temporal a lo largo de diez años (2000-2010) a partir de imágenes satelitales de bosques tropicales perennifolios en América del Sur, África y el sudeste asiático.

El estudio analizó patrones espaciales de desaceleración, inferidos a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), como indicador de la recuperación de la vegetación tras perturbaciones. Los resultados sugieren que estos patrones de lentitud en la recuperación pueden ser señales tempranas de una disminución en la resiliencia de los bosques tropicales.

(3)

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Donde: NIR (en inglés *Near Infrared Band*) es el valor de reflectancia en el infrarrojo cercano; y RED es el valor de reflectancia en la banda del rojo. Este índice nos proporciona la normalización de la relación simple y varía de 1 a -1, cuanto más cercano a 1, mayor es su actividad fotosintética, es decir mayor es la presencia de vegetación y los valores bajos o cercanos a cero muestran que el área tiene poca o nula cobertura vegetal. Los valores negativos representaron el agua. Dependiendo del sensor, las bandas RED y NIR se ubicarán en posiciones distintas (Verbesselt et al., 2010).

Para medir la actividad de la planta, biomasa y cobertura desde el espacio; y poder tener una autocorrelación temporal de la información analizada a partir del NDVI, se utilizó un indicador independiente llamado Vegetación Óptica Profundidad (VOD). Este mide el contenido de agua en la biomasa aérea, que se obtuvo a partir de datos RADAR. Los resultados obtenidos indican que hay una fuerte autocorrelación en los tres continentes y su bosque tropical debido a que reaccionan ante perturbaciones como la sequía y el calor extremo, esto se observó en la variable de precipitación, cuando esta disminuye por debajo de los 1,500 mm y la temperatura aumenta e influyen en las tasas de rebrote de los bosques, su crecimiento y la mortalidad de árboles, mostrando una disminución en su capacidad de recuperación y lo que refleja una recuperación más lenta de los árboles tras perturbaciones. Sin embargo se debe de considerar que en cada uno de los ecosistemas forestales la resiliencia forestal estará determinada por otros factores y características de las especies que

afectan las tasas de crecimiento de las plantas y la capacidad de recuperarse de las perturbaciones, por lo que para tener una visión más detallada de las causas de la lentitud de la recuperación percibida, es importante contar con un estudio de campo a largo plazo donde las variables climáticas y fisiológicas de la vegetación puedan ser supervisadas. En conclusión, la identificación de una desaceleración en la recuperación de los bosques tropicales puede ser un indicativo de la proximidad de puntos de inflexión críticos que podrían llevar a la extinción de estos ecosistemas. Los datos satelitales de alta resolución nos pueden ofrecer posibilidades de monitorear la resiliencia a nivel mundial utilizando indicadores como la ralentización crítica (Verbesselt et al., 2016).

La vegetación está sujeta a disturbios de origen tanto natural como antrópico, los cuales alteran sus condiciones y funcionamiento. No obstante, en los últimos años, los disturbios de origen antrópico han aumentado considerablemente, lo que ha incrementado la presión sobre los ecosistemas, exigiendo una mayor capacidad de resiliencia para enfrentar estos cambios y recuperarse adecuadamente (Guerra Martínez et al., 2020; Verbesselt et al., 2016).

Una estrategia de supervivencia de las plantas en los bosques tropicales secos es la producción de semillas que se dispersan y permanecen en latencia durante los periodos de sequía. Estas semillas germinan cuando las condiciones de humedad del suelo son adecuadas para su establecimiento (Guerra Martínez et al., 2020). Sin embargo, en condiciones de incendios de alta severidad, tanto los especímenes de distintas edades como las semillas pueden verse comprometidos debido a la intensidad y características del fuego. Por ello, la evaluación de la recuperación de la cobertura vegetal requiere un análisis exhaustivo que proporcione información sobre los atributos ecológicos, apoyado en datos satelitales que permitan inferir los cambios tanto de origen natural como antrópico, así como sus impactos a largo plazo en las selvas tropicales.

Al combinar datos satelitales con estudios de campo, se logra una alternativa valiosa para integrar diferentes niveles de análisis, desde lo local hasta el paisaje y la escala regional. Esta integración permite una comprensión más profunda de la resiliencia ecológica en ecosistemas vulnerables a la recurrencia de incendios. Al vincular la información obtenida de la observación remota con las mediciones detalladas en el terreno, se pueden identificar patrones y procesos que afectan la recuperación de la vegetación, y evaluar de manera más precisa los impactos a largo plazo de las perturbaciones en estos ecosistemas (Guerra Martínez et al., 2020; Rodríguez Trejo, 2014).

Recientemente, en el estudio de Bright et al. (2019), se analizó la severidad de los incendios y la recuperación de la vegetación utilizando series temporales de imágenes del satélite Landsat. El estudio empleó el índice de Vegetación Normalizada Quemada (NBR) y mostró una correlación significativa al aplicar el índice dNBR para evaluar los cambios en la cobertura vegetal. Los sensores Landsat TM, ETM+ y OLI, que han capturado imágenes de la Tierra con una resolución de 30 metros cada 16 días desde 1984, han permitido el desarrollo de algoritmos para la recuperación de la vegetación a partir de series temporales, gracias a su extenso catálogo de imágenes.

Los resultados obtenidos mediante el uso del índice NBR en series temporales, junto con datos climáticos y topográficos en bosques templados de América del Norte, han mostrado que la recuperación de la vegetación alcanza entre el 54% y el 77% de la cobertura original en un período de 13 años después del incendio. En el trabajo de campo, se instalaron parcelas de muestreo para obtener medidas detalladas de la vegetación, incluyendo la cobertura del suelo, la densidad vegetal y la presencia de especies específicas. La validación de la recuperación de la vegetación a través de este trabajo de campo confirmó que las especies herbáceas y el crecimiento de especies arbustivas son responsables de esta recuperación. Además, el estudio reveló que las áreas quemadas con mayor severidad se recuperaron a un ritmo más rápido que aquellas con menor severidad. Esto podría

atribuirse a la adaptación de los bosques de coníferas al fuego, lo que crea condiciones más favorables para la germinación y regeneración (Bright et al., 2019).

II.5 Normativas sobre el uso del fuego en la gestión y conservación de la selva

El uso del fuego en el sureste mexicano se emplea tanto en la limpieza de terrenos agropecuarios mediante quemas controladas, como en terrenos forestales a través de quemas prescritas. Estas prácticas permiten la remoción de la vegetación en diferentes etapas de sucesión, facilitando las actividades agrícolas de los habitantes. Sin embargo, los terrenos agropecuarios están inmersos en una matriz de selvas medianas, bajas y zonas inundables, lo que aumenta el riesgo de que una quema agropecuaria fuera de control pueda derivar en un incendio forestal (Monzón Alvarado, 2018).

En los últimos años, se ha registrado un aumento en la incidencia de incendios en el sureste de México, lo que ha llevado a que entidades federativas como Campeche y Quintana Roo se consideren entre las más afectadas en términos de superficie quemada (SNIGF, 2020). En el estado de Campeche, donde se desarrolla esta investigación, ha habido un incremento notable en la cantidad de incendios, resultando en una mayor extensión de selva quemada en comparación con años anteriores. Por ejemplo, los años 2017 y 2019 destacaron por el alto número de incendios y la considerable superficie afectada, según datos del Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal del programa de manejo del fuego (SNIGF, 2020).

Las causas de la quema de la selva podrían atribuirse a factores como el desconocimiento o la inadecuada aplicación de leyes en materia de manejo del fuego en el estado, así como a cuestiones histórico-culturales, el crecimiento poblacional, la protección ambiental y la producción de alimentos (Monzón Alvarado, 2018; Pagan et al., 2021; SNIGF, 2020).

Derivado del incremento de incendios reportados en los últimos años han surgido diversos instrumentos a nivel federal, estatal, municipal y local para poder regular el manejo del fuego de modo que se permita realizar quemas que no pongan en riesgo áreas de valor ambiental que puedan ser vulnerables a consecuencia de incendios. Por nombrar algunos de los instrumentos que permiten regular el manejo del fuego está la **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable** (LGDFS) que recibió una actualización en el 2024. Esta ley es de carácter federal por lo que su aplicación es para todo el país. Este documento tiene como concepto que el Manejo del Fuego en Áreas Forestales es *“el proceso que comprende el conjunto de acciones y procedimientos que tiene por objeto evaluar y manejar los riesgos planteados por el uso del fuego, su rol ecológico, los beneficios económicos, sociales y ambientales en los ecosistemas forestales en los que ocurre”* por lo que el uso del fuego en el país está regulado, y de acuerdo con el capítulo I “De la Distribución de Competencias en Materia Forestal en el artículo 10 numeral XVII, establece que se debe de llevar a cabo una coordinación para la elaboración y aplicación del Programa de Manejo del Fuego en ecosistemas forestales con la participación que corresponda a las Entidades Federativas, Municipios, Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México y al Sistema Nacional de Protección Civil que les permita participar y coadyuvar en las acciones de manejo de fuego, así como participar en la atención, en general, de las emergencias y contingencias forestales de acuerdo a los programas de protección civil (DOF, 2024).

En el capítulo III de esta misma ley, los Incendios Forestales y del Manejo del Fuego en el Artículo 117 indica que la *“La Secretaría dictará las Normas Oficiales Mexicanas que regirán el manejo del fuego, para evaluar los daños, restaurar el área afectada por incendio y establecer los métodos de manejo del fuego en los terrenos forestales, temporalmente forestales, agropecuarios y colindantes, así como los procedimientos para establecer el Sistema de Calificación para el manejo del fuego y el Sistema de Comando de Incidentes para el manejo del fuego en ecosistemas forestales”*.

Derivado de la actualización de la LGDFS, en el año 2020 se actualizó el **Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (RLDFS)** (DOF, 2020), de manera que en el capítulo II de los Incendios Forestales y del manejo del Fuego del reglamento y el Artículo 207 indica que *“La Comisión podrá proponer a la Secretaría y a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural la estrategia para el Manejo del fuego y el impulso de alternativas de producción agropecuaria sin el uso del fuego a que se refiere el artículo 24, fracción VII de la Ley, la cual considerará lo siguiente:*

- I. Los métodos para reducir el daño a los Recursos forestales por efecto de las quemas agropecuarias escapadas;*
- II. Los aspectos técnicos a considerar para restringir temporalmente el uso del fuego agropecuario en zonas donde las condiciones meteorológicas favorezcan Incendios de gran magnitud, y*
- III. Las medidas y acciones para organizar a las comunidades rurales en la ejecución de quemas agropecuarias de bajo riesgo”.*

Derivado de la implementación de la **Ley Forestal en 1992** y el reglamento de esta, se crea en conjunto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA) actualmente Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) la **Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-1997** que recibió una actualización en el año 2007 y ahora se conoce como NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, que tiene como objetivo establecer las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario, actualmente esta Norma se encuentra en revisión para recibir una actualización derivado de las actualizaciones de la LGDFS y el RLDFS que fueron actualizados recientemente (SEMARNAT & SAGARPA, 2007). Como puntos importantes a considerar por esta Norma es que las personas que realizan quemas deben de cumplir con los siguientes puntos:

- Presentar el Aviso de Uso del Fuego (anexo 1 de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007)
- Hacer uso del fuego, solamente cuando no existan incendios en un radio de 10 km
- No realizar quemas simultáneas en terrenos vecinos
- Verificar la existencia de un calendario de quemas municipal, ejidal o comunal
- Avisar a los vecinos del terreno previo a realizar la quema

A nivel estado, Campeche actualizó en el año 2015 la **Ley de Uso de Fuego en Terrenos Agropecuarios en el Estado de Campeche** que tiene por objetivo establecer y regular en el estado el uso del fuego en las actividades relacionadas con la explotación de la tierra para fines agropecuarios y evitar la destrucción de las masas arboladas, del renuevo de las especies forestales, de los cultivos y plantíos, de la fauna silvestre, de la apicultura y la ganadería, recursos cuya preservación, conservación y fomento son de interés público (Poder Legislativo del Estado de Campeche, 2015).

Según el trabajo de Monzón Alvarado, en 2012, el municipio de Calakmul adoptó las recomendaciones para el manejo del fuego agropecuario basadas en los instrumentos de la Ley de Uso de Fuego en Terrenos Agropecuarios en el Estado de Campeche (2015) y la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, destacando el fortalecimiento continuo de estos instrumentos para promover un manejo responsable del fuego. No obstante, en otros municipios del estado de Campeche, la superficie quemada ha seguido aumentando. Esto podría atribuirse a la falta de seguimiento y aplicación efectiva de las leyes establecidas para el manejo adecuado del fuego.

En el año 2020 el estado de Campeche realizó una última reforma a la **Ley de Desarrollo Forestal Sustentable para el Estado de Campeche**, la cual indica en el artículo 33 que el estado como el municipio están obligados a contar con recursos

financieros, herramientas, equipos, vehículos y personal capacitado para realizar acciones de prevención, control y combate de incendios forestales. El artículo 34 indica que la prevención, combate y control de los incendios forestales será prioritaria para la conservación de las zonas forestales, así como el desarrollo sustentable del sector. Según dicha ley se deberá de contar con las delimitaciones de las regiones de daño potencial o zonas críticas de incendios forestales a las que deberá de dar atención prioritaria de acuerdo con su artículo 35 (PLEC, 2020). Esto es sumamente importante ya que se abre un paso importante el uso de tecnologías como la percepción remota e índices para identificar y cuantificar la severidad de los incendios en el estado de Campeche.

El gobierno de Campeche en el año 2013 apoyado del centro estatal de emergencias de estado, desarrollaron el **Plan Estatal de Contingencias para Incendios Forestales y Agropecuarios** preocupado por la protección de los recursos naturales y en particular de sus selvas y áreas naturales protegidas apoyándose institucionalmente de Comité Estatal de Prevención y Combate de Incendios Forestales, encabezadas principalmente por la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, la Comisión Nacional Forestal y la Secretaría de Desarrollo Rural, así como con el apoyo importante de la Secretaría de la Defensa Nacional y la Secretaría de Marina a través de la XXXIII Zona Militar y la Tercera Región Naval y los Comités Municipal de Prevención y Combate de Incendios Forestales los cuales buscan promover actividades de prevención, detección y combate de los incendios forestales y agropecuarios en la entidad, apoyándose en la participación de todos los sectores involucrados en la protección de la población y de los recursos naturales, si fuera necesario se buscará mantener y reforzar los mecanismos de detección oportuna y la adecuada integración de recursos para el combate que necesariamente son requeridos para responder ante situaciones que rebasen las estrategias preventivas (CENECAM, 2013).

En el año 2019 se publicó a nivel nacional el **Programa de Manejo del Fuego** en acción conjunta por parte de SEMARNAT y CONAFOR que concentra los esfuerzos

y recursos que las dependencias y entidades del Gobierno Federal, los Gobiernos Estatales y Municipales, así como los dueños y legítimos poseedores de los terrenos forestales destinan para prevenir, controlar y combatir los incendios forestales. Responde al mandato de la LGDFS antes mencionada, la cual busca el desarrollo de una política nacional de manejo del fuego al amparo de los recientes cambios en la LGDFS y los fundamentos legales de este instrumento permita transitar paulatinamente de la supresión total de incendios hacia el manejo del fuego del país con tres objetivos principalmente: 1) Proteger la seguridad de las personas; 2) Proteger la infraestructura estratégica y c) Proteger el medio ambiente (SEMARNAT & CONAFOR, 2019).

A nivel municipal en el estado de Campeche, el municipio de Champotón desarrolló un programa preventivo contra incendios forestales y agropecuarios en el año 2011 en donde la educación y sensibilización forma parte del programa, que busca realizar pláticas sobre prevención de incendios forestales. Este programa está dirigido a las comunidades y ejidatarios que realizan quemas y promover brigadas para el combate de incendios forestales. Que permitan informar a su vez sobre los riesgos químicos que un incendio provoca, fomentando una cultura de autocuidado y autoprotección para que cada uno tenga el conocimiento de qué hacer ante una situación de emergencia o la presencia de fenómenos perturbadores como los incendios (CEMECHAMP, 2011).

El municipio de Escárcega actualmente cuenta con el **Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio de Escárcega, Campeche** (POEOGCEC, 2015). En él se menciona que el territorio cuenta con importantes extensiones de selva baja y media, que todavía subsisten en un 82% del territorio. Elaborando un análisis de susceptibilidad a incendios forestales mediante criterios de la CONABIO, se determinó que el 19% de la superficie municipal presenta altas posibilidades de incendio, pero sus probabilidades de recuperación son solo del 0.98%. Estos datos pueden ser consultados en la **Tabla 2 y Figura 4**.

Tabla 2. Susceptibilidad a los incendios forestales en el municipio de Escárcega.

Nivel de susceptibilidad	Área Km ²	Área %
Alta probabilidad de incendio con alta recuperabilidad de la vegetación	46.225	0.98
Alta probabilidad de incendio con baja recuperabilidad de la vegetación	836.433	17.6
Baja probabilidad de incendio con baja recuperabilidad de la vegetación	3,181.54	66.93
Sin importancia por ser áreas altamente simplificadas por el hombre	633.193	13.32
Cuerpo de agua	55.802	1.17

Fuente: POEOGCEC (2015).

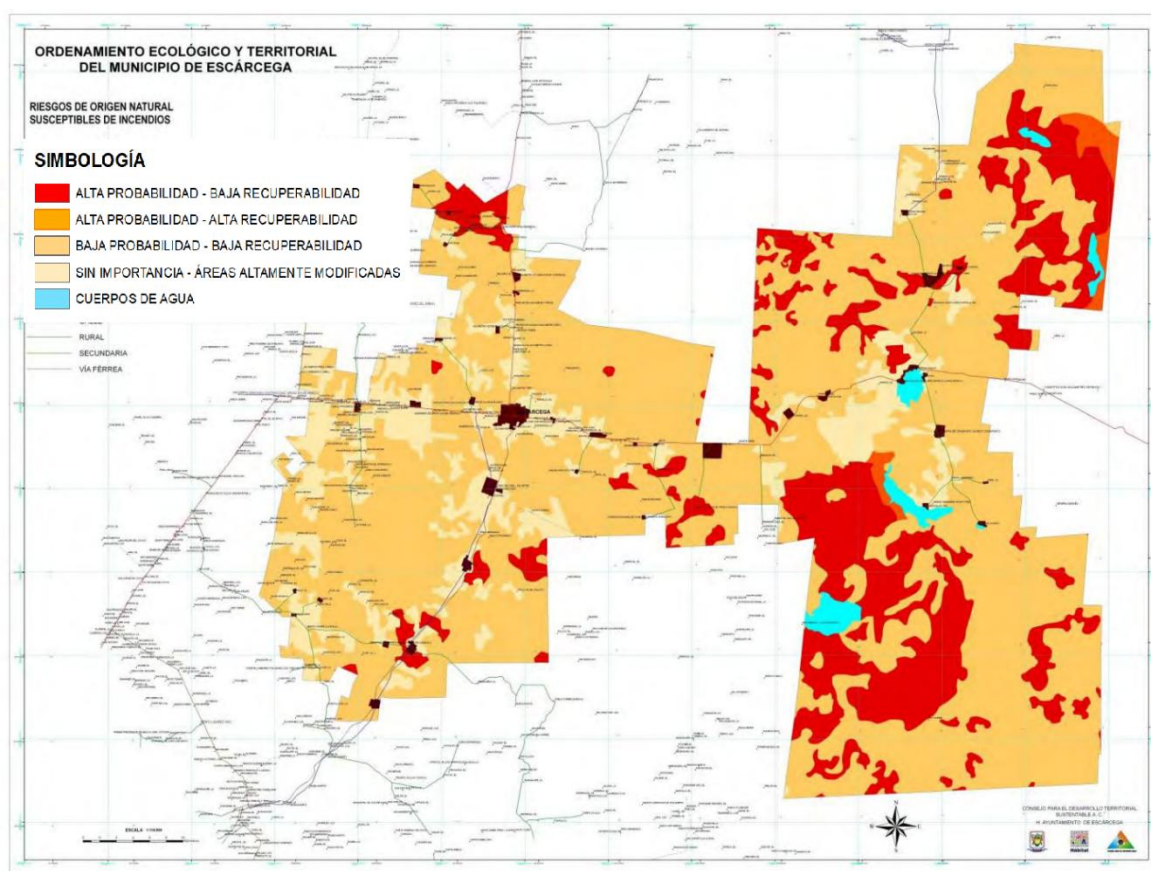


Figura 4. Áreas susceptibles a incendios forestales.

Fuente: POEOGCEC (2015).

De acuerdo con la investigación, existen leyes, normas y programas de gestión a nivel federal, estatal y municipal que promueven el manejo del fuego en ecosistemas sensibles, como la selva en el estado de Campeche. Sin embargo, esto no implica que las personas que utilizan el fuego de manera tradicional sean las únicas responsables de los incendios descontrolados. Otras causas, como la construcción de infraestructura (carreteras, líneas eléctricas y viviendas), modifican el entorno natural y aumentan la vulnerabilidad de las selvas y bosques al fuego, ya sea por accidentes o negligencia (The Nature Conservancy, 2004).

El incremento de asentamientos humanos en zonas cercanas a áreas naturales también eleva el riesgo de incendios. La expansión urbana y rural genera una mayor demanda de tierras para actividades agrícolas, ganaderas y otros usos, lo que a menudo conduce a la deforestación y a la quema de vegetación. Estas prácticas, debido a su ubicación geográfica, comprometen la conservación de áreas de alto valor ambiental (Pagan et al., 2021).

Además, estos factores se ven agravados por las variaciones climáticas, como las sequías prolongadas y el fenómeno de El Niño, exacerbados por el cambio climático, lo que contribuye a la degradación de las selvas tropicales (The Nature Conservancy, 2004). Por tanto, es crucial comprender la dinámica territorial que conduce a la quema de la vegetación de la selva y, a partir de ahí, desarrollar métodos de gestión adecuados para estos ecosistemas sensibles al fuego a nivel comunitario. Esto permitirá abordar las causas subyacentes y no solo mitigar los efectos del problema.

En la **Tabla 3** se hace un resumen de las leyes, reglamentos, normas e instrumentos de gestión aplicables en Campeche y Escárcega referentes al uso de fuego y la conservación de la vegetación de selva de su territorio.

Tabla 3. Listado de leyes, reglamentos, normas e instrumentos de gestión para Campeche.

Nivel espacial	Leyes y reglamentos	Instrumentos de gestión
Federal	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007	Programa de Manejo del Fuego
Estatad	Ley de Uso de Fuego en Terrenos Agropecuarios en el Estado de Campeche Ley de Desarrollo Forestal Sustentable para el Estado de Campeche	Plan Estatal de Contingencias para Incendios Forestales y Agropecuarios de Campeche
Municipal	-	Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio de Escárcega, Campeche Programa Preventivo Contra Incendios Forestales y Agropecuarios de Champotón, Campeche

Fuente: Elaboración propia con datos de CEMECHAMP, 2011; CENECAM, 2013; DOF, 2020, 2022; Poder Legislativo del Estado de Campeche, 2015; POEOGCEC, 2015; SEMARNAT & CONAFOR, 2019; SEMARNAT & SAGARPA, 2007).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

III.1 Delimitación y descripción del área de estudio

El municipio de Escárcega, Campeche, se divide de manera destacada en dos partes, una al Este y otra al Oeste. La zona al Oeste cuenta con mayor población y ha sido transformada fuertemente por las actividades humanas. Esta investigación se centra en la zona Este, con menos densidad de población y con amplias superficies de vegetación natural.

Para realizar la delimitación del área de estudio se utilizaron los archivos vectoriales de división política estatal y municipal del país (2019) que fueron obtenidos del Geoportal de la CONABIO, los núcleos agrarios fueron conseguidos del Registro Agrario Nacional (RAN), usos de suelo y tipos de vegetación serie VII (2018) de INEGI, que junto con imágenes de satélite Landsat 8 (**Figura 5**) descargadas del Servicio Geológico de Estados Unidos (GloVis, 2021), permitió delimitar e identificar vegetación de selva que ha sido quemada en algún momento del periodo de estudio (2013-2020).

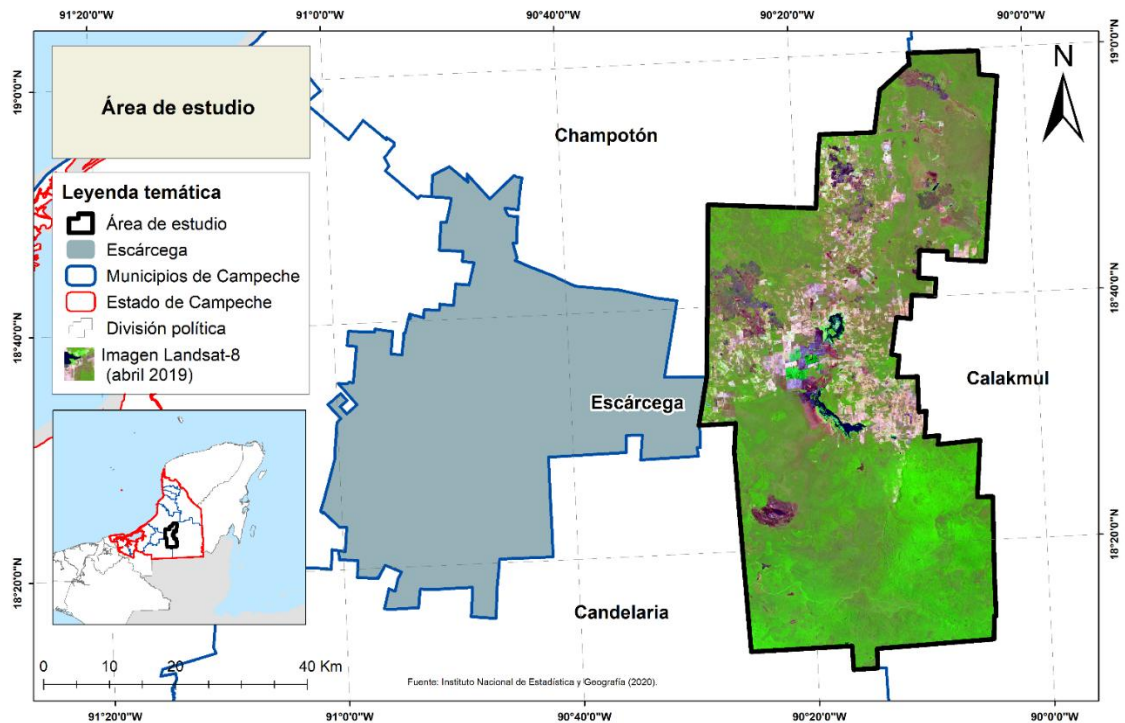


Figura 5. Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de (CONABIO, 2022; GloVis, 2021).

Como se mencionó anteriormente, el área en estudio se ubica en el estado de Campeche, específicamente dentro del municipio de Escárcega, el cual colinda con los municipios de Champotón ubicado al Norte, Carmen ubicado al Oeste, Candelaria ubicado al Sur y Calakmul ubicado al Este, comprende una superficie de 280,338 ha (**Figura 6**).

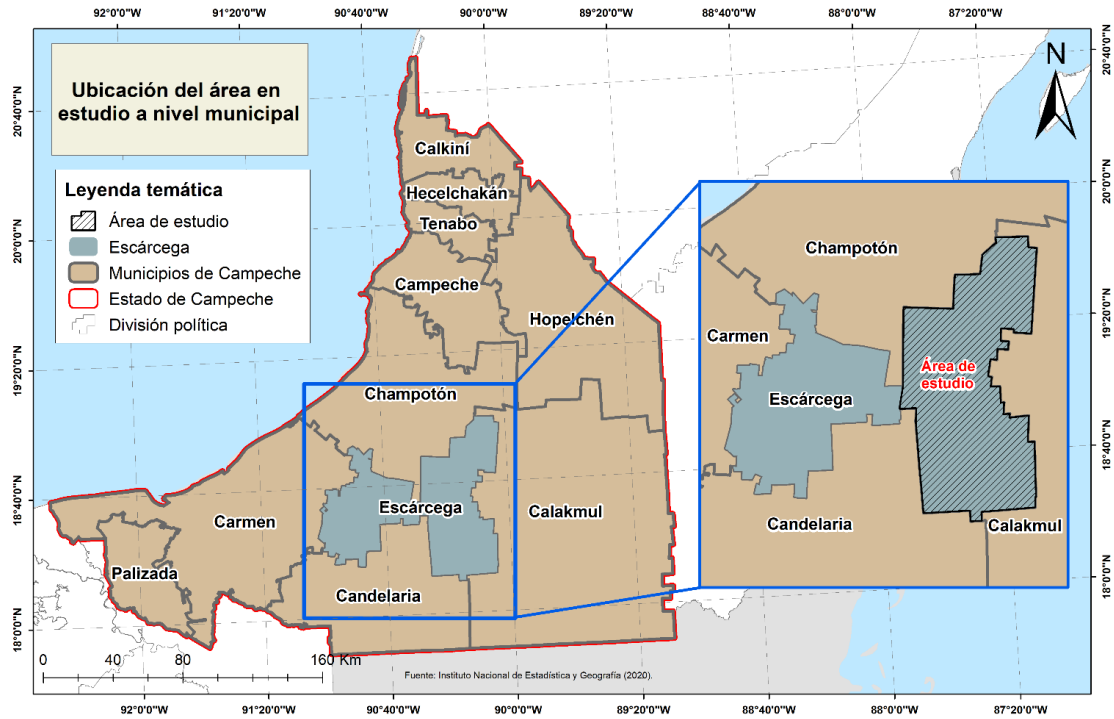


Figura 6. Ubicación del área en estudio a nivel municipal.

Fuente: Elaboración propia con datos de (CONABIO, 2022).

Tiene un rango altitudinal (**Figura 7**) de 0 metros a 250 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.). La fisiografía del está representada por lomeríos y llanuras de depósito lacustres (INEGI, 2001).

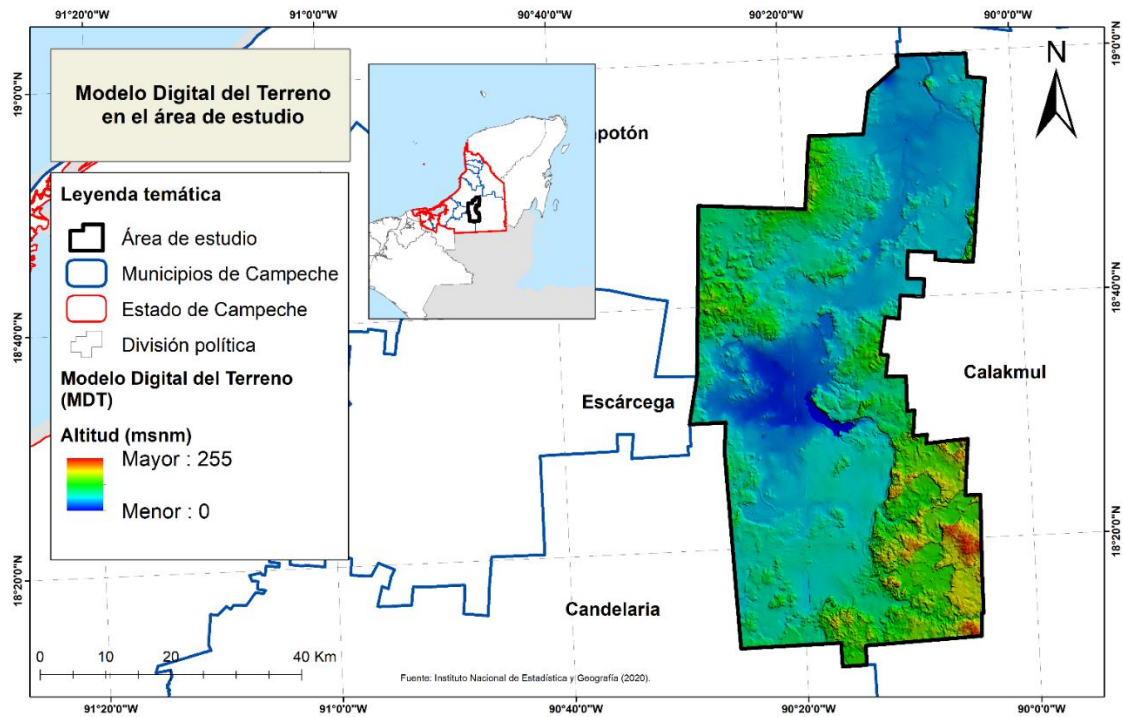


Figura 7. Modelo Digital del Terreno en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2001).

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca Río Champotón en las subcuencas Cuencas cerradas y Laguna de Términos en las regiones hidrológicas Grijalva-Usumacinta y Yucatán Oeste. Las corrientes hidrológicas (**Figura 8**) son intermitentes con dirección norte y oeste principalmente, las cuales alimentan a los cuerpos de agua como Laguna X-toc, Saibil, Xbonil, Yoph, El Conejo, Chuncopo; arroyos como La concepción, y pozas como La escondida, tapesco y del burro (INEGI, 2010).

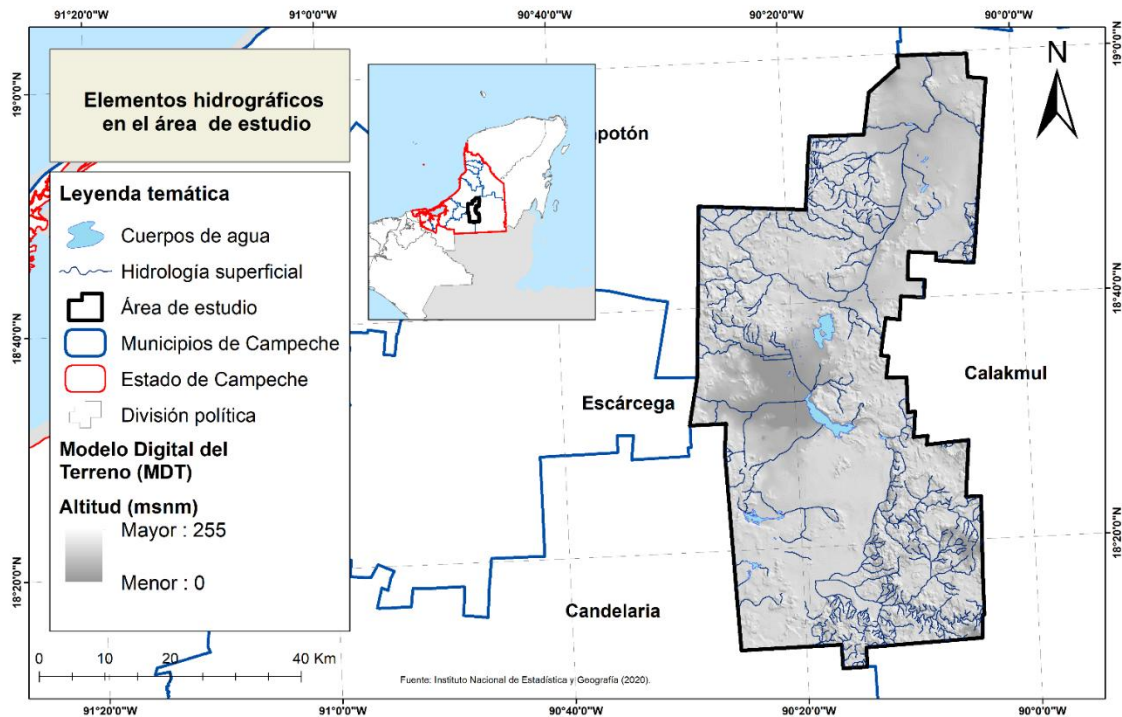


Figura 8. Elementos hidrográficos en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2010.

Los suelos del área de estudio son de tipo gleysoles, litosoles y rendzina (leptosoles) (INIFAP, 1995). Los leptosoles son tipos de suelo muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar. Los gleysoles en cambio son suelos de humedales que a menos que sean drenados, están saturados con agua freática por períodos suficientemente largos y tienen colores rojizos, parduzcos o amarillentos. Los gleysoles drenados adecuadamente pueden usarse para cultivos arables, producción lechera y horticultura (FAO, 2008). En la **Figura 9** se puede observar la distribución de los suelos en el área de estudio (INIFAP & CONABIO, 2008).

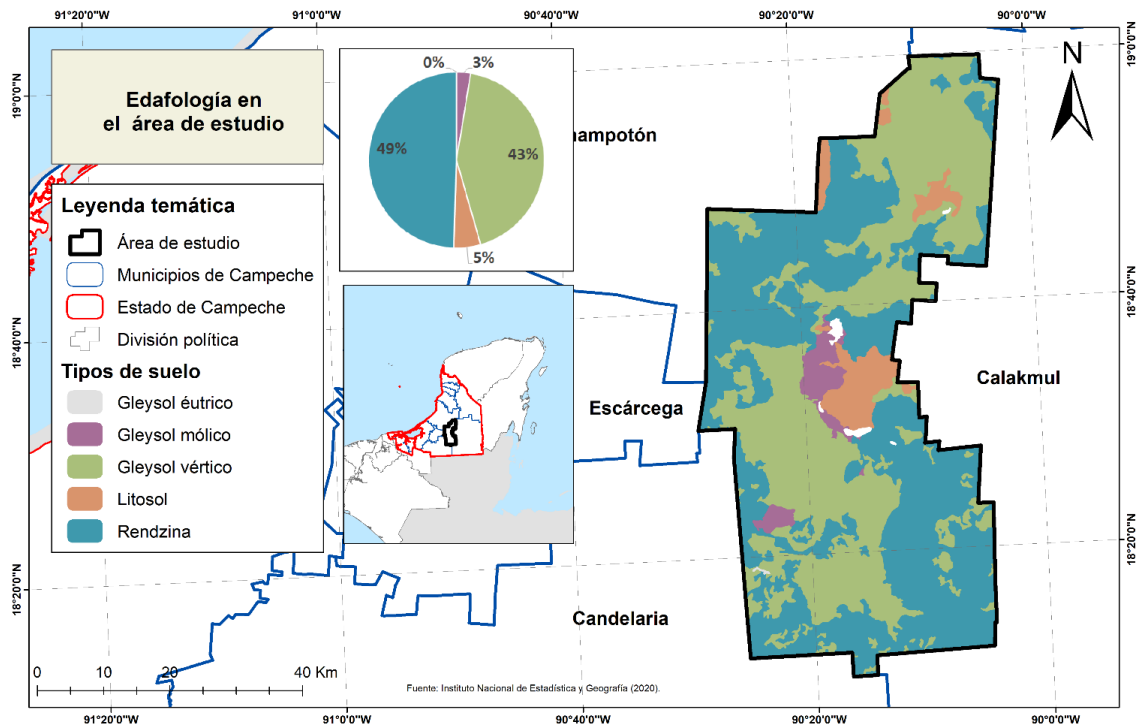


Figura 9. Edafología en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de INIFAP, 1995.

Las variables climáticas (**Figura 10**) que se encuentran en el área de estudio corresponden principalmente a un clima cálido subhúmedo (Aw1) con un rango de temperatura media anual de 24°C a 26°C, la temperatura media anual es mayor a los 22°C y la temperatura en el mes más frío es de 18°C. Y la precipitación se encuentra entre los entre los 1,000 mm a 1,500 mm (Cuervo-Robayo et al., 2014; García & CONABIO, 2001).

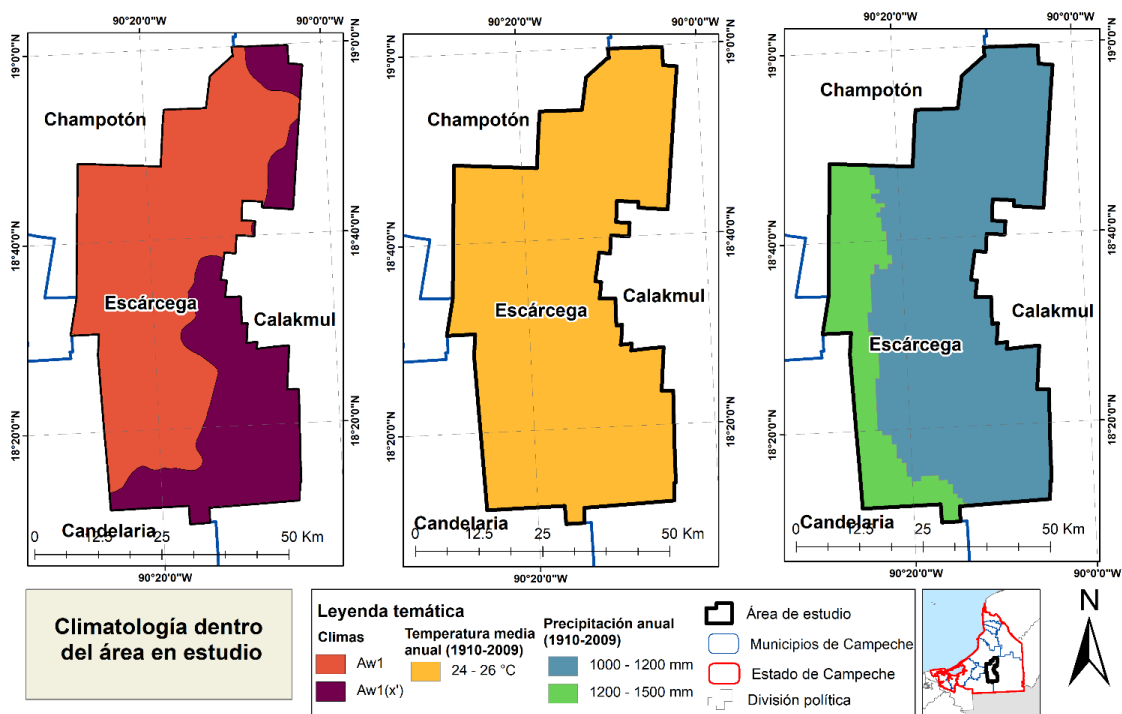


Figura 10. Climatología en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cuervo-Robayo et al., 2014; García & CONABIO, 2001.

Datos de la temperatura máxima (**Tabla 4**) para la entidad en el periodo en estudio evidencian que los meses de abril y mayo alcanzaron una temperatura máxima de 38.5°C, considerándose como los meses más calurosos (SMN, 2020).

Tabla 4. Temperatura máxima promedio 2013-2020.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2013	29.7	32.5	32.8	36.9	37.0	34.5	34.4	34.4	33.3	33.3	30.9	29.7
2014	28.2	32.5	35.0	36.5	34.5	34.6	35.7	35.3	34.1	32.6	30.4	29.9
2015	29.5	30.5	33.6	37.6	37.2	34.6	36.3	35.8	34.5	33.2	32.2	31.8
2016	29.5	30.0	34.6	36.9	38.4	35.4	35.4	34.7	34.4	33.0	31.8	32.4
2017	31.7	33.6	34.3	36.4	37.5	34.5	34.6	34.9	34.0	32.1	30.6	30.1
2018	27.9	32.4	34.7	35.7	35.1	34.4	34.9	34.1	33.8	32.5	31.4	29.9
2019	29.4	33.2	33.5	35.6	37.7	35.8	35.0	35.3	34.3	33.2	31.1	29.9
2020	30.2	32.4	34.9	38.5	36.7	34.1	35.0	34.4	34.0	32.2	31.0	29.1

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN, (2020). El gradiente de color representa la información de los registros, desde la temperatura más baja (azul) hasta la temperatura más alta (rojo).

En la **Tabla 5** se muestran los episodios históricos de ENOS. En los que se evidencia los periodos más cálidos basados en el incremento promedio de 3 meses en la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial central-oriental (NOAA, 2020). Según los datos, los años 2015, 2016 y 2019 registraron un incremento significativo en la temperatura del mar, lo que podría generar sequías prolongadas. Estas condiciones, a su vez, incrementan el riesgo de incendios forestales debido a la reducción de la humedad en el suelo y en la vegetación (Withey et al., 2018).

Tabla 5. Comportamiento del ENOS (Valores en rojo indican una dominancia del fenómeno del niño y valores en azul indican una dominancia del fenómeno de la niña, mientras que valores en negritas indican una temporalidad neutral).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2

Fuente: Elaboración propia con datos de NOAA (2020). El color de los números representa la información sobre el incremento de la temperatura del mar (rojo) o el enfriamiento de la temperatura del mar (azul).

Por otra parte, información del Monitor de Sequía en México (MSM) del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN) indica que, a partir del año 2014, el municipio de Escárcega ha experimentado condiciones de sequía anormalmente seca durante los meses de enero a mayo. En algunos períodos, como en abril y mayo de 2016, la sequía alcanzó niveles moderados. Un caso extraordinario se registró en mayo de 2020, cuando el municipio enfrentó una sequía severa (SMN, 2021).

La precipitación anual (**Tabla 6**) para el área de estudio está entre los 1,000 mm a 1,500 mm. Datos de precipitación estatal de acuerdo con el SMN (2020), para el periodo en estudio indican que junio es el mes donde se reporta el máximo de precipitación con un promedio mensual de 266.93 mm habiendo una escasa precipitación para los meses de enero a mayo con un promedio mensual de 50.94 mm. Los años con menor precipitación fueron 2015, 2016 y 2019, que corresponden a años con marcada presencia de fenómeno del Niño y sequía en los meses de enero a mayo (NOAA, 2020). En la Tabla podemos observar la precipitación mensual en el periodo de estudio según datos del SMN (2020).

Tabla 6. Precipitación anual 2013-2020.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2013	113.7	15.7	7	19.5	119.7	248.8	215.1	259	215.6	171.5	189	123.1
2014	83.3	27.7	24.3	45.4	165.6	209.8	131.1	206.5	231.1	189.2	49.1	27
2015	90.1	32.1	82.7	26	71.1	157.8	78.7	203.5	184.2	197.6	123.6	78.8
2016	50.4	33.8	33.1	19.3	61.7	244.9	180.9	173.3	202.8	81.7	53.4	41.8
2017	16.1	6.9	9.1	65.1	49.7	363.6	169.2	202.8	229.8	221.7	33.4	40.1
2018	105.7	19.2	15.5	120	45.8	160.5	164.1	241.5	202.1	160.9	127.2	27.4
2019	26.7	14.2	34.6	32.7	72.6	250.9	156.8	124.7	182.8	235.3	90.5	81.4
2020	31.1	13.4	4.1	25.9	207.1	499.1	137.2	184.8	234.2	293.1	99.1	50.3

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN (2020). El gradiente de color representa la información de los registros, desde la precipitación más baja (amarillo) hasta la precipitación más alta (verde).

En el periodo en estudio se han reportado para el Golfo de México y el Mar del Caribe diez huracanes (**Figura 11**) de los cuales los más cercanos al área en estudio fueron Barry en 2013, Hanna en 2014, Earl en 2016 y Cristóbal en el 2020 (NOAA, 2021)

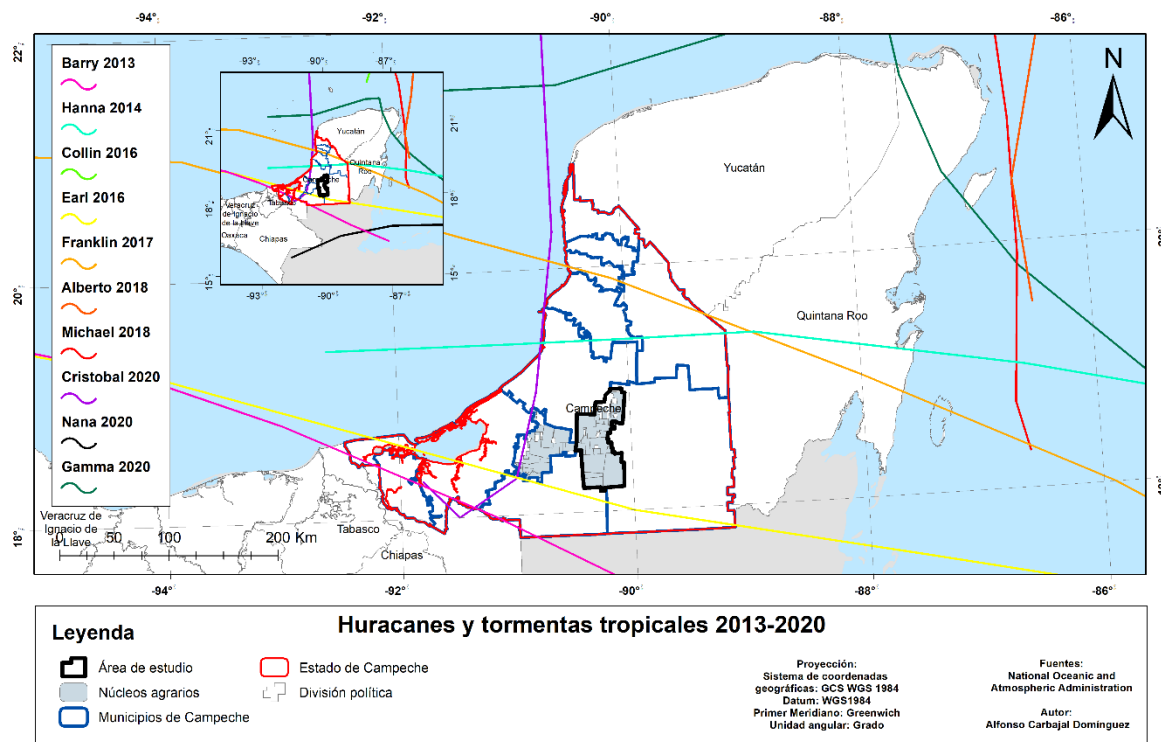


Figura 11. Huracanes y tormentas tropicales.

Fuente: Elaboración propia con datos de la NOAA (2021).

La distribución de los usos de suelo y tipos de vegetación corresponde un 11.12% (30,236 ha) a zona urbana y agropecuaria, el 89% (241,718.57 ha) es vegetación de selva, la cual se encuentra en estado primario (67%) y 22% en estado secundario (**Tabla 7** y **Figura 12**). Entre los tipos de vegetación que podemos encontrar en la vegetación primaria son la selva baja espinosa subperennifolia (30.11%) y selva mediana subperennifolia (36.48%), la vegetación secundaria se encuentra compuesta principalmente por la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (14.64%), seguido de la vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia (5.47%) y la vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia (2.03%), la vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia (0.16) (INEGI, 2018).

Tabla 7. Vegetación de selva en el área de estudio.

Vegetación de selvas	ha	%
Primaria	181,096.12	66.59
Selva mediana subperennifolia	99,219.57	36.48
Selva baja espinosa subperennifolia	81,876.55	30.11
Secundaria	60,622.44	22.29
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	39,808.97	14.64
Zona urbana y agroecosistemas	30,236	11.12
Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia	14,867.63	5.47
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia	5,510.83	2.03
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia	435	0.16
Total, general	271,954.56	100

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2017.

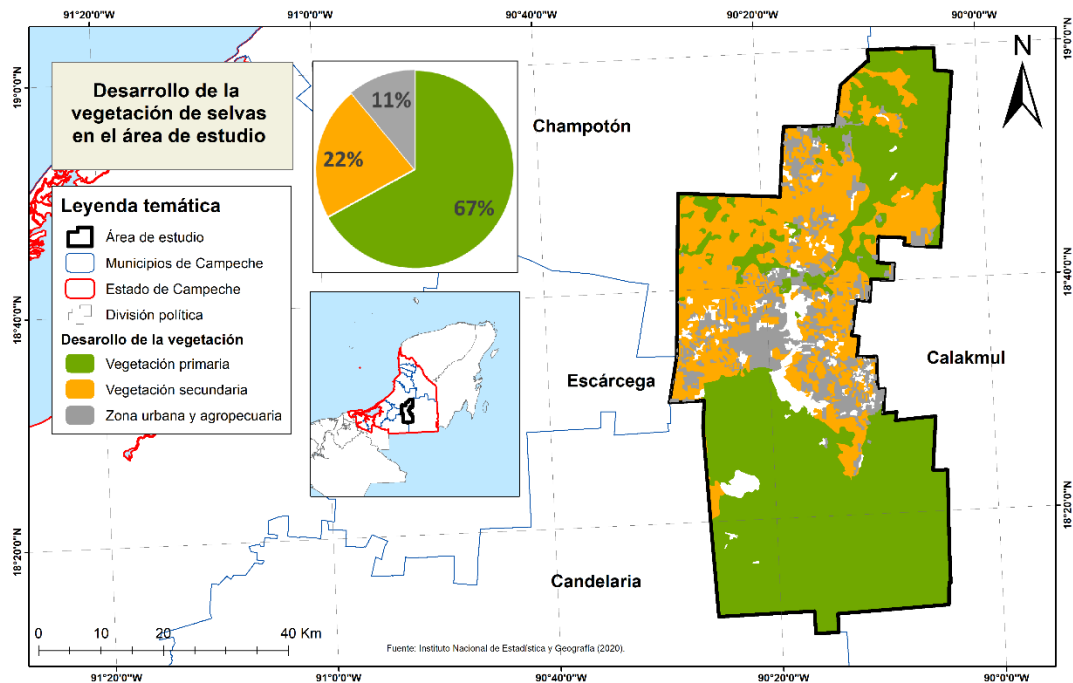


Figura 12. Vegetación primaria y secundaria de selvas en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2018.

En la **Figura 13** podemos ver cómo se distribuyen los tipos de vegetación de selvas en el área de estudio donde se puede observar la dominancia de la selva mediana subperennifolia, selva baja espinosa subperennifolia y la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia. La selva baja espinosa subperennifolia se caracteriza por ser una comunidad vegetal arbórea o subarbórea de origen

tropical que crece en lugares con precipitación estacional y sus componentes vegetales pierden en un 25 a 50% las hojas durante la época seca del año y las especies que la forman tienen espinas en sus tallos. La vegetación de selva mediana subperennifolia pierde estacionalmente su follaje en un 25 a 50%, se desarrolla en lugares con climas cálidos húmedos y subhúmedos. Los árboles de esta comunidad tienen contrafuertes y por lo general poseen muchas epífitas y lianas. Los árboles tienen una altura media de 25 a 30m. Son especies importantes de este tipo de selva: *Lysiloma latisiliquum* (Tzalam), *Brosimum alicastrum* (ox, ramón, capomo), *Bursera simaruba* (chaka', palo mulato, jiote, copal), *Manilkara zapota* (ya', zapote, chicozapote), *Lysiloma spp.* (Tzalam, guaje, tepeguaje), *Vitex gaumeri* (yaaxnik), *Terminalia buceras* (pukte), *Alseis yucatanensis* (jaasché), *Psidium sartorianum* (pichiche'); las epífitas más comunes son algunos helechos y musgos, abundantes orquídeas, bromelias y aráceas (INEGI, 2015).

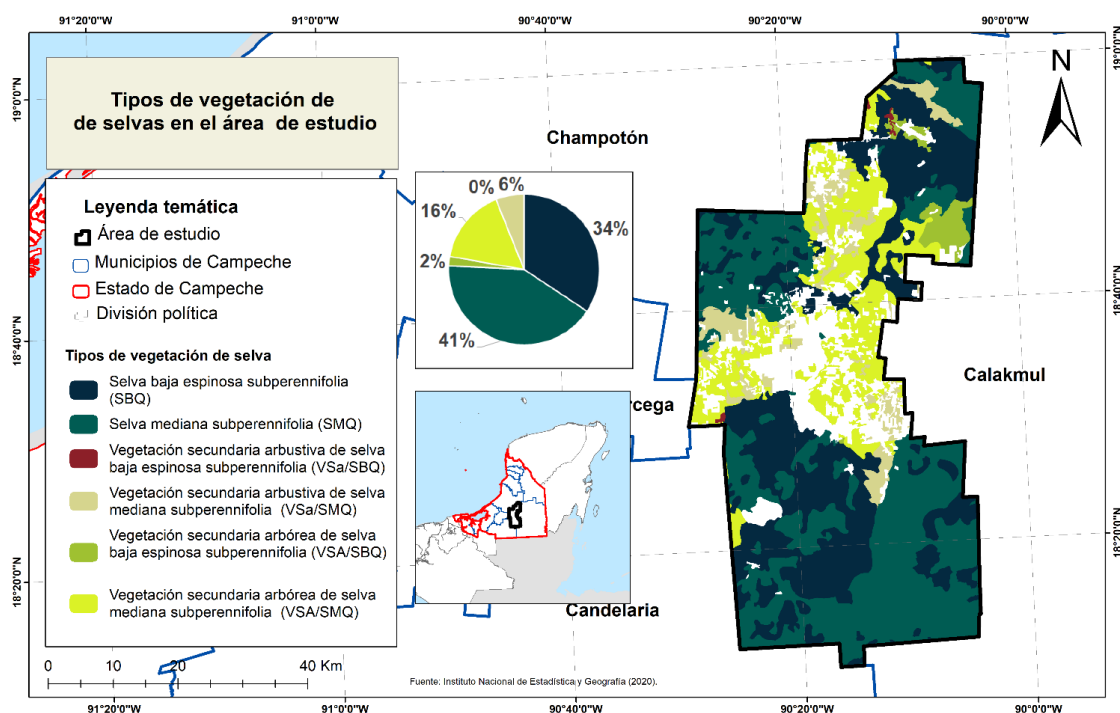


Figura 13. Tipos de vegetación de selvas en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2018).

Las selvas son un ecosistema de valor ambiental por la estructura de la vegetación, su composición, la abundancia de especies, la dinámica de sus comunidades y los múltiples servicios ambientales que nos brinda (Cochrane, 2009). Los municipios de Calakmul y Escárcega resguardan la mayor parte de la vegetación de selvas del estado de Campeche. Así mismo es en donde se encuentra la mayor superficie de vegetación considerada primaria, por lo que al conocer la importancia de este tipo de vegetación y los servicios ambientales de este tipo de vegetación, se le ha caracterizado como una área de estudio de gran valor ambiental la cual se encuentra inmersa en la Región Terrestre Prioritaria (RTP) “Silvituc-Calakmul”, la Región Hidrológica Prioritaria (RHP) “Sur de Campeche”, el Área Natural Protegida Estatal de Balam-kin y el Área Natural Protegida Federal Reserva de la Biosfera Balam Kú (Arriaga et al., 2002; Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2023; CONABIO, 2004; PRONATURA & Gobierno de Campeche, 2012). En la **Figura 14** se muestra la distribución de las áreas de valor ambiental en el área de estudio.

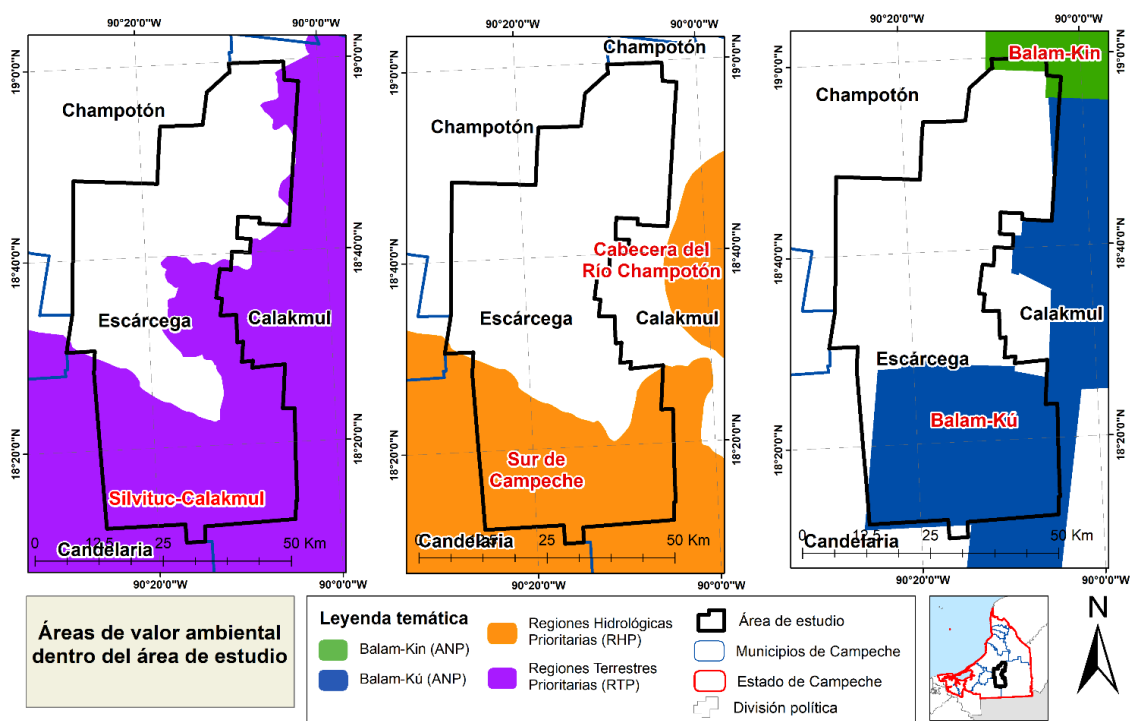


Figura 14. Áreas de valor ambiental en el área en estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de Arriaga, et al., 2002; CONABIO, 2004; Pronatura, 2012.

En la ubicación del área en estudio, se han contabilizado 48 localidades que albergan 7,348 habitantes, de esas localidades 20 son mayas con una población de 6,418 habitantes, por lo que en el área de estudio la población indígena es dominante (CONABIO, 2014). En la **Figura 15** y **Tabla 8** se puede observar la distribución de las localidades.

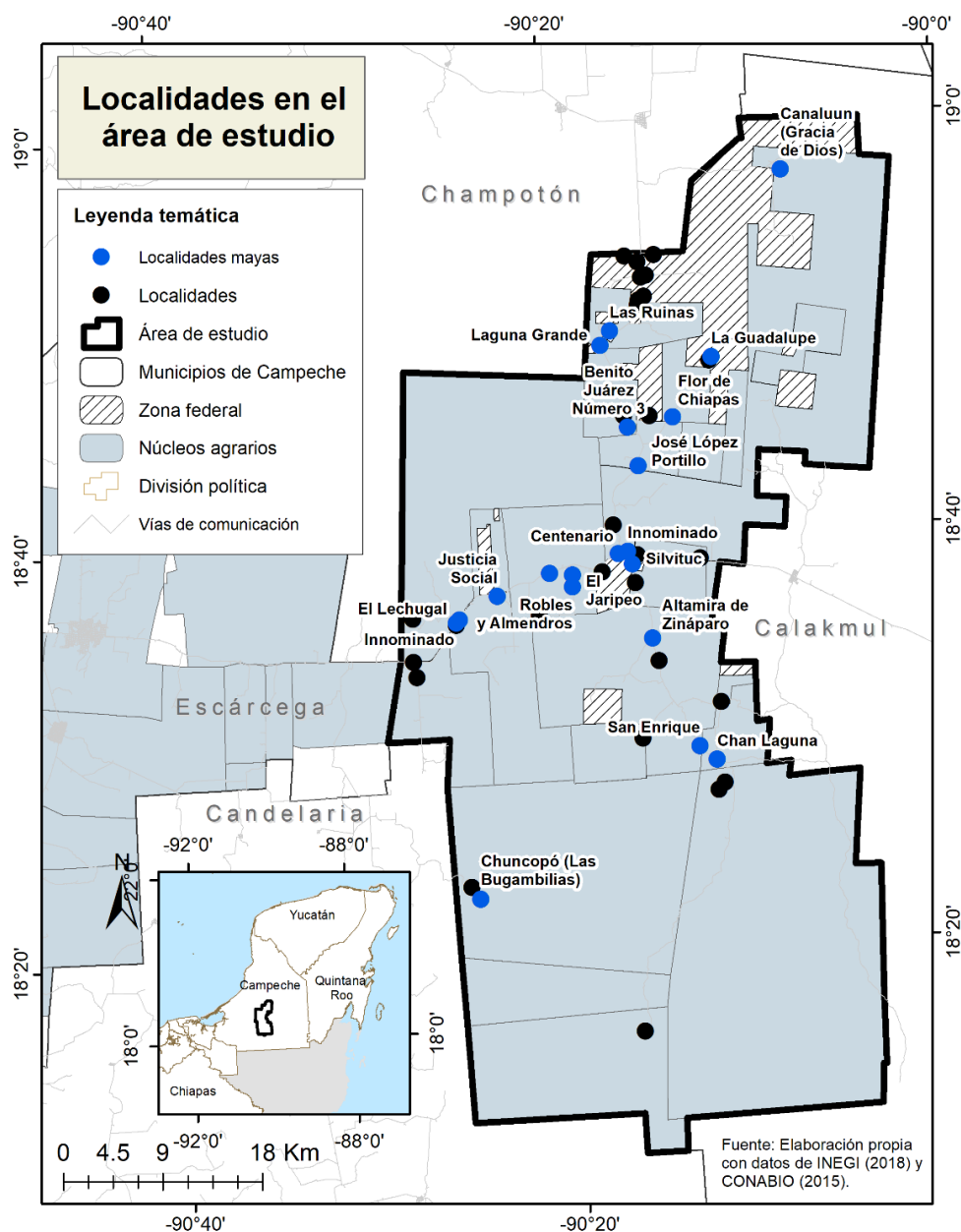


Figura 15. Localidades en el área de estudio (CONABIO, 2014).

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, 2014.

Las localidades con el mayor número de habitantes mayas en el área de estudio son Altamira de Zináparo (1,040), Centenario (942) y Justicia Social (818).

Tabla 8. Localidades en el área de estudio.

Número	Nombre de la localidad	Población	Pueblo y lengua
1	Altamira de Zináparo	1,040	Maya-Yucateca
2	Benito Juárez Número 3	241	Maya-Yucateca
3	Canaluun (Gracia de Dios)	0	Maya-Yucateca
4	Centenario	942	Maya-Yucateca
5	Chan Laguna	532	Maya-Yucateca
6	Chuncopó (Las Bugambilias)	7	Maya-Yucateca
7	El Cuarenta y Siete	4	Maya-Yucateca
8	El Jaripeo	9	Maya-Yucateca
9	El Lechugal	674	Maya-Yucateca
10	Flor de Chiapas	251	Maya-Yucateca
11	José López Portillo	304	Maya-Yucateca
12	Justicia Social	818	Maya-Yucateca
13	La Guadalupe	2	Maya-Yucateca
14	Laguna Grande	783	Maya-Yucateca
15	Las Ruinas	8	Maya-Yucateca
16	Robles y Almendros	0	Maya-Yucateca
17	San Enrique	0	Maya-Yucateca
18	Silvituc	803	Maya-Yucateca
19	Adolfo López Mateos	386	No acredita
20	Alto Río Caribe	12	No acredita
21	Bellavista	8	No acredita
22	Cantemó	2	No acredita
23	El Bejucal	2	No acredita
24	El Conejo	10	No acredita
25	El Girasol	6	No acredita
26	El Jobal	181	No acredita
27	El Michoacano	1	No acredita
28	El Mirador	1	No acredita
29	El Porvenir	4	No acredita
30	Emiliano Zapata	140	No acredita
31	Guadalupe (Tres Hermanos)	4	No acredita
32	La Guaya	3	No acredita

Tabla 8. Localidades en el área de estudio.

Número	Nombre de la localidad	Población	Pueblo y lengua
33	Las 2 Hermanas	2	No acredita
34	Las Maravillas	117	No acredita
35	Las Margaritas	4	No acredita
36	Los Robles	3	No acredita
37	Los Robles	5	No acredita
38	Ninguno	1	No acredita
39	Ninguno	4	No acredita
40	Rivera Medina	4	No acredita
41	San Antonio	3	No acredita
42	San José	5	No acredita
43	San Juan	1	No acredita
44	Santa Rita	5	No acredita
45	Santa Verónica	4	No acredita
46	Sausalito	7	No acredita
47	Tres Hermanos	3	No acredita
48	Zináparo	2	No acredita

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, 2014.

En el área de estudio las actividades económicas se basan en la agricultura y en la producción de chicle (*Manilkara zapota*) y palo tinte (*Haematoxylum campechianum*). Las actividades agrícolas principalmente son cultivos cíclicos como el maíz, arroz palay, el sorgo, frijol, sandía, melón y el chile jalapeño entre los cultivos perennes se encuentra la naranja, el mango y el limón. La ganadería también suele estar presente en el área de estudio (Gobierno Municipal de Escárcega, 2018).

De acuerdo con datos del Registro Agrario Nacional (RAN), 18 núcleos agrarios de tipo ejido del área de estudio pertenecen al Programa de Certificación de Derechos Ejidales (PROCEDE) y solo un núcleo (Hecelchakán) al programa Fondo de Apoyo para Núcleos Agrarios sin Regularizar (FANAR). En la **Tabla 9** y **Figura 16** se presenta la información correspondiente a cada uno de los núcleos agrarios y su distribución espacial dentro del área en estudio (RAN, 2021).

Tabla 9. Núcleos agrarios en el área en estudio.

Número	Nombre de núcleo agrario	Municipio	Tipo	Programa	Superficie	
					ha	%
1	El Lechugal	Escárcega	Ejido	Procede	28,209.11	10.66
2	N.C.P.A. Justicia social	Escárcega	Ejido	Procede	11,775.08	4.45
3	La libertad	Escárcega	Ejido	Procede	14,575.73	5.51
4	Haro	Escárcega	Ejido	Procede	8,352.68	3.16
5	Luna	Escárcega	Ejido	Procede	17,434.50	6.59
6	Lic. Benito Juárez	Escárcega	Ejido	Procede	3,526.40	1.33
7	Lic. José López portillo	Escárcega	Ejido	Procede	2,785.42	1.05
8	Flor de Chiapas	Escárcega	Ejido	Procede	2,669.66	1.01
9	Silvituc	Escárcega	Ejido	Procede	55,363.31	20.93
10	Silvituc	Escárcega	Ejido	Procede	3,895.59	1.47
11	N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos	Escárcega	Ejido	Procede	8,562.18	3.24
12	N.C.P.E. Altamira de Zinaparo	Escárcega	Ejido	Procede	18,710.69	7.07
13	N.C.P.E Zona chiclera las maravillas	Escárcega	Ejido	Procede	3,389.62	1.28
14	El Jobal	Escárcega	Ejido	Procede	510.71	0.19
15	Chan laguna	Escárcega	Ejido	Procede	3,387.76	1.28
16	Xbonil	Calakmul	Ejido	Procede	1,853.34	0.70
17	Xbonil	Calakmul	Ejido	Procede	2,885.43	1.09
18	Constitución	Calakmul	Ejido	Procede	1,984.17	0.75
19	Laguna grande	Escárcega	Ejido	Procede	3,974.37	1.50
20	El centenario	Escárcega	Ejido	Procede	35,836.33	13.54
21	Hecelchakán	Hecelchakán	Ejido	FANAR	34,894.90	13.19
Total					264,576.99	100

Fuente: Elaboración propia con datos de RAN, 2021.

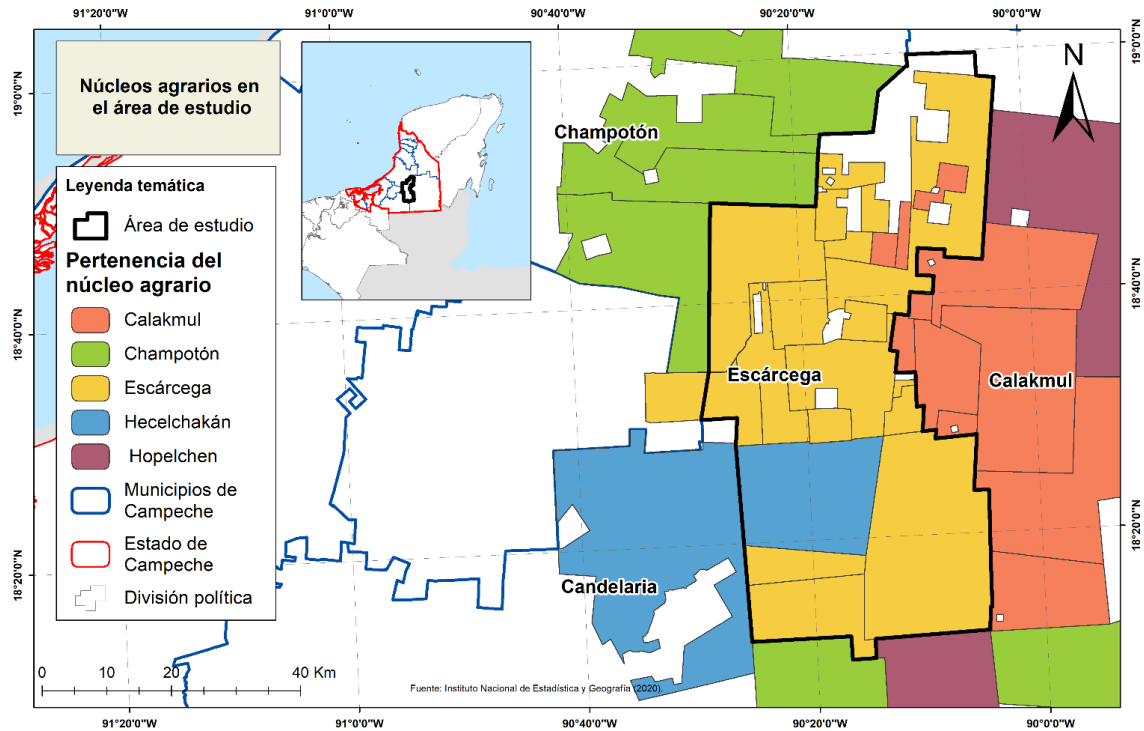


Figura 16. Distribución de los núcleos agrarios por municipio.

Fuente: Elaboración propia con datos de RAN, 2021.

La **Figura 17** muestra la distribución de los ejidos dentro del área en estudio. Silvituc es el ejido más grande dentro del área en estudio seguido del El Centenario y El Lechugal.

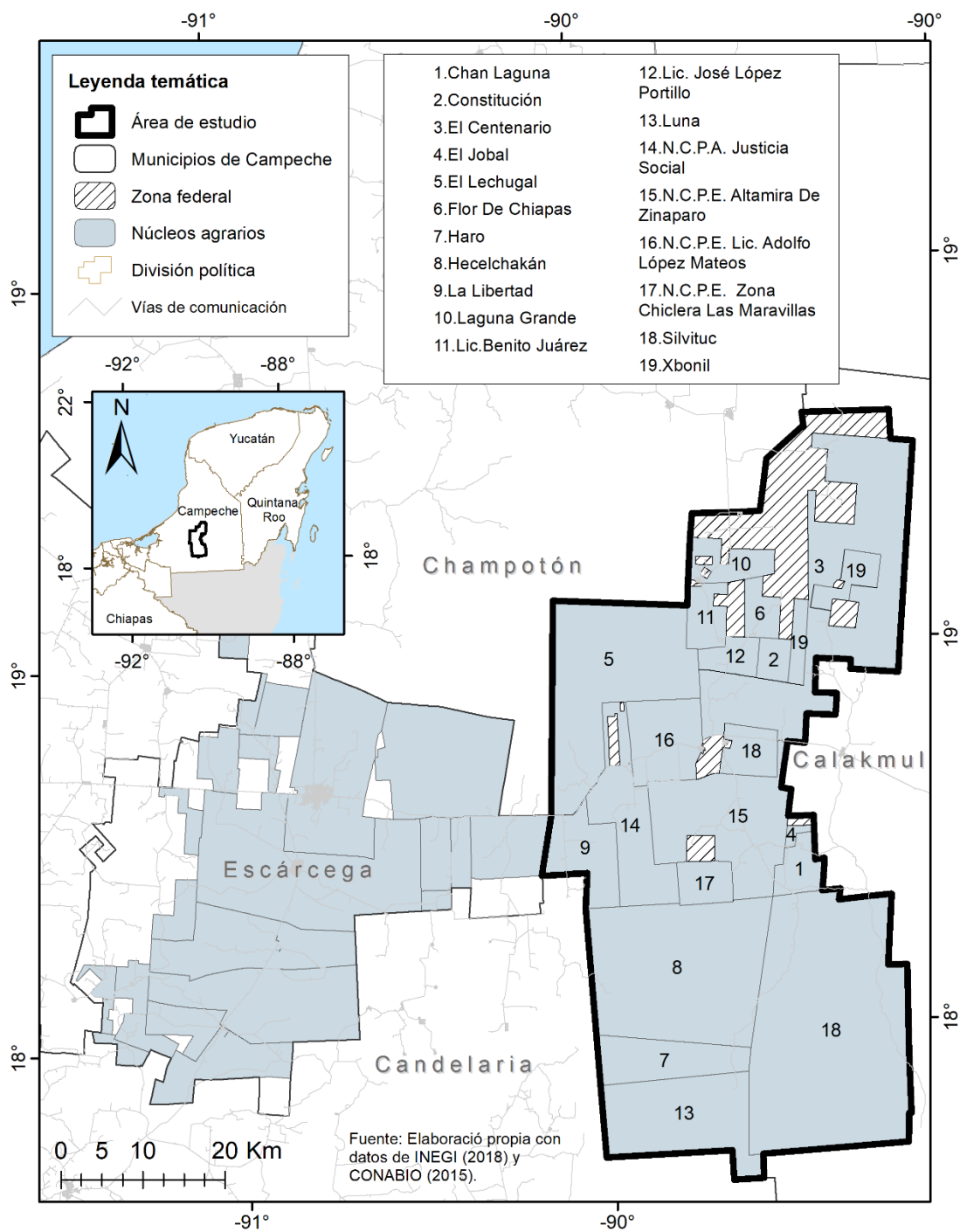


Figura 17. Núcleos agrarios del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO, 2015; INEGI, 2018.

III.2 Diseño y aplicación de entrevistas semiestructuradas

Para evaluar el impacto de los incendios, su severidad y la recuperación de la selva desde la perspectiva de actores gubernamentales, no gubernamentales y locales, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con preguntas abiertas (Hammer & Wildavsky, 1990).

En las entrevistas participaron los actores sociales que están relacionados con el tema de los incendios en el área en estudio (**Figura 18**). Entre ellos se encuentran la población local (ejidatarios), autoridades locales (comisarios ejidales o miembros de los comités de incendios locales), los brigadistas o combatientes de incendios, actores federales, estatales, municipales y organizaciones no gubernamentales. Cada participante desempeña un papel fundamental para comprender el uso y manejo del fuego en el área de estudio. Sus actividades en la selva están directamente relacionadas con la ocurrencia de incendios y son clave para el análisis espacial de la severidad de estos eventos (Monzón Alvarado, 2018; Rodríguez Silva, 2018). Las entrevistas se realizaron de manera virtual y presencial.

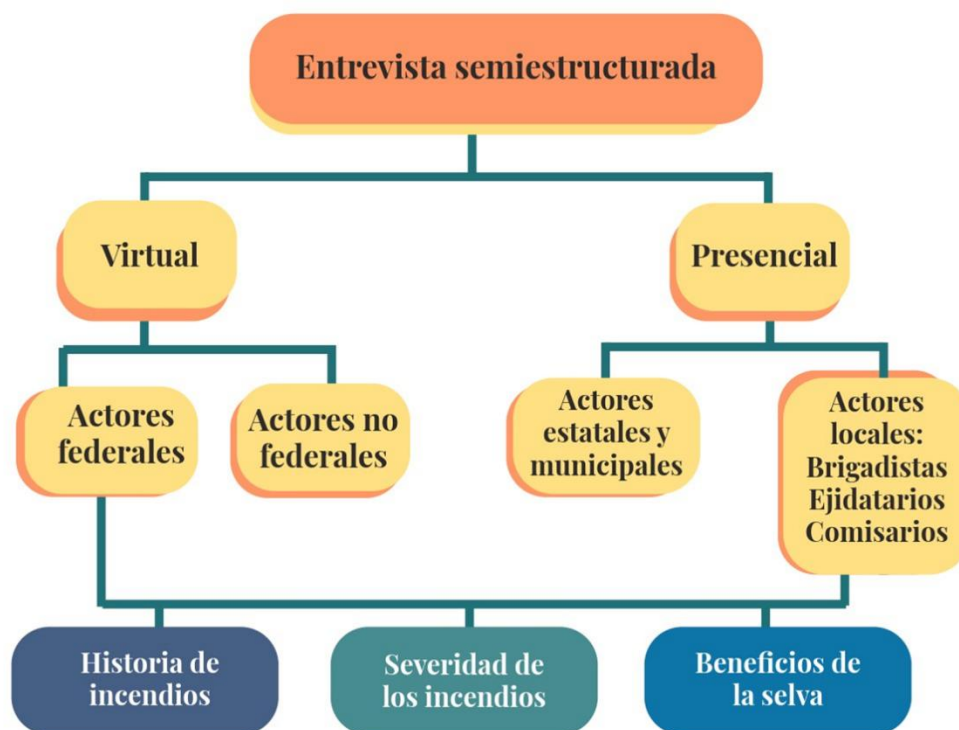


Figura 18. Sinopsis de la aplicación de entrevistas semiestructuradas.

En el **Anexo 1** se encuentra la guía general de entrevista semiestructurada que se aplicó de manera general a ejidatarios, autoridades locales (comisarios ejidales o miembros de los comités de incendios locales). Es importante destacar que las entrevistas se llevaron a cabo de manera flexible, permitiendo adaptar o modificar las preguntas según las condiciones y necesidades específicas de cada entrevistado. Para ello, se utilizaron tres instrumentos diferentes que abordaron los mismos temas generales, pero con un enfoque más profundo en ciertos aspectos, dependiendo del perfil de cada entrevistado (Hammer & Wildavsky, 1990).

El principal medio de contacto con los entrevistados, incluyendo actores federales, no federales, estatales y municipales, fue el correo electrónico, utilizado para agendar reuniones presenciales y virtuales, dependiendo de la disponibilidad de los entrevistados. Posteriormente, con el apoyo de un actor estatal del Departamento de Restauración y Protección de la CONAFOR en Campeche, se solicitó asistencia para localizar y entrevistar a los actores locales. Utilizando un vehículo oficial de la

CONAFOR y acompañado por un combatiente familiarizado con el área de estudio, se realizó una visita a los ejidos. Allí, nos reunimos con el comisario del ejido para invitarlo a participar en una entrevista, así como a los ejidatarios interesados en compartir sus conocimientos sobre las actividades y costumbres locales relacionadas con la ignición y propagación de incendios, la severidad del fuego en la vegetación de selva y su aprovechamiento en la región (**Tabla 10**). En todas las entrevistas se aplicaron guías de consentimiento previo, libre e informado. Las respuestas obtenidas fueron transcritas y analizadas cuantitativamente. Durante este proceso, las respuestas fueron codificadas en temas clave, identificando patrones y tendencias emergentes. En promedio los entrevistados tenían un rango de edad de 25 a 55 años. El 95% de los entrevistados fueron principalmente del sexo masculino.

Tabla 10 Información de las entrevistas realizadas a los actores.

Actores	Dependencia	Localidad	Número de entrevistados	Rango de edad	Género
Actores federales	Centro Regional del Manejo del Fuego Sureste - CONAFOR	Campeche	1	45-55	Masculino
Actores no federales	Programa de manejo del fuego para la Península de Yucatán PRONATURA	Yucatán	1	25-35	Femenino
Actores estatales y municipales	Departamento de restauración y protección - CONAFOR, Campeche	Campeche	1	25-35	Masculino
	Combatiente de incendios - CONAFOR Campeche	Campeche	10	18-45	Masculino y femenino
Actores locales: Brigadistas, ejidatarios y comisarios	Comisario	Ejido Justicia Social,	1	45-55	Masculino
	Ejidatario	Escárcega Campeche	3		
	Comisario	Ejido Adolfo López Mateo Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		5		
	Comisario	Ejido Silvituc, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		
	Comisario	Ejido Constitución, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		
	Comisario	Ejido Xbonil, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		

Tabla 10 Información de las entrevistas realizadas a los actores.

Actores	Dependencia	Localidad	Número de entrevistados	Rango de edad	Género
	Comisario	Ejido El Lechugal, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		
	Comisario	Ejido El Centenario, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		
	Comisario	Ejido Laguna grande, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino
	Ejidatario		2		
	Comisario	Ejido Benito Juárez, Escárcega Campeche	1	45-55	Masculino y femenino
	Ejidatario		2		

III.3 Adquisición de datos y procesamiento de imágenes de satélite

III.3.1 Puntos de calor en el área de estudio

El programa “detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota” de incendios para la gestión de recursos FIRMS (por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés), cuenta con bases de datos de la cual se obtienen los registros de puntos de calor de sensores como MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibles a partir de los satélites Terra (MOD14) y Aqua (MYD14), con una resolución del sensor de 1 km, la resolución temporal es diaria, MODIS/TERRA ha proporcionado información desde el 1 de noviembre del año 2000 a la fecha. En cambio, MODIS/AQUA ha generado información desde el 3 de julio de 2002 a la fecha. El sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) va a bordo de los satélites de la NASA/NOAA Suomi-National Polar orbiting Partnership (S-NPP) y NOAA-20 (JPSS-1), este satélite detecta focos activos a 375 metros de resolución espacial, la resolución temporal es de dos veces al día. VIIRS S-NPP ha generado información a partir del 20 de enero del año 2012 hasta la fecha y VIIRS-NOAA-20 ha proporcionado información a partir del 1 de enero de 2017. Los puntos de calor de estos satélites se complementan con los de MODIS, sin embargo, los puntos de

VIIRS demuestran una mejor respuesta para la identificación de anomalías térmicas de áreas relativamente pequeñas (FIRMS, 2022; Ressler et al., 2009).

El análisis de los puntos de calor abarcó el periodo de 2013 a 2020, empleando los datos obtenidos por el sensor VIIRS para identificar los años con mayor frecuencia de incendios en la vegetación de selvas en el área de estudio. Esta información, disponible en formato vectorial en un Sistema de Información Geográfica (SIG), incluye una tabla de atributos que proporciona detalles como las coordenadas de ubicación de los puntos, así como la fecha y hora del paso del satélite. Los datos de puntos de calor fueron utilizados para obtener estadísticas, seleccionar imágenes satelitales Landsat 8, validar la ubicación de las áreas afectadas por incendios y planificar el trabajo de campo.

III.3.2 Imágenes de satélite Landsat 8

Los productos satelitales han resultado ser una fuente de información confiable para el análisis e interpretación de incendios, teniendo sensores como MODIS o VIIRS que se han encargado de ubicar los sitios en donde se han registrado quemados, sin embargo, también existen los productos satélites que nos han permitido realizar una evaluación de las áreas afectadas por incendios apoyándonos de algoritmos para analizar la superficie quemada, la tasa de propagación y el seguimiento de incendios (Schroeder et al., 2016).

El grupo de satélites Landsat ha sido fundamental para el estudio de anomalías térmicas, gracias a la incorporación de bandas de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) e infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), lo que permite un análisis detallado de incendios. A medida que han evolucionado las generaciones de satélites Landsat, han ofrecido capacidades de mapeo mejoradas para el estudio del fuego (Schroeder, et al., 2016).

Para el desarrollo del proyecto, se adquirieron 16 imágenes del satélite Landsat 8 a través de la plataforma USGS Global Visualization Viewer (GloVis, 2021), correspondientes a los años 2013 a 2020 (**Tabla 11**), abarcando el área de estudio y ajustadas a la temporada de incendios, que ocurre entre enero y junio, antes de las lluvias de verano. La selección de imágenes se basó en las estadísticas de incendios proporcionadas por el Centro Nacional de Manejo del Fuego de la CONAFOR y los datos del programa "Detección de Puntos de Calor mediante Técnicas de Percepción Remota" de la CONABIO (FIRMS, 2022; GloVis, 2021; SNIGF, 2020).

Se eligieron imágenes que correspondían a fechas cercanas a los eventos de pre-incendio y post-incendio. Para los años 2014 a 2020, se obtuvieron imágenes tanto antes como después de los incendios. Sin embargo, en el caso del año 2013, solo fue posible adquirir dos imágenes posteriores al incendio, correspondientes a los meses de mayo y junio.

Tabla 11. Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas para la delimitación de las áreas quemadas 2013 a 2020.

Imagen	Año	Fecha
1	2013	20130627
2		20130729
3	2014	20140105
4		20140427
5	2015	20150516
6		20150617
7	2016	20160518
8		20160705
9	2017	20170318
10		20170606
11	2018	20180305
12		20180727
13	2019	20190324
14		20190425
15	2020	20200411
16		20200513

Fuente: Elaboración propia con datos de GloVis, 2021.

Las imágenes Landsat 8, suministradas por el USGS EROS CENTER corresponden al path/row 20/47 y consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de Niveles Digitales (ND) con los datos de una imagen multiespectral (**Tabla 12**) adquirida por los sensores: OLI Operational Land Imager y el TIRS Thermal Infrared Sensor. Los datos de las bandas del sensor TIRS y OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y serán reescalados a los valores de reflectancia en el techo de la atmósfera TOA, aplicando la corrección atmosférica para las bandas 1-7 que incluyen la banda 5 (NIR) y banda 7 (SWIR), usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato MTL.txt a través del software especializado en el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales ENVI (Ariza Pastrana, 2017).

Tabla 12. Información de los datos multiespectrales de las bandas de Landsat 8 OLI.

Banda		Resolución (m)	Longitud de onda (µm)
B1	Coastal Aerosol	30	0.43 - 0.45
B2	Blue	30	0.45 - 0.51
B3	Green	30	0.53 - 0.59
B4	Red	30	0.64 - 0.67
B5	Near-Infrared	30	0.85 - 0.88
B6	SWIR 1	30	1.57 - 1.65
B7	SWIR 2	30	2.11 - 2.29
B8	Panchromatic	15	0.50 - 0.68
B9	Cirrus	30	1.36 - 1.38
B10	TIRS 1	100	10.60 - 11.19
B11	TIRS 2	100	11.50 12.51

Fuente: Elaboración propia con datos de EOS Data Analytics, 2024.

El tratamiento que se realizó con cada una de las imágenes de satélite Landsat 8, fue como primera parte la corrección radiométrica. Esta permite corregir los píxeles incorrectos que pudieran originarse por fallos en el sensor, permitiendo la restauración de líneas, píxeles perdidos y poder ajustar los valores de intensidad de las imágenes debido a que existen factores como las condiciones atmosféricas y de iluminación entre las diferentes escenas. Posterior a realizar la corrección radiométrica, se convirtieron los valores radiométricos a reflectancia debido a que

está información permite un mejor análisis de las áreas quemadas ya que las superficies quemadas tienen a presentarse con un color oscuro y con una baja reflectancia a diferencia de una vegetación sana o por sobre otras cubiertas, los valores de reflectancia van de 0 a 1 y nos explican qué valores cercanos a 0 indica una superficie muy absorbente, mientras que valores cercanos a 1 indican una superficie muy reflectora (Chuvienco Salinero, 2009).

Para las imágenes de satélite Landsat 8 no fue necesario realizar la corrección geométrica ya que al provenir de la plataforma USGS EROS CENTER, tienen un nivel de procesamiento Landsat Nivel-1 el cual utiliza Puntos de Control Terrestres (GCP), datos de elevación proporcionados por un Modelo de Elevación Digital (DEM) y/o datos recopilados por el satélite y el sensor (Datos de corrección de carga útil-PCD) para la correcta corrección geométrica de las escenas (USGS, 2001).

III.4 Detección y delimitación de las áreas quemadas en la selva

A partir de las ocho imágenes del satélite Landsat 8 que cubren la temporada de incendios (enero y junio) del periodo de estudio (2013-2020) y concentran el mayor número de puntos de calor (**Figura 19**), se procedió a realizar la aplicación del índice espectral para áreas quemadas Burned Area Index (BAI) para delimitar las áreas quemadas. Este índice utiliza las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (R), permitiendo identificar los efectos de un incendio tales como la presencia de carbón y ceniza en el suelo (Manzo Delgado & López García, 2013). Ecuación BAI:

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - \rho_{Red})^2 + (0.06 - \rho_{NIR})^2} \quad (4)$$

El procesamiento de este índice espectral se llevó a cabo mediante el software Envi 5.3 aplicando el uso de la herramienta Band Algebra y posteriormente la aplicación de Band Math para poder aplicar la ecuación 4 en las imágenes que se encuentran en valores de reflectancia para la banda 4 (RED) y banda 5 (NIR). En BAI los

umbrales obtenidos para las áreas quemadas de selva cubren un intervalo de valores de 1 a 847. Posteriormente la información obtenida fue transformada a formato vectorial y con la capa de Usos de Suelo y tipos de Vegetación serie VII de INEGI (2018), se realizó el cruce de la información para determinar la superficie quemada para cada uno de los años del periodo de estudio, el tipo de vegetación afectada, estos análisis se realizaron en el Sistema de Información Geográfica software ArcGIS 10.3 (INEGI, 2018; Manzo Delgado & López García, 2013).

El cálculo del índice NBR se realizó con las imágenes Landsat 8 a valores de reflectancia debido a que el índice mide cuánta energía es reflejada por la vegetación respecto a la energía solar incidente (Guillem-Cogollos et al., 2017). El procesamiento de este índice espectral se llevó a cabo mediante el software Envi 5.3 aplicando el uso de la herramienta Band Algebra y posteriormente la aplicación de Band Math para poder aplicar la ecuación 3 para ello se utilizarán la banda 5 (NIR) y banda 7 (SWIR), el índice toma valores entre -1 y 1. En NBR los umbrales obtenidos para las áreas quemadas de selva cubren un intervalo de valores de 0 a 1.

$$NBR = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}} \quad (5)$$

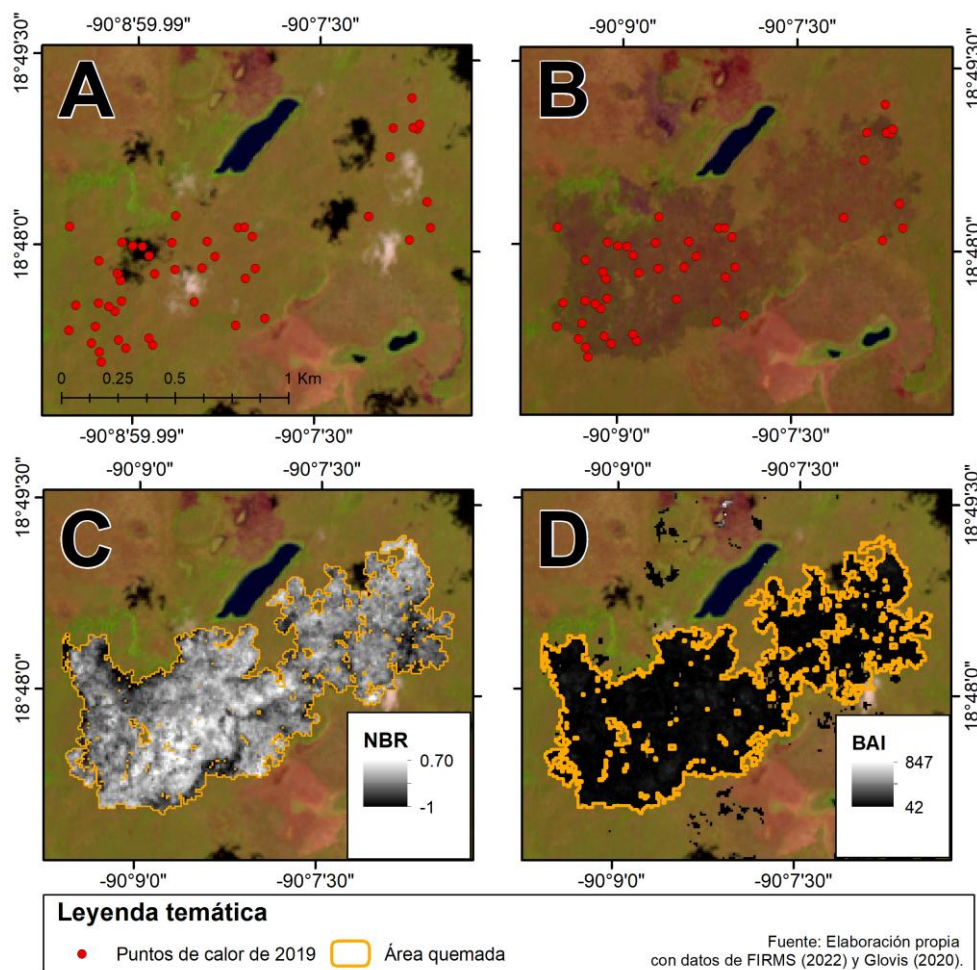


Figura 19. Procesamiento de áreas quemadas.

Para obtener el área total de quemado se realizó la intersección de BAI y NBR, se obtuvieron los polígonos en formato shape y en el sistema de información geográfica se utilizó la herramienta intersect para unir todos los polígonos del año 2013, con lo que se obtuvo el área quemada total, este análisis se repitió para cada uno de los años. La intersección de ambos índices permite tener una mejor delimitación de las áreas quemadas, que el uso de un solo índice no podría identificar o delimitar debido a las variables mencionadas anteriormente.

III.4.1 Validación de las áreas quemadas

Para obtener la confiabilidad de la cartografía de las áreas afectadas por el fuego se desarrolló un procedimiento en el cual, mediante la elección del año 2019, considerado el año más representativo en el periodo en estudio debido a los registros de puntos de calor identificados en ese año y las áreas quemadas obtenidas nuevas y recurrentes identificadas (Anaya & Chuvieco, 2012). Se utilizó una imagen Sentinel-2 con una resolución espacial de 10 metros a diferencia de las imágenes Landsat 8 que tiene una resolución espacial de 30 metros. La imagen de alta resolución se descargó de la aplicación GloVis, obteniendo una imagen de nivel 1C las cuales incluyen corrección radiométrica y geométrica junto con ortorectificación permitiendo obtener productos geolocalizados de alta precisión en proyección UTM (GloVis, 2021). La imagen adquirida se obtuvo con 10 días posteriores (05 de mayo de 2019) al incendio en la imagen Landsat 8 (25 de abril de 2019).

La delimitación de los polígonos de las áreas quemadas en las imágenes Sentinel-2 se realizó mediante la aplicación del índice NBR, posteriormente las áreas quemadas se pasaron a formato vectorial. La validación consistió en superponer ambos polígonos de áreas quemadas derivados de las imágenes, y seleccionar 31 regiones al azar con área quemada en selva > 2 ha, que representaron una superficie de 887.05 ha. En cada región se cuantificó la superficie interceptada y las diferencias entre ambos polígonos. Los resultados se organizaron en matrices de confusión (**Tabla 13**) para estimar la precisión, los errores de omisión, los errores de comisión y el índice Kappa (Ecuación 3) (Manzo Delgado & López García, 2013).

Tabla 13. Matriz de confusión empleada.

		Landsat 8		
Sentinel-2		Área quemada	Área no quemada	Total
	Área quemada	A	B	AB1
	Área no quemada	C	D	CD2
	Total	AC1	BD2	N
Precisión total= A+D/N				
Error omisión=A/AC1				
Error comisión=A/AB1				

$$k_{\text{hat}} = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+i})} \quad (6)$$

Donde: n es el número de renglones de la matriz, X_{ij} es el número de observaciones en el renglón i y la columna j ($X_{i+} X_{+i}$) es el total de observaciones del renglón i y columna i , respectivamente, y N total de observaciones de la matriz de confusión.

III.5 Estimación de la severidad de los incendios en selva

Una vez que se delimitaron las áreas quemadas derivadas de incendios, se procedió a evaluar su severidad. Para ello se utilizaron las imágenes Landsat 8, una previa y otra posterior al incendio (**Tabla 14**), nivel 1, con corrección geométrica y radiométrica en formato Geotiff y proyección UTM (Universal Transverse Mercator). Primero se generó el índice NBR (Ecuación 5) y posteriormente se calculó la diferencia entre ambos resultados (Ecuación 2) para obtener el dNBR.

Tabla 14. Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas para el cálculo del dNBR (GloVis, 2021).

Imagen	Evento	Año	Fecha	Días transcurridos
1	Pre-incendio	2013	20130627	32
2	Post-incendio		20130729	
3	Pre-incendio	2014	20140105	112
4	Post-incendio		20140427	
5	Pre-incendio	2015	20150516	32
6	Post-incendio		20150617	
7	Pre-incendio	2016	20160518	48
8	Post-incendio		20160705	
9	Pre-incendio	2017	20170318	80
10	Post-incendio		20170606	
11	Pre-incendio	2018	20180305	144
12	Post-incendio		20180727	
13	Pre-incendio	2019	20190324	32
14	Post-incendio		20190425	
15	Pre-incendio	2020	20200411	32
16	Post-incendio		20200513	

El dNBR cubre un intervalo entre -2 a 2 (**Tabla 15**), los valores positivos >0.1 sugieren que la vegetación tuvo una mayor afectación de la severidad y los valores <0.1 indican que la vegetación tuvo recrecimiento después del incendio, los valores cercanos a cero (-0.1 a 0.1) son considerados no quemadas (Key & Benson, 2006). Una alta severidad está vinculada a tasas de recuperación de vegetación más bajas que las áreas de baja severidad. Los resultados se utilizaron para elaborar la cartografía de la severidad de los incendios (Montorio Llovería et al., 2014).

Tabla 15. Relación entre el índice dNBR y la severidad

dNBR	Severidad del incendio
< -0.25	Alto repoblamiento
-0.25 a -0.1	Bajo repoblamiento
-0.1 a 0.1	Sin quemar
0.1 a 0.27	Baja severidad
0.27 a 0.44	Moderada severidad

Tabla 15. Relación entre el índice dNBR y la severidad

dNBR	Severidad del incendio
0.44 a 0.66	Moderada-Alta severidad
>0.66	Alta severidad

Fuente: Elaboración propia con datos de Guillem-Cogollos, et al., 2017.

III.5.1 Clasificación de la severidad para vegetación de selva

Con los resultados de los dNBR del periodo en estudio y los polígonos de las áreas quemadas, se realizó una intersección para obtener las áreas que serían sometidas para estimar la severidad. Para poder identificar los umbrales de severidad en la selva, se utilizó la clasificación de los valores de Key & Benson (2006) y la clasificación del método de ruptura natural de Jenks. Este último método permite establecer la mejor disposición de los valores obtenidos minimizando la variación dentro de cada rango mediante la agrupación de datos que busca minimizar la desviación media de cada clase y maximizar la diferencia entre las medias de las clases. Así, se basa en las agrupaciones naturales inherentes a los datos y crea rupturas de clase donde hay cambios significativos entre los valores (Flores-Rodríguez et al., 2021).

Para establecer los umbrales de severidad utilizando la ruptura natural de Jenks, se utilizó el dNBR del año 2019. Al ser el más representativo y en donde el periodo antes del incendio y después del incendio se desarrolló con un tiempo transcurrido de 32 días específicamente el 24 de marzo (pre) y 25 de abril (post). En ese intervalo de tiempo no hubo algún fenómeno meteorológico como lluvia que pudiera influir en la delimitación de los umbrales de severidad. Para lograr la clasificación más adecuada de umbrales de Jenks, se realizó una interpretación espectral tomando como base los compuestos RGB 7 (2.11 - 2.29 μm), 5 (0.85 - 0.88 μm), 4 (0.64 - 0.67 μm) de las imágenes Landsat 8 pre y post incendio para crear una combinación de banda de color (EOS Data Analytics, 2024), que muestren una visual de las zonas

quemadas y la distribución de categorías de umbrales de severidad que propone Key & Benson (2006).

El método de umbrales de Jenks se utilizó para ajustar los valores obtenidos del dNBR, para definir cuatro clases (**Figura 20**) que agrupan las siete categorías de Key & Benson, (2006), una de recuperación, y tres de severidad, con los siguientes intervalos: Recrecimiento (≤ -0.32 a 0.09), severidad baja (0.10 a 0.23), severidad moderada ($0.24 - 0.35$) y severidad alta (0.36 a $0.79 \geq$).

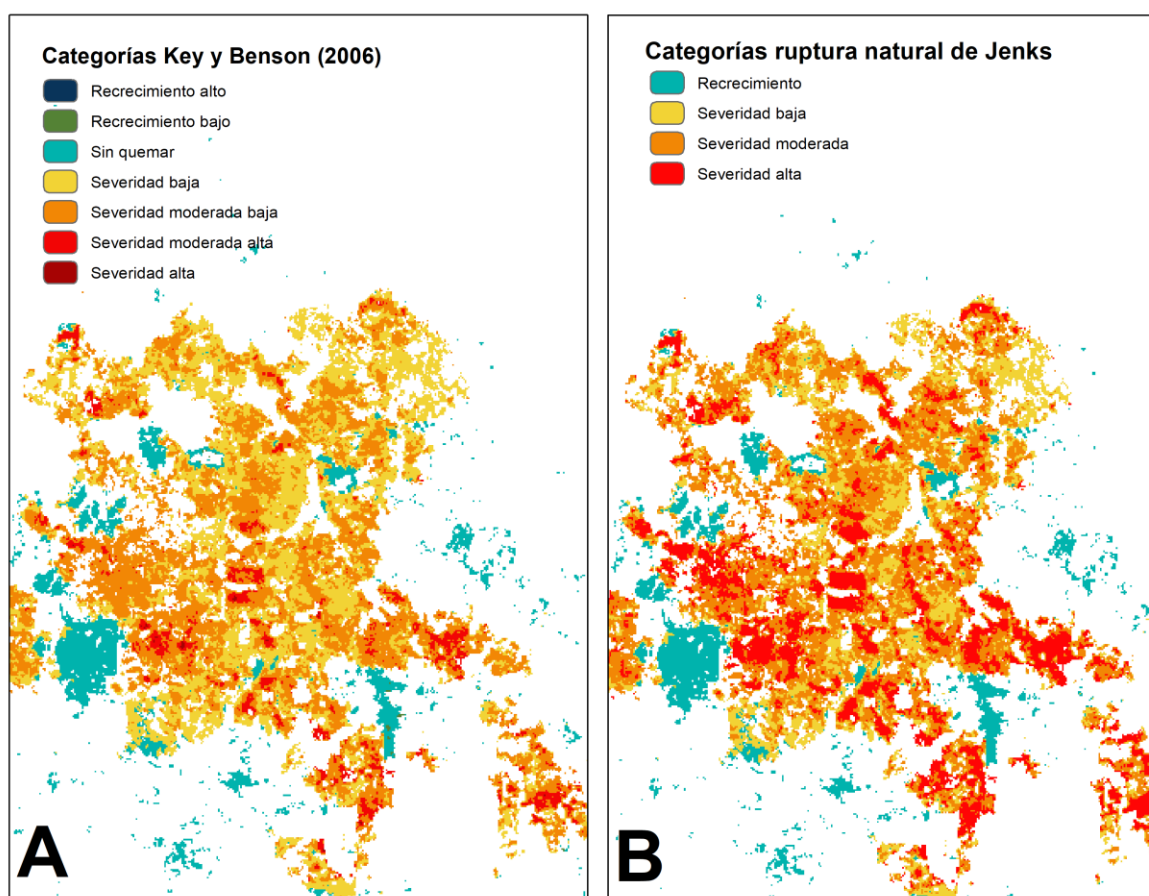


Figura 20. Comparación categorías de severidad con imágenes Landsat 8 OLI post-incendio 25 de abril de 2019: A) Key and Benson (2006) y B) Ruptura natural de Jenks.

III.5.2 Verificación de las categorías de severidad propuestas por Jenks.

Para verificar las categorías de severidad de las áreas quemadas de la propuesta de Jenks, se realizó con imágenes Planet de alta resolución en conjunto con trabajo de campo. Las imágenes de alta resolución se obtuvieron de datos satelitales de la plataforma Planet (Planet Labs PBC, 2023). Estas imágenes tienen una resolución de 3.7 metros en cuatro bandas multiespectrales, rojo (R), verde (G), azul (B) e infrarrojo cercano (NIR). Este es un procedimiento de validación estándar para validar datos de mediana resolución, con otras imágenes de mayor resolución (Justice et al., 2000; Tecuapetla-Gómez et al., 2021). Por ser un producto satelital reciente, solamente se obtuvieron imágenes a partir del año 2017. Se procuró que las fechas de las imágenes obtenidas fueran las más cercanas a los análisis realizados con las imágenes Landsat 8 OLI. Las imágenes fueron corregidas radiométricamente para obtener la reflectancia del techo de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés). Utilizando un compuesto de color RGB (R, NIR y B) permitió realzar la vegetación y las zonas quemadas en las imágenes pre y post incendio (**Figura 21**).

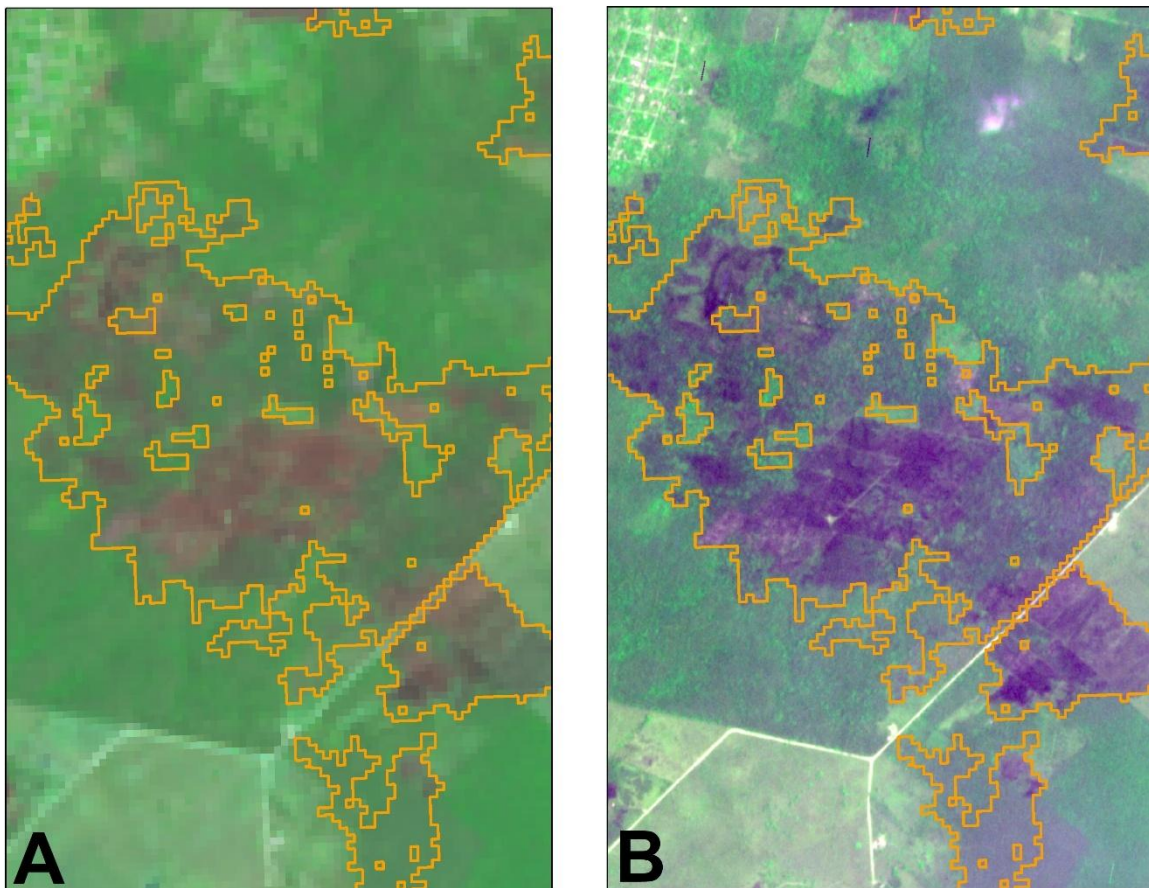


Figura 21. Comparación de la imagen A) Landsat 8 OLI post-incendio del 25 de abril de 2019 y B) Planet post-incendio del 26 de abril de 2019.

Para enfocarnos en la verificación de las clases de severidad se utilizó la imagen post-incendio del 26 de abril de 2019 y la imagen posterior a un año del incendio del 11 de abril de 2020 por haber tenido eventos de incendios recientes y significativos (**Figura 22**). Debido a que la evidencia de un incendio deja una señal más duradera que se produce como consecuencia de la pérdida o deterioro de la masa vegetal afectada por la severidad del fuego.

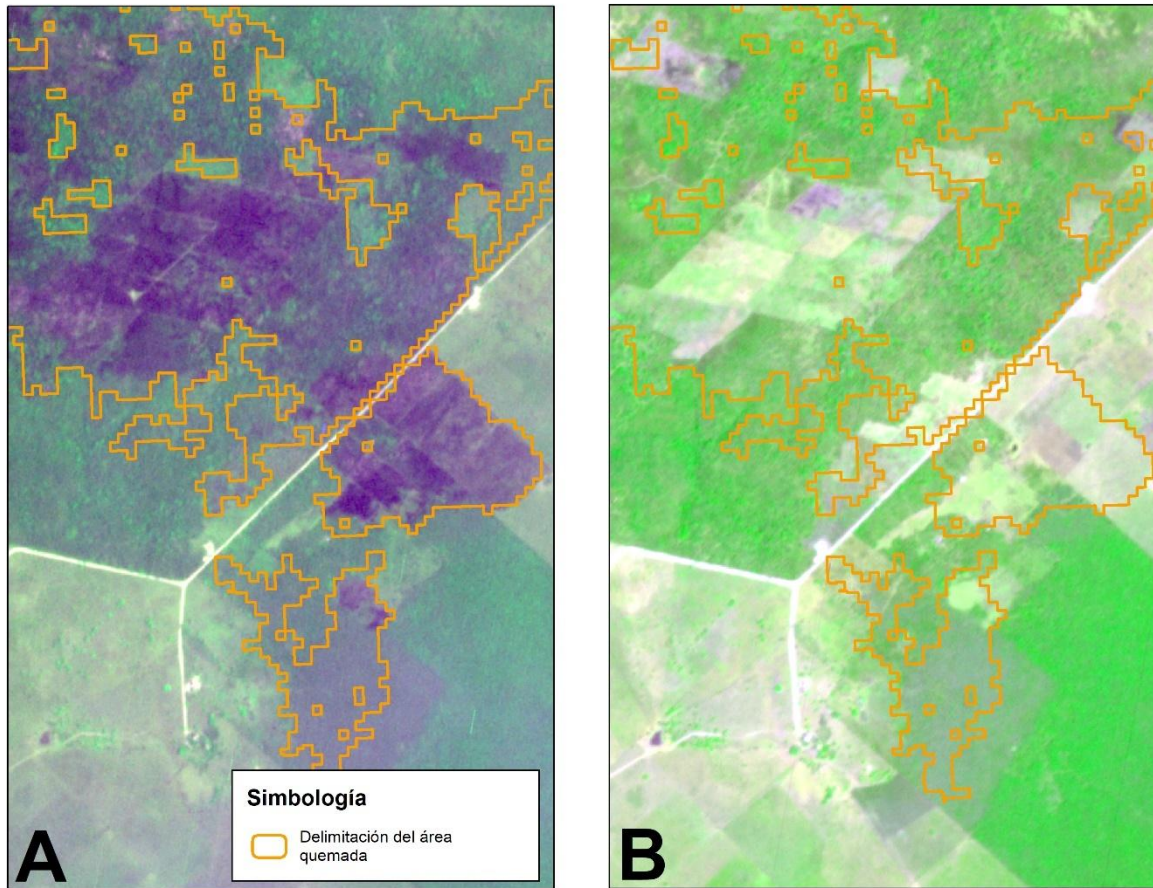


Figura 22. Comparación de la imagen A) Planet post-incendio de 26 de abril de 2019 y B) Planet post-incendio de 11 de abril de 2020.

III.6 Evaluación del impacto de la severidad de los incendios en la vegetación

La evaluación de la severidad es fundamental para la gestión de áreas quemadas y el desarrollo de estrategias de recuperación en los ecosistemas. La severidad del incendio se mide por la magnitud del cambio causado en la vegetación, incluyendo la biomasa consumida o dañada en diferentes estratos. Esta variación está relacionada con la intensidad del fuego, que se determina por su temperatura y duración (Guillem-Cogollos et al., 2017; Key & Benson, 2006). Además, autores como Keeley et al., (2008) han analizado la correlación entre la estimación de la severidad del fuego y la estructura de las especies vegetales. Por esta razón, para evaluar el impacto de la severidad de los incendios derivado de las imágenes de

satélite, se midió la estructura, riqueza y diversidad de las comunidades vegetales de la selva. La evaluación se realizó con el Índice de Shannon-Wiener, el Índice de Valor de Importancia y la desviación estándar. Para ello, se eligieron 20 sitios de muestreos en áreas quemadas con diferente severidad y áreas sin quemar como sitios de control que permitan verificar la verificación de las categorías de severidad propuestas por Jenks.

III.6.1 Selección de los sitios de muestreo

De acuerdo con la propuesta de las clases de severidad de Jenks, se eligieron 20 sitios de muestreo (**Figura 23**) que incluyeran las clases de severidad alta, moderada, baja y recrecimiento. Así como sitios de control en los que no se registró ningún incendio durante el periodo en estudio (**Tabla 16**). Los muestreos se realizaron entre mayo del año 2023 y enero de 2024. Los tipos de vegetación en los que se realizó el muestreo fue principalmente vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (sitios de muestreo del 1 al 16) y selva mediana subperennifolia en los sitios de muestreo del 17 al 20.

La elección de áreas de muestreo en vegetación de selva mediana subperennifolia y vegetación secundaria subperennifolia se basa en criterios de accesibilidad y seguridad. Estas zonas presentan condiciones geográficas e infraestructurales que facilitan un acceso más sencillo y seguro, a diferencia de otras áreas de vegetación en la que se identificó incendios. Además, ofrecen un entorno más seguro para el trabajo de campo, minimizando riesgos relacionados con fauna silvestre, condiciones climáticas adversas y terrenos difíciles. Esta selección asegura la viabilidad del estudio, permitiendo obtener datos confiables sin comprometer la seguridad. Además, la razón por la cual se realizaron menos muestreos en la selva mediana subperennifolia en comparación con la vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia radica en la extensión de las áreas afectadas por incendios. La vegetación secundaria presenta una superficie considerablemente mayor de área quemada. Dado que el estudio busca evaluar el impacto de los

incendios en la vegetación, se decidió enfocar más muestreos en estas áreas para obtener datos representativos y detallados sobre la regeneración y composición vegetal post-incendio. Esta distribución de muestreos permite una evaluación más precisa del impacto de los incendios, justificada por la mayor superficie afectada en la vegetación secundaria.

Tabla 16. Sitios de muestreo.

Sitio de muestreo	Categorías de severidad de Jenks	Tipo de vegetación	Ejido	Año del incendio
1	Recrecimiento	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
2	Recrecimiento	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
3	Severidad moderada	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
4	Severidad baja	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
5	Severidad moderada	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
6	Sitio de control	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
7	Sitio de control	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
8	Severidad baja	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
9	Severidad alta	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
10	Recrecimiento	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
11	Severidad alta	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
12	Recrecimiento	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
13	Sitio de control	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
14	Severidad baja	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
15	Severidad moderada	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
16	Severidad alta	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	El Centenario	2019
17	Severidad moderada	Selva mediana subperennifolia	El Centenario	2020
18	Severidad alta	Selva mediana subperennifolia	El Centenario	2020
19	Sitio de control	Selva mediana subperennifolia	El Centenario	2020
20	Sitio de control	Selva mediana subperennifolia	El Centenario	2020

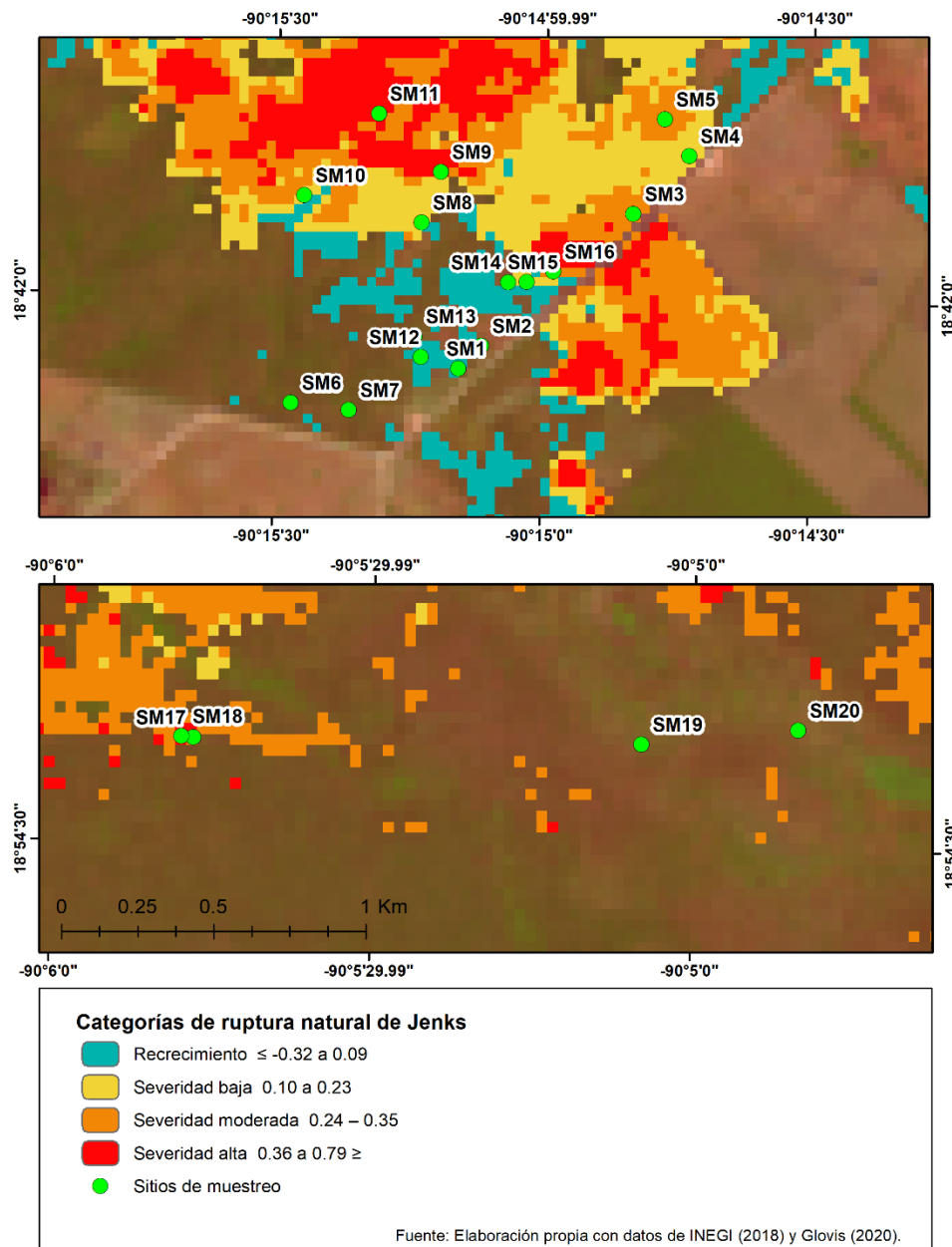


Figura 23. Ubicación espacial de los sitios de muestreo en el área en estudio.

III.6.2 Revisión de bases de datos de las especies vegetales de selva en el área de estudio

Para conocer las especies registradas en el área de estudio y facilitar la identificación durante los muestreos de vegetación se revisó listados de colecta de artículos científicos del área de estudio y bases de datos científicas de las especies presentes, con lo cual se elaboró una guía fotográfica de cada especie, que ayudó a identificar a la mayoría de las especies sin tener la necesidad de colectarlas. Aquellas especies que no pudieron ser identificadas en campo se determinaron con la ayuda de claves especializadas o apoyo de los actores locales de los sitios muestreados.

III.6.3 Medición de la estructura de la vegetación

Los sitios de muestreo consistieron en parcelas anidadas que permiten obtener información detallada a diferentes escalas dentro del mismo sitio (**Figura 24**). Para el muestreo de la vegetación arbórea que presenta un diámetro mayor a 7.5 centímetros se realizaron cuadrantes de 900 m² (30x30 m). Los datos levantados fueron especie; vivo o muerto; diámetro, altura, diámetro de copa y si su estructura se encuentra dañada por incendios. En caso de los arbustos con un diámetro menor a 7.5 centímetros se realizó un cuadrante con un radio de 4 m² (2x2 m) identificando las especies y el número presente de estas y registrando daños en su estructura debido a incendios. Por último, para la vegetación herbácea y muestreo de plántulas de las especies arbóreas se realizó un cuadrante de 1 m² (1x1 m). Estos criterios se basaron en estudios previos de FMCN et al. (2018) y Mostacedo & Fredericksen (2000).



Figura 24. Toma de datos de campo de los sitios de muestreo.

Para medir la diversidad estructural de las especies muestreadas, se utilizaron las variables de diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y especie (Martín-Sánchez, 2016). La identificación de las especies vegetales se realizó con apoyo de la guía fotográfica elaborada previamente. Las clases de diámetro y altura se calcularon utilizando la fórmula de Sturges (1926):

$$K = 1 + 3.333 * \log(n) \quad (12)$$

Donde:

K = número de clases

n = número de árboles

Además, se tuvieron en cuenta las categorías de altura definidas por Zamora-Crescencio et al. (2017). Su investigación se realizó en una selva mediana subperennifolia en Campeche, que coincide con el tipo de vegetación presente en el área de estudio durante el trabajo de campo, según datos del INEGI, (2018).

III.6.4 Análisis estadístico de los sitios de muestreo

Para analizar las diferencias significativas del impacto del fuego entre los sitios de muestreo, se utilizó la desviación estándar. Además, se realizaron pruebas de ANOVA y Kruskal-Wallis en el paquete estadístico PAST 4.13 (Hammer et al., 2001). Para identificar las clases diamétricas y de altura en las que se encontraron diferencias significativas, se realizó la prueba post-hoc de Dunn.

III.6.5 Análisis de la riqueza, diversidad y estructura de la vegetación en las áreas afectadas por incendios

Para evaluar el impacto de la severidad de los incendios en la selva, se estimó la riqueza con el Índice de Shannon-Wiener y la diversidad de la vegetación con el Índice de Valor de Importancia.

III.6.6 Índice de Shannon-Wiener

La aplicación del Índice de Shannon-Wiener (H') (Ecuación 7) nos permitió medir la riqueza de especies entre los sitios de muestreo (Zarco-Espinosa et al., 2010), cuya variación se relacionó con la severidad de los incendios. El índice de Shannon se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln(P_i) \quad (7)$$

Donde:

H' = Índice de Shannon-Wiener

S= número de especies

Pi = proporción de individuos de la especie i

A mayor valor de H' mayor diversidad de especies

III.6.7 Índice de Valor de Importancia

Se utilizó el Índice de Valor de Importancia (IVI) para evaluar la importancia relativa de las especies en los sitios de muestreo con diferentes niveles de severidad y en los sitios de control (Ferro-Díaz, 2015). Esto nos permite comprender cómo los incendios afectan la vegetación de la selva y cuáles familias y especies contribuyen a la estructura de un ecosistema quemado. Las fórmulas aplicadas incluyen la frecuencia relativa (ecuación 9), la densidad relativa (ecuación 10) y la dominancia relativa (ecuación 11). A continuación, se presentan las fórmulas utilizadas para las familias y especies en los sitios de muestreo:

Frecuencia relativa (9)

$$= \frac{\# \text{ parcelas en las que ocurre una familia o especie}}{\# \text{ total de ocurrencia de todas las familias o especies}} \times 100$$

Densidad relativa (10)

$$= \frac{\# \text{ individuos de una familia o especie}}{\# \text{ total de individuos de todas las familias o especies}} \times 100$$

Dominancia relativa

(11)

$$= \frac{\text{área basal de una familia o especie}}{\text{área basal total de todas las familias o especies}} \times 100$$

III.6.8 Sobre vuelo de las áreas muestreadas con Sistema de Aeronave Pilotado a Distancia (RPAS - Remotely Piloted Aircraft)

Por varios años, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) se han consolidado como herramientas invaluable para capturar, procesar y analizar información territorial. Estas tecnologías han demostrado ser esenciales en el estudio de problemáticas ambientales en ecosistemas forestales, como la deforestación, el cambio de uso de suelo, los incendios (**Figura 25**) y la contaminación (Carbajal-Domínguez, 2024).



Figura 25. Escape de fuego durante la preparación de terreno para cultivo en selva, captado con RPAS en el área de estudio (mayo de 2023).

Una de las principales ventajas de los RPAS es su alta resolución espacial. Al volar a bajas altitudes, pueden capturar imágenes detalladas que permiten realizar análisis precisos (**Figura 26**). Además, su capacidad de despliegue rápido los convierte en una herramienta versátil para estudios en tiempo real. Otra ventaja significativa es su capacidad para acceder a áreas de difícil acceso, como zonas con una geografía complicada, donde pueden recopilar datos detallados a bajo costo. Sin embargo, los RPAS tienen desventajas como su cobertura limitada debido a la autonomía restringida de sus baterías, lo que dificulta su uso en áreas extensas. También están sujetos a condiciones climáticas adversas y a regulaciones que pueden limitar su operación en ciertos espacios aéreos (Carbajal-Domínguez, 2024; Ojeda-Bustamante et al., 2017).



Figura 26. Seguimiento a un área donde se realizó cambio de uso de suelo utilizando fuego en enero de 2023 en el área en estudio.

Por otro lado, las imágenes satelitales ofrecen una cobertura global que permite monitorear grandes áreas o regiones remotas. Esta característica es especialmente útil para estudios a gran escala o para la evaluación de fenómenos en lugares de difícil acceso. Además, los satélites cuentan con archivos históricos de datos que permiten analizar tendencias a lo largo del tiempo, así como sensores

multiespectrales que recopilan información en diversas longitudes de onda, proporcionando un análisis detallado de la superficie terrestre (De Jong et al., 2013; EOS Data Analytics, 2024). Sin embargo, las imágenes satelitales tienen sus limitaciones. Por ejemplo, su resolución espacial suele ser inferior a la de los RPAS (**Figura 27**), lo que puede ser un inconveniente para estudios que requieren un alto nivel de detalle. También son sensibles a condiciones atmosféricas, como la presencia de nubes, que pueden dificultar la captura de imágenes claras. Finalmente, los satélites tienen menor flexibilidad temporal, ya que su capacidad para captar datos depende de su programación y frecuencia de paso (Tecuapectla-Gómez et al., 2022).



Figura 27. Comparación de la resolución espacial entre una imagen de RPAS (A) y la imagen Landsat 8 (B) en el área en estudio.

En muchos casos, la combinación de ambas tecnologías puede ofrecer resultados más completos como se demostró con esta investigación. Los RPAS pueden proporcionar información detallada y específica, mientras que las imágenes satelitales permiten analizar información con un rango más amplio. La elección entre RPAS e imágenes satelitales debe basarse en factores como la escala del área a estudiar, la resolución necesaria, las condiciones climáticas y las regulaciones vigentes.

En el área de estudio, el uso de RPAS ha resultado fundamental para complementar con los resultados obtenidos de las imágenes de satélite y en trabajo de campo. Estas herramientas permiten integrar análisis de alta precisión con los datos provenientes de imágenes satelitales, mejorando la capacidad de evaluar el impacto

de los incendios. En particular, su empleo ha facilitado la delimitación y cuantificación de las áreas afectadas, así como la clasificación de la severidad de los incendios y el monitoreo de los procesos de revegetación. Esto no solo optimiza la precisión de los análisis, sino que también ofrece un enfoque integral para entender los patrones espaciales y temporales de los incendios, proporcionando una base sólida para el diseño de estrategias de manejo y restauración.

Durante los trabajos de campo realizados, se llevó a cabo un levantamiento de imágenes aéreas para cubrir los sitios identificados como áreas afectadas por incendios, previamente delimitadas mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat 8. En uno de los sitios de muestreo, se obtuvieron imágenes de alta resolución mediante el uso de un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés), específicamente el modelo DJI Mini 2 (**Figura 28**).



Figura 28. RPAS DJI Mini 2 utilizado para realizar los vuelos de las áreas afectadas por incendios.

El DJI Mini 2 es un vehículo aéreo no tripulado equipado con cuatro motores, los cuales funcionan a diferentes velocidades para garantizar un vuelo estable y direccional. Las fotografías aéreas fueron capturadas con un sensor de tipo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) de 1/2.3 pulgadas, con una resolución efectiva de 12 megapíxeles. Este sensor está acompañado por un objetivo con una distancia focal equivalente a 35 mm, una apertura fija de f/2.8 y un

campo de visión de 83 grados, características que garantizan la captura de imágenes de alta calidad y precisión (DJI, 2021). Este levantamiento aéreo permitió obtener información detallada del área de estudio, complementando los datos satelitales con imágenes de mayor resolución. Esto no solo facilitó la delimitación y análisis de las áreas afectadas, sino también el desarrollo de una metodología más robusta para el monitoreo de los efectos del fuego y la posterior regeneración del ecosistema.

Para el procesamiento de la información obtenida del RPA se utilizó el software Agisoft Photoscan Professional v1.8.4 (www.agisoft.com) (Agisoft LLC, San Petersburgo, Rusia), que implementa algoritmos como el de estructura a partir del movimiento para generar las nubes de puntos derivadas de las fotografías RGB, denominado SfM por sus siglas en inglés Structure from Motion (SfM). Photoscan (**Figura 29**) detecta inicialmente decenas de miles de características en cada imagen, que luego se emparejan entre las imágenes. Se aplica un ajuste iterativo para estimar las posiciones 3D de las características emparejadas, así como las posiciones y orientaciones de la cámara. Esta información se utiliza en una reconstrucción densa multivista de la geometría de la escena a partir de las imágenes alineadas. En lugar de utilizar puntos de control terrestre (GCP) para georeferenciar la escena creada se aplica una técnica de georreferenciación directa basada en la posición de la cámara medida por GPS. Para el procesamiento en Photoscan se utilizó la configuración de alta precisión, es decir, para la detección de puntos, la construcción de la nube de puntos densa, y la fase de construcción de la geometría de procesamiento (Wallace et al., 2016). Los sitios de muestreo se sobrevolaron con una altura de 200 m sobre el nivel del suelo, en dirección norte-sur y este-oeste y viceversa para obtener cuatro transectos para el cubrimiento. Los vuelos se realizaron en junio de 2022, mayo 2023, enero y mayo de 2024 obteniendo un total de 500 fotografías de las que se obtuvo una resolución sobre el terreno de 6.7 cm/px.

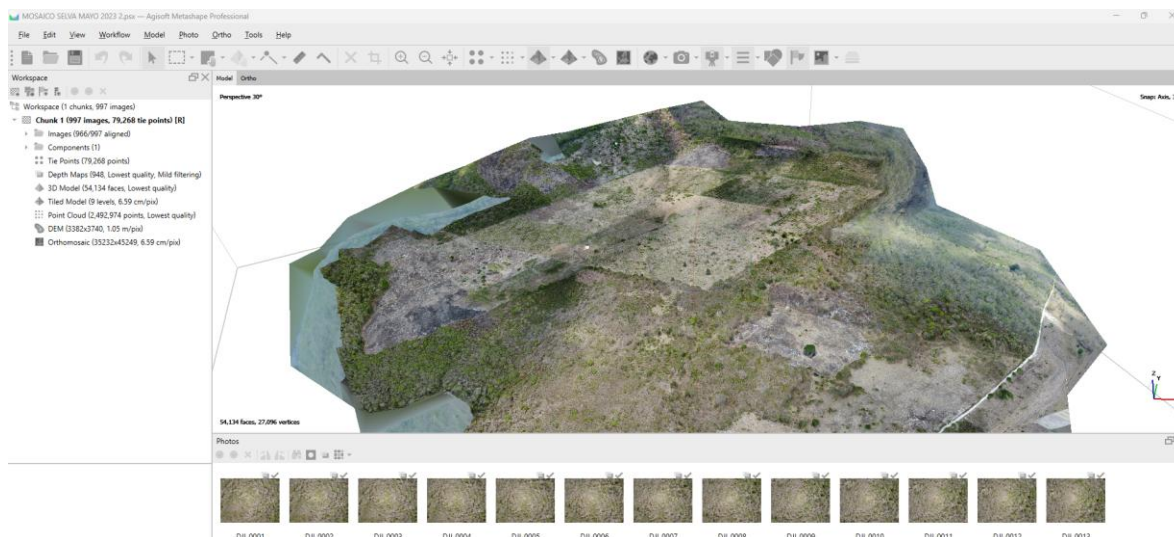


Figura 29. Software Agisoft Photoscan Professional

El análisis de la información obtenida a partir de los mosaicos procesados con las imágenes capturadas por el RPAS, en conjunto con las imágenes satelitales Landsat 8, se realizó utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta herramienta permitió integrar y analizar los datos espaciales de manera eficiente, facilitando la observación y ubicación precisa de los sitios de muestreo. Para ello, se crearon archivos vectoriales que representaron las coordenadas geográficas de los puntos de interés, lo que permitió superponer los datos de alta resolución proporcionados por el RPAS con las imágenes satelitales de menor resolución, pero mayor cobertura. Este enfoque combinó las ventajas de ambas fuentes de información, optimizando la interpretación espacial de las áreas afectadas por incendios.

Además, el SIG (**Figura 30**) permitió realizar análisis complementarios como la generación de mapas temáticos, la delimitación de polígonos de áreas afectadas y la cuantificación de superficies por incendios. Esta metodología no solo fortaleció la precisión del análisis espacial, sino que también facilitó la creación de productos cartográficos útiles para el análisis de esta investigación.

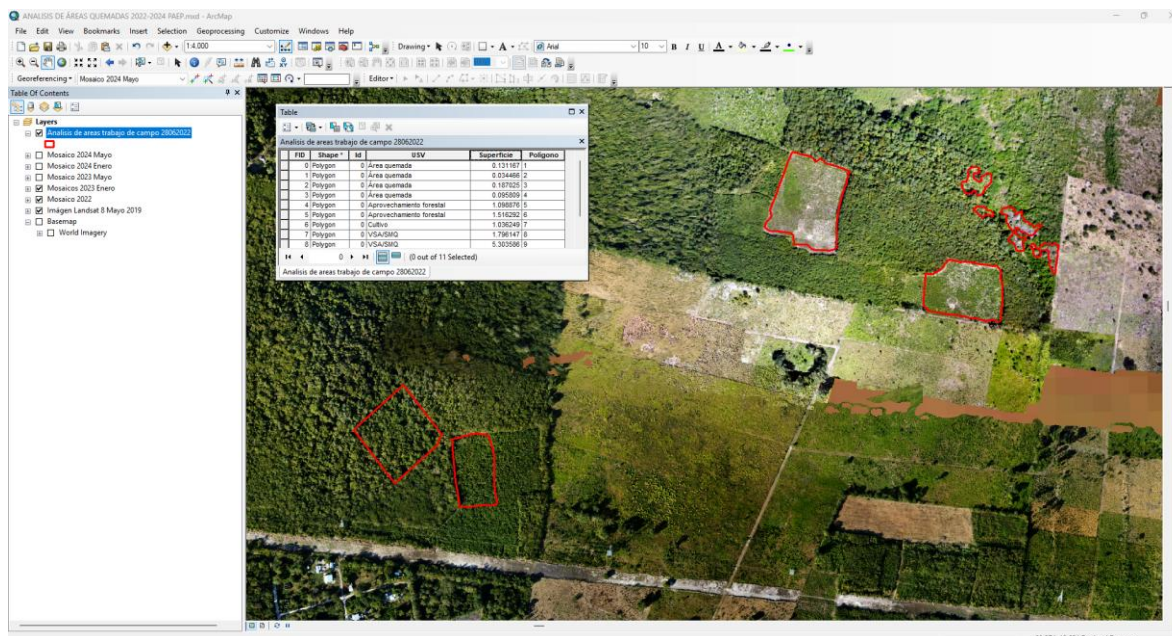


Figura 30. Delimitación de polígonos de áreas afectadas y la cuantificación de superficies por incendios en el SIG.

III.7 Análisis multitemporal de las áreas quemadas

Contar con una disponibilidad histórica de imágenes de satélite resulta ser una herramienta que permite detectar cambios positivos o negativos en la fenología de la vegetación que pueden ser naturales o antrópicos (Nemmaoui et al., 2013). Estos cambios han podido ser evidenciados a partir de los índices de vegetación que han contribuido en el monitoreo de la superficie terrestre desde 1980. Un índice muy utilizado es el NDVI, que es un parámetro que se puede generar a partir de datos satelitales que cuenten con los valores de reflectancia en las bandas roja (R) e infrarroja (IR) (Manzo-Delgado et al., 2009).

Los cambios en la vegetación a largo plazo pueden ser graduales o bruscos. Los cambios bruscos pueden haber sido inducidos por incendios. Los cambios de la vegetación utilizando el NDVI se consideró un elemento importante para analizar el impacto de la severidad del incendio (De Jong et al., 2013).

Para llevar a cabo este análisis se trabajó con el software R, en su interfaz gráfica Rstudio. Este software de programación nos permitió escribir código para realizar el tratamiento de las imágenes de satélite Landsat 8 tales como recorte del área en estudio, corrección atmosférica y generar el NDVI. El tratamiento de las imágenes se llevó a cabo para una serie de tiempo de 158 imágenes que cubrieron el periodo 2014-2020. El año 2013 no se incluyó porque hubo una gran ausencia de imágenes. En la **Tabla 17** se muestra el catálogo de imágenes que se utilizó para llevar a cabo el análisis de la serie de tiempo. En los años 2014 (20141101), 2016 (20160630) y 2018 (20180130) se agregó una imagen de relleno sin información para completar aquellos años en los que el satélite solo generó un total de 22 imágenes y poder obtener la serie temporal de 23 imágenes por año y que es requisito tener un mismo número de imágenes para el paquete llamado BFAST (Breaks for Additive Season and Trend, en español Rupturas para la Estación Aditiva y la Tendencia) para poder realizar la serie de tiempo (Verbesselt et al., 2016). BFAST es una herramienta de análisis de series de tiempo que se utiliza para descomponer una serie de tiempo en sus componentes de tendencia, estacionalidad y residuos

Tabla 17. Catálogo de imágenes Landsat 8 con el que se realizó la serie de tiempo.

Imágenes	Mes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	Enero	20140105	20150108	20160111	20170113	20180116	20190103	20200106
2	Enero	20140121	20150124	20160127	20170129	20180130	20190119	20200122
3	Febrero	20140206	20150209	20160212	20170214	20180201	20190204	20200207
4	Febrero	20140222	20150225	20160228		20180217	20190220	20200223
5	Marzo	20140310	20150313	20160315	20170302	20180305	20190308	20200310
6	Marzo	20140326	20150329	20160331	20170318	20180321	20190324	20200326
7	Abril	20140411	20150414	20160416	20170403	20180406	20190409	20200411
8	Abril	20140427	20150430		20170419	20180422	20190425	20200427
9	Mayo	20140513	20150516	20160502	20170505	20180508	20190511	20200513
10	Mayo	20140529		20160518	20170521	20180524	20190527	20200529
11	Junio	20140614	20150601	20160619	20170606	20180609	20190612	20200614
12	Junio	20140630	20150617	20160630	20170622	20180625	20190628	20200630
13	Julio	20140716	20150703	20160705	20170708	20180711	20190714	20200716
14	Julio		20150719	20160721	20170724	20180727	20190730	
15	Agosto	20140801	20150804	20160806	20170809	20180812	20190815	20200801
16	Agosto	20140817	20150820	20160822	20170825	20180828	20190831	20200817
17	Septiembre	20140902	20150905	20160907	20170910	20180913	20190916	20200902

Tabla 17. Catálogo de imágenes Landsat 8 con el que se realizó la serie de tiempo.

Imágenes	Mes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
18	Septiembre	20140918	20150921	20160923	20170926	20180929		20200918
19	Octubre	20141004	20151007	20161009	20171012	20181015	20191002	20201004
20	Octubre	20141020	20151023	20161025	20171028	20181031	20191018	20201020
21	Noviembre	20141101	20151108	20161110	20171113	20181116	20191103	20201105
22	Noviembre	20141121	20151124	20161126	20171129		20191119	20201121
23	Diciembre	20141207	20151210	20161212	20171215	20181202	20191205	20201207
24	Diciembre	20141223	20151124	20161228	20171231	20181218	20191221	20201223
	Total de imágenes	23	23	23	23	23	23	23

Nota: Los recuadros azules muestran las ausencias de imágenes del satélite Landsat 8.

Una vez que las imágenes fueron sometidas al pre-procesamiento, se utilizó el paquete BFAST para analizar las áreas quemadas. Este método emplea el estadístico OLS-MOSUM (Mínimos Cuadrados Ordinarios - MOSUM, por sus siglas en inglés) para detectar la existencia de puntos de cambio en la tendencia, basándose en los residuales r_l, h . Esto permite identificar variaciones significativas en las áreas previamente afectadas por el fuego. Específicamente, BFAST emplea el estadístico OLS-MOSUM (OLS, en inglés, son las siglas de mínimos cuadrados ordinarios). Este estadístico sirve para determinar los puntos de cambio en el componente estacional. Este estadístico depende de la banda h para la identificación de los puntos de cambio. En otros términos, este parámetro controla la separación admisible entre dos puntos de cambio estadísticamente significativos. Y esta separación entre puntos de cambio es relativa al número de observaciones disponibles (Tecuapetla-Gómez et al., 2021).

$$MSMS_{N,h} = \max_{0 \leq l \leq N-k-[(N-k)h]} [r_l, h] \quad (13)$$

Este algoritmo permite detectar y caracterizar los cambios bruscos dentro de componentes de tendencia y estacionales de una serie de tiempo (Verbesselt et al., 2010). Dentro del paquete BFAST se utilizó la función bfast01 que a diferencia de BFAST, permite ubicar la ruptura (cambio en la vegetación de los valores del NDVI) más importante en la serie temporal y determinar su cambio. El modelo Y_t en el

momento t , se asume como un modelo de tendencia estacional con tendencia lineal y temporada armónica:

$$Y_t = \alpha_1 + \alpha_2 t + \sum_{j=1}^k \gamma_j \sin\left(\frac{2\pi j t}{f} + \delta_j\right) + \varepsilon_t \quad (14)$$

Donde el intercepto α_1 la pendiente α_2 (es decir la tendencia), las amplitudes $\gamma_1, \dots, \gamma_k$, y fases $\delta_1, \dots, \delta_k$ (es decir la estación) son los parámetros desconocidos, f es la frecuencia conocida (por ejemplo, $f = 12$ observaciones anuales para una serie temporal mensual), y ε_t es el término de error inobservable en el tiempo t (con desviación estándar) (De Jong et al., 2013). En la **Figura 31** podemos observar el flujo de trabajo realizado para la generación de la serie de tiempo y la caracterización de los cambios para el área en estudio.

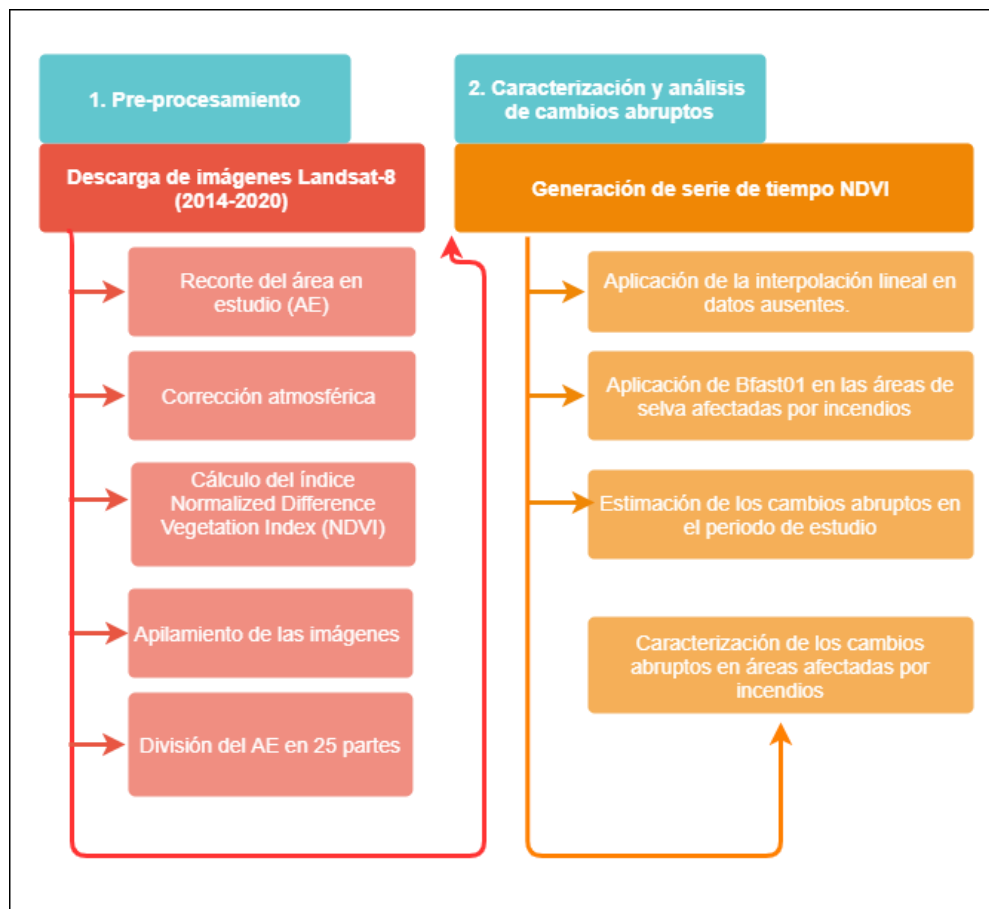


Figura 31. Flujo de trabajo para la generación de la serie de tiempo y caracterización de cambios abruptos en el NDVI de áreas afectadas por incendios mediante bfast01.

III.7.1 Aplicación de bfast01 en las áreas quemadas

Para comprender el comportamiento de la selva afectada por el fuego, se analizaron los índices BAI, NBR y dNBR. En este análisis, se aplicó la función `bfast01`, la cual permite identificar el punto de cambio más significativo en la tendencia del NDVI en los píxeles que se encuentran dentro de la zona afectada por el incendio.

En la **Figura 32**, se presenta el proceso de análisis de la serie temporal de estos píxeles, dividido en tres etapas. La primera etapa es la generación de la serie temporal, en la cual se observan vacíos significativos de información. Estos vacíos son resultado de la ubicación geográfica del área de estudio, que está sujeta a la presencia constante de nubes, lo que dificulta la obtención de datos completos.

Como solución a la pérdida de información, se realizó una interpolación lineal para rellenar los vacíos en los datos. Una vez que se completó esta interpolación, se aplicó la función `bfast01` para examinar la respuesta en la tendencia del NDVI en los píxeles dentro de las áreas afectadas por incendios, utilizando los índices previamente mencionados.

La figura ilustra el contraste entre un píxel afectado por el fuego y uno no afectado. Del lado izquierdo, se muestra un píxel quemado, cuya tendencia en el valor del NDVI muestra un descenso. En contraste, del lado derecho, un píxel no quemado mantiene valores de NDVI estables.

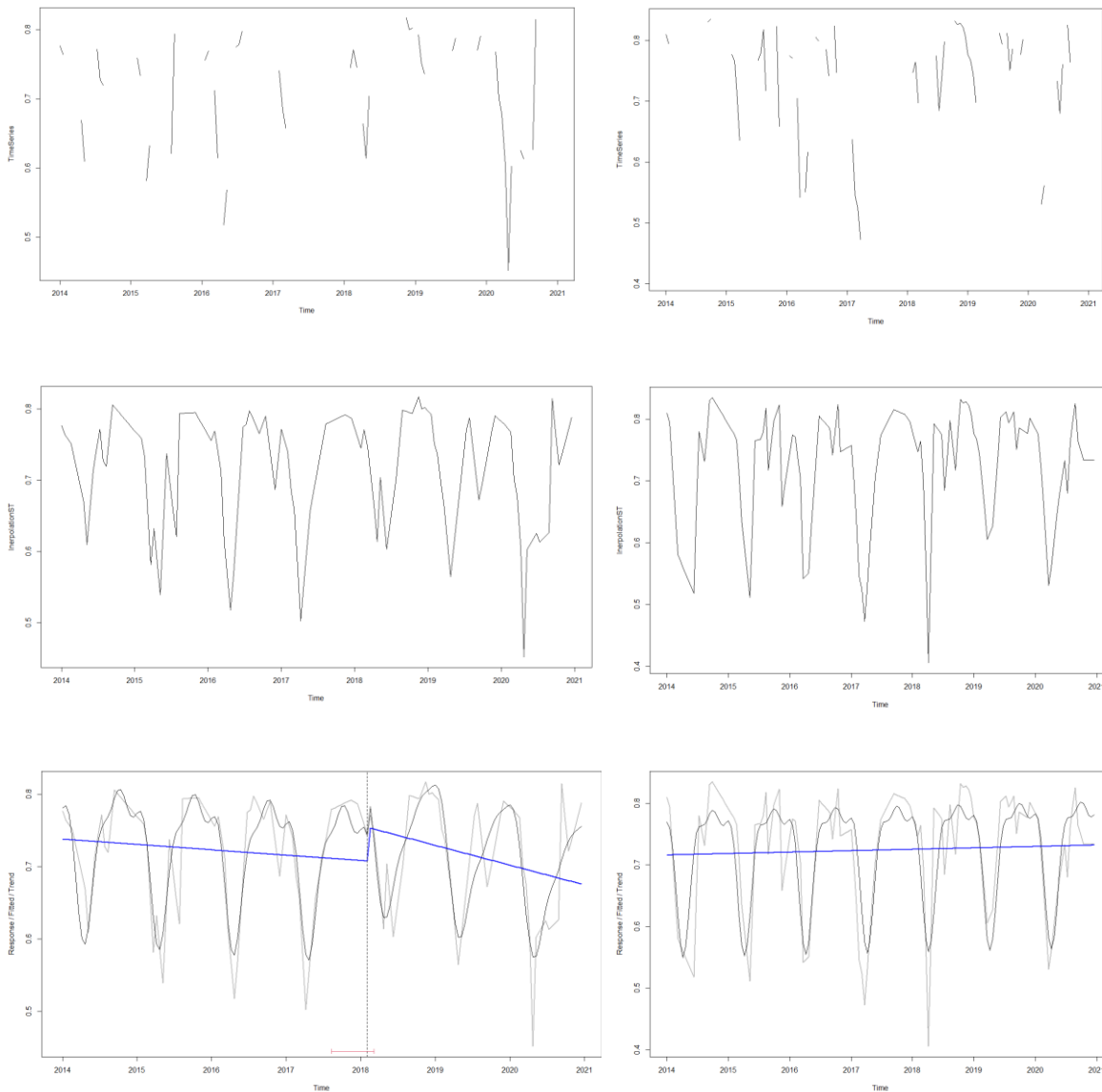


Figura 32. Comportamiento de la tendencia del NDVI en un píxel afectado por el fuego (izquierda) y en un píxel que no ha sido afectado por el fuego (derecha).

De acuerdo con De Jong et al. (2013) se pudieron caracterizar seis cambios que definieron de acuerdo con la **Figura 33** como monotonic greening (enverdecimiento), monotonic browning (pardeamiento), browning with burst (pardeamiento demorado), browning to greening (pardeamiento a enverdecimiento), greening with setback (enverdecimiento demorado) y greening to browning (enverdecimiento a pardeamiento).

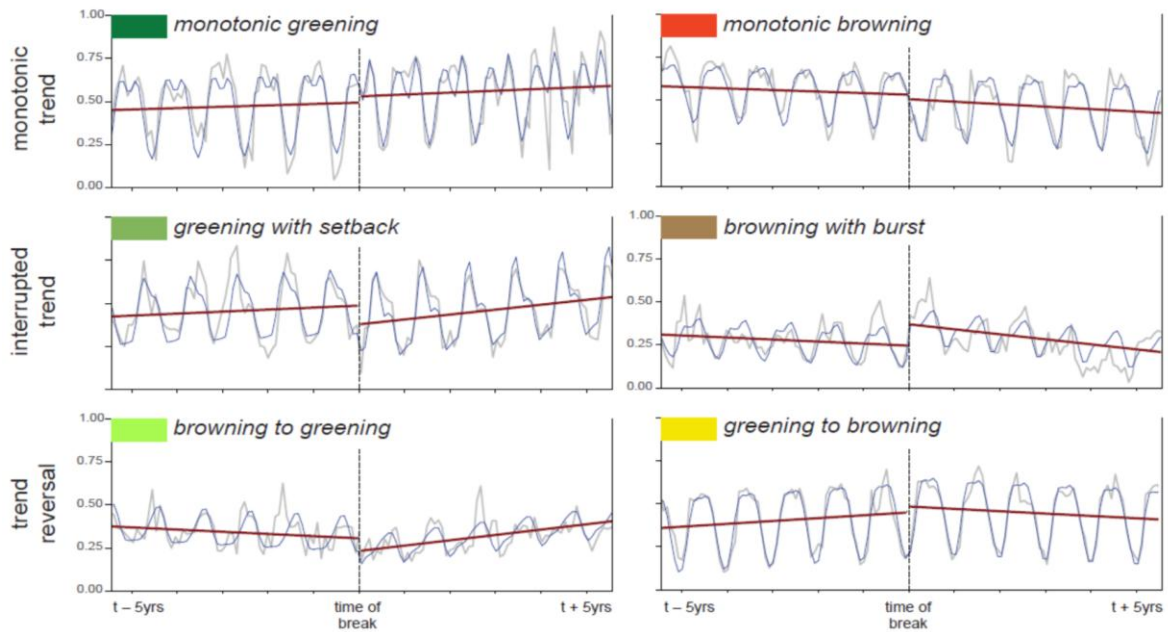


Figura 33. Ejemplos de cambios (De Jong et al., 2013)

Se evaluó la recuperación de la vegetación post incendio mediante análisis de series de tiempo de imágenes del periodo en estudio, para analizar las diferentes respuestas espectrales pre y post fuego, utilizando la ecuación 3 (delta Normalized Burn Ratio dNBR) para saber si durante el periodo del proyecto (2013-2020) las superficies de vegetación de selva se han recuperado o deteriorado en cuanto a su comportamiento espectral.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

IV.1 Análisis de la influencia de las acciones humanas en la severidad de los incendios y su impacto en los recursos de la selva

Con el objetivo de comprender cómo las acciones humanas han influido en la severidad de los incendios y su impacto en los recursos de la selva en el área de estudio, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas. Estas entrevistas abordaron temas como la historia de los incendios, su severidad y los beneficios que aporta la selva. Estos temas de interés se plantearon a los ejidatarios, autoridades locales (comisarios o miembros de los comités de incendios locales), los brigadistas o combatientes de incendios, funcionarios y personas de organizaciones no gubernamentales por ser actores de diferentes niveles que están relacionados con el tema del manejo del fuego en el área en estudio (**Figura 34**). Sus vivencias y experiencias son importantes para entender como la identificación, delimitación y análisis de áreas quemadas mediante percepción remota y los índices de incendios se pueden relacionar para explicar su origen, causas y posibles efectos de incendios en las selvas de la región oriental del municipio de Escárcega, Campeche. Estos actores mantienen un flujo de comunicación y cooperación para la implementación de estrategias y mejora de programas para el manejo del fuego en el área en estudio.

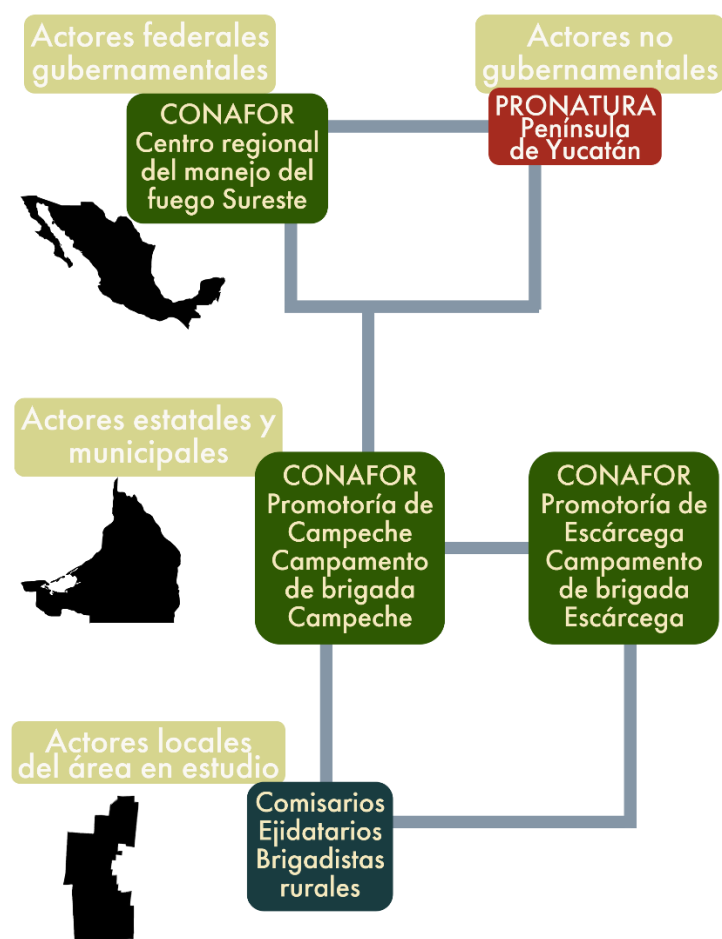


Figura 34. Flujo de cooperación y comunicación de los actores involucrados en el manejo del fuego del área en estudio.

En cuanto a números de entrevistados se considera un actor de carácter no gubernamental (3%), un actor de carácter federal (3%), 11 (28%) actores estatales y municipales y por último 31 actores locales, que en términos de porcentaje representan el 67% de las personas entrevistadas para el área en estudio (**Figura 35**).

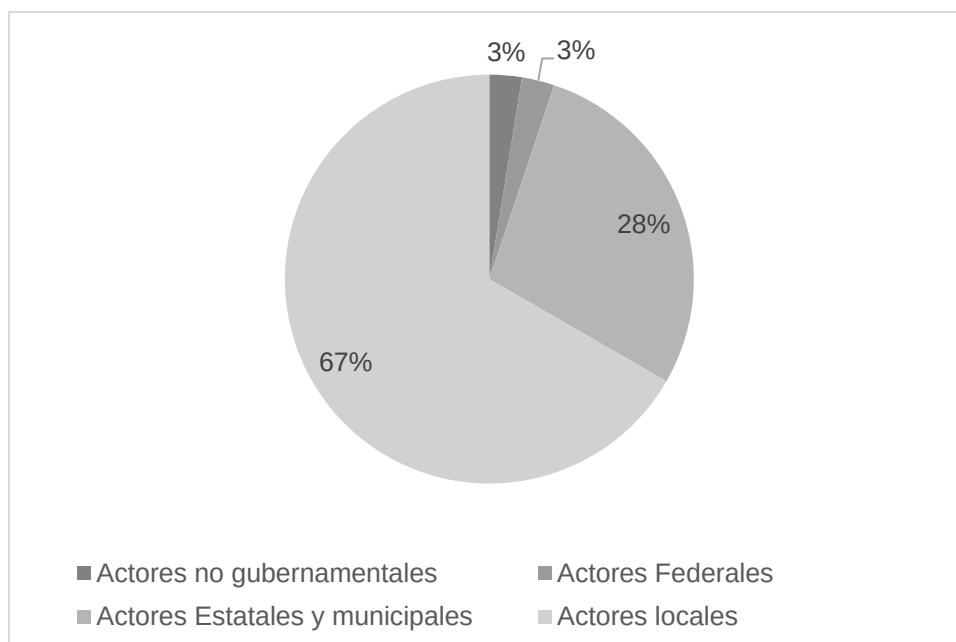


Figura 35. Representatividad de actores entrevistados para el área en estudio.

IV.1.1 Entrevistas con autoridades gubernamentales y no gubernamentales

Las autoridades que se entrevistaron de manera virtual a través de la plataforma de Google Meet realizada en el mes de mayo fueron:

Ing. Pánfilo Flores, jefe del Centro Regional del Manejo del Fuego Sureste - CONAFOR. 30 años de experiencia en el manejo del fuego.

Mtra. Diana López, encargada del programa de manejo del fuego para la Península de Yucatán – PRONATURA. 10 años de experiencia en el manejo del fuego.

Ing. Román Gómez, enlace del manejo del fuego en el departamento de restauración y protección de la CONAFOR, Campeche. 5 años de experiencia en el manejo del fuego.

Biól. José Arnoldo Villaseñor, jefe del departamento de restauración y protección de la CONAFOR, Campeche y Escárcega. 2 años de experiencia en el tema del manejo del fuego.

Como se muestra en la **Figura 36** con respecto a la distribución de las dependencias, PRONATURA es la que se ubica a mayor distancia del área en estudio y es de carácter no gubernamental, sin embargo, esta dependencia mantiene un trabajo en conjunto con el Centro Regional del Manejo del Fuego Sureste en donde se encuentra el Ing. Pánfilo Flores y las promotorías de Campeche y Escárcega de la CONAFOR.

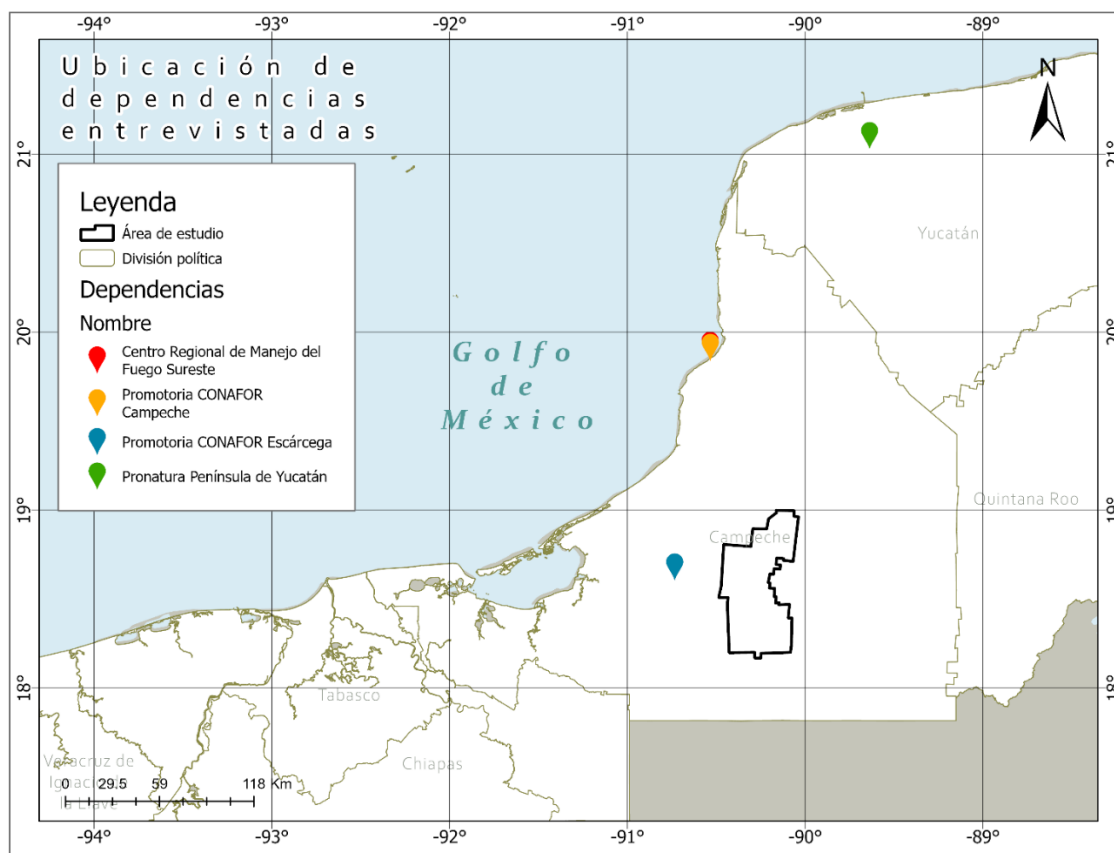


Figura 36. Ubicación espacial de las dependencias entrevistadas.

La información que se pudo obtener de las autoridades gubernamentales y no gubernamentales concentra ideas muy importantes de la experiencia de cada uno de ellos en el tema de los incendios en la selva. Estos temas estuvieron enfocados a la historia de incendios y la severidad en la península de Yucatán y de manera particular en el área en estudio.

El tema de historia de incendios para los entrevistados se abordó con su participación, experiencia y conocimientos en incendios en la selva de la Península de Yucatán. Todos ellos afirmaron su participación en actividades de concientización previas al periodo crítico de incendios, monitoreo de incendios en tiempo real, uso de puntos de calor y actividades enfocadas en la restauración de áreas quemadas de los ecosistemas en el sureste del país.

Con respecto al tema del manejo del fuego los actores coinciden que existen tres factores determinantes en los incendios de selva, que son la topografía, los combustibles y el tiempo atmosférico que incluye condiciones como la temperatura, la humedad relativa y los vientos. Una situación atmosférica que es importante considerar de acuerdo con el Ing. Pánfilo Flores, es el fenómeno del ENOS debido a que una condición Niña ha marcado periodos más críticos de incendios identificando una mayor afectación debido al aporte de combustibles derivado de los eventos de tormentas y huracanes que se desarrollan en la Península de Yucatán.

Por otra parte, en el estado de Campeche mencionaron que los municipios de Hopelchén, Calakmul, Escárcega, Champotón y Candelaria son de carácter prioritario en las labores de prevención y combate de incendios por los macizos de vegetación que mantienen. De acuerdo con datos históricos, se constató que el ejido de El Lechugal es uno de los que más incendios ha registrado y se encuentra dentro del área de estudio. De manera general en el estado de Campeche, los años más importantes con incendios identificados en sus reportes han sido los años 2013, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020. Siendo 2019 un año en el que se notó un incremento de los puntos de calor muy marcado, lo que pudo estar relacionado con el programa gubernamental Sembrando Vida (Esto también lo menciona la literatura Pagan et al., 2021). Este incremento de puntos de calor pudo estar relacionado al uso del fuego para la preparación de sus terrenos y por consiguiente el escape del incendio en la vegetación de selva. Aunque la pandemia también pudo influir en la quema de superficie debido a que los hijos al no presentarse a actividades escolares apoyaban

en las labores de limpieza de los terrenos agropecuarios permitiéndoles también desmontar más superficies forestales y expandir sus áreas de cultivo.

De acuerdo con los expertos los incendios en la selva son principalmente de tipo superficial (quemando principalmente pastos, arbustos, la hojarasca y ramas que se desprenden) pero también llegan a quemar árboles secos formando antorchas, estos incendios suelen ser muy dañinos por el poco desarrollo de los suelos (**Figura 37**). Se han dado casos en que los incendios son subterráneos, de copa o aéreos, estos últimos podrían estar determinados por la altura de la selva. Poder atender un incendio en selva suele ser sencillo pero las variables meteorológicas pueden dificultar mantenerlo bajo control, sobre todo si se han modificado por efecto de huracanes, aprovechamientos forestales o sequías prolongadas, cambian las condiciones con magnitudes relevantes (cantidad de superficie que se quema), lo que dificulta el uso de las herramientas y estrategias desarrolladas para el manejo del fuego. Es claro que el conocimiento tradicional que existía sobre el uso del fuego, pero que se enfrenta con desafíos en la actualidad porque las variables ambientales han cambiado. Por ejemplo, la lluvia se ha desfasado y la temperatura ha aumentado y con ello la permanencia de una sequía prolongada que influye en el material combustible de incendios, aumentando la severidad de estos.





Figura 37. Ubicación Actividades de combate de incendios por parte de los brigadistas de CONAFOR, CONANP y SEMABICCE en la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche
Fuente de las imágenes: SEMABICCE, 2022.

Una actividad que consideran los entrevistados como causa de incendios además de las actividades en los agroecosistemas, es la caza furtiva por la intromisión de cazadores provocando incendios que suelen escaparse a la selva debido que utilizan el fuego para el rebrote de vegetación en busca de atraer a sus presas o hacer salir a sus presas de su hábitat y poderlas poner a tiro (**Figura 38**). Esto ha derivado en conflictos por el traslape de actividades de conservación y aprovechamiento en los mismos espacios y recursos faunísticos como menciona Pérez Rodríguez et al. (2018). En segundo lugar están los incendios debido a las actividades agropecuarias, por los habitantes de los ejidos que no suelen realizar las medidas preventivas, cuando utilizan el fuego en sus terrenos provocando que el fuego se salga de control.



Figura 38. Cartucho de escopeta en el área en estudio.

Actualmente no existe un monitoreo de las áreas quemadas o seguimiento que permita asegurar su recuperación, y la severidad. El programa del manejo del fuego tiene como objetivos hacer recorridos de extensionismo en las comunidades más susceptibles a los incendios. Las reuniones se hacen principalmente en coordinación con el municipio, protección civil, Sembrando Vida y CONANP. Estas actividades se les conoce como de prevención cultural, pero también se realizan actividades de prevención física como la elaboración de líneas negras, apertura de brechas o su rehabilitación, así como el correcto uso del fuego siguiendo las encomiendas de la NORMA-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, perteneciente al ámbito de la prevención legal.

En cuanto al tema de la severidad de los incendios los entrevistado mencionaron que la carga de combustibles influye en la severidad de los incendios, y esto se debe principalmente al régimen de incendios de la selva que, al ser escasos, de manera natural llegan a acumular grandes cantidades de combustibles, lo que llega a desencadenar incendios desastrosos debido a la carga de combustibles leñosos, hojarasca y capa de fermentación.

Los entrevistados coincidieron en que los aprovechamientos forestales, junto con las condiciones atmosféricas, son una de las principales causas del desarrollo de incendios. Además, estas variables influyen en la severidad de los mismos. Cuando el fuego es superficial y emite poco calor, es menos intenso y puede resultar beneficioso, facilitando la germinación de semillas. Durante el trabajo de campo, que incluyó vuelos de RPAS en 2022, 2023 y 2024, se observó que las áreas quemadas, ya sea intencionalmente para el cultivo de maíz o por incendios accidentales, experimentan un rebrote de vegetación acompañado por herbáceas, arbustos y plántulas de árboles como el Chechén y el Chaká.

También destacaron que la intensidad del fuego influye significativamente en la afectación de la selva. Sin embargo, el tipo de selva también es un factor determinante, ya que su comportamiento frente al fuego varía. Las selvas bajas caducifolias tienden a acumular una mayor carga de combustibles, mientras que, en las selvas medianas, los huracanes aumentan la cantidad de material leñoso susceptible de arder. A pesar de esto, en las selvas medianas, los incendios suelen ser más moderados en comparación con las selvas bajas, debido a las condiciones de mayor humedad y la altura del dosel característico de este tipo de vegetación.

De acuerdo con el análisis de severidad realizado en el área de estudio, el comportamiento del fuego y su intensidad fueron similares tanto en la selva mediana subperennifolia como en la selva baja subperennifolia. Cabe destacar que la selva mediana subperennifolia es la vegetación dominante en la zona, lo que podría haber influido en las percepciones expresadas por los entrevistados.

A pesar de la sensibilidad de la selva al fuego, un primer incendio suele causar un daño menor o de baja severidad, ya que generalmente afecta solo la capa superficial. Después de la temporada de lluvias, la selva tiende a recuperarse si su régimen no está alterado. Sin embargo, cuando los incendios son recurrentes, el daño y la severidad aumentan, afectando el cambium y las raíces de las especies arbustivas y arbóreas. Estas observaciones se corroboraron en el campo, donde se

registró un escape de fuego en una zona destinada al cultivo de maíz. Aunque el fuego fue controlado en mayo de 2023, quemando únicamente especies herbáceas y arbustivas, al volver al lugar en enero de 2024, se observó que la vegetación había recuperado su forma, borrando las huellas del incendio. Por otro lado, los incendios intensos o de alta severidad, según el análisis, suelen estar relacionados con actividades de cambio de uso de suelo.

Los entrevistados señalaron que, cuando una selva se quema por primera vez, generalmente no se implementan actividades de restauración, ya que la vegetación tiene la capacidad de recuperarse por sí sola. Sin embargo, es crucial realizar un monitoreo constante, ya que las quemas suelen estar asociadas a actividades agropecuarias y a la expansión de asentamientos, como se observó en la localidad conocida como Lic. Andrés Manuel López Obrador. Además, algunos ven los incendios como una oportunidad para obtener ingresos, ya que son contratados para apoyar en las brigadas de combate de incendios. Sin incendios, estas oportunidades laborales desaparecen.

Otra variable que, según las autoridades, influye en la severidad de los incendios en la selva es la intervención de factores cíclicos, como la cantidad de lluvia, que aumenta el material combustible, y las sequías, que predisponen la vegetación a incendiarse más fácilmente.

Mencionan que actualmente no existe un estudio de la sensibilidad de las selvas a los incendios y eso también dificulta que especies utilizar que permita la recuperación de especies nativas en lugares donde hubo incendios que afectaron la selva con cierto grado de severidad. Poder contar con una caracterización de la severidad sería importante mencionaron los entrevistados.

Sus recomendaciones para un futuro es que se identifique el tipo de selva y su altura debido a que a veces identificar incendios que avanzan por la cobertura del dosel suele ser difícil al no permitir identificar el frente del incendio y su avance. Lo que

significa que el tamaño de la selva y su fenología influye en la identificación y afectación debido a que en selvas altas y medianas el incendio no se propaga rápidamente debido a la sombra y humedad que son condiciones que no lo favorecen a diferencia de las selvas bajas caducifolias.

Evaluar la severidad es importante debido a que es un tema que se desconoce cómo está afectando el ciclo de las selvas, además, porque daría la iniciativa a las actividades que se tendrían que llevar a cabo para la restauración de selvas afectadas por el fuego. Debido al cambio climático es imposible que no se intervenga en los ecosistemas, por la influencia que tiene la actividad humana en ellos. Otra de las propuestas sería la quema de material combustible superficial para evitar su acumulación, aprender a usar el fuego, en beneficio del ecosistema para evitar incendios catastróficos en áreas que tengan una importante acumulación de material combustible.

Es importante mencionar que algo que hace que el manejo del fuego no tenga una continuidad y crecimiento entre actores federales, estatales y municipales son la rotación de personal debido a los cambios de gobierno que influyen en la estructura de las dependencias de gobierno, en este caso la CONAFOR y los niveles de gobierno. Sin embargo, esto también suele suceder en las organizaciones no gubernamentales, en los 10 años que lleva el programa del manejo del fuego se ha visto la rotación de personal de las dependencias gubernamentales. Asegurar que los programas y estrategias para el uso del fuego dependen del compromiso y seguimiento de las acciones que llevan a cabo instituciones gubernamentales y no gubernamentales con los actores locales.

IV.1.2 Entrevistas con actores estatales y municipales

Las entrevistas a los combatientes de incendios se realizaron los días 6 y 7 de junio de 2022. Se entrevistó al campamento de guardia en la promotoría de Desarrollo Forestal del estado de Campeche y al campamento del municipio de Escárcega (**Figura 39**).



Figura 39. Entrevista con los brigadistas de Campeche y Escárcega.

Como se muestra en la **Figura 40**, el campamento de Escárcega es el más próximo al área en estudio y el campamento que se ubica en la ciudad de Campeche es el más alejado pero ubicado en un punto estratégico que le permite dirigirse al resto de los municipios del estado para apoyar en las labores de combate de incendios.

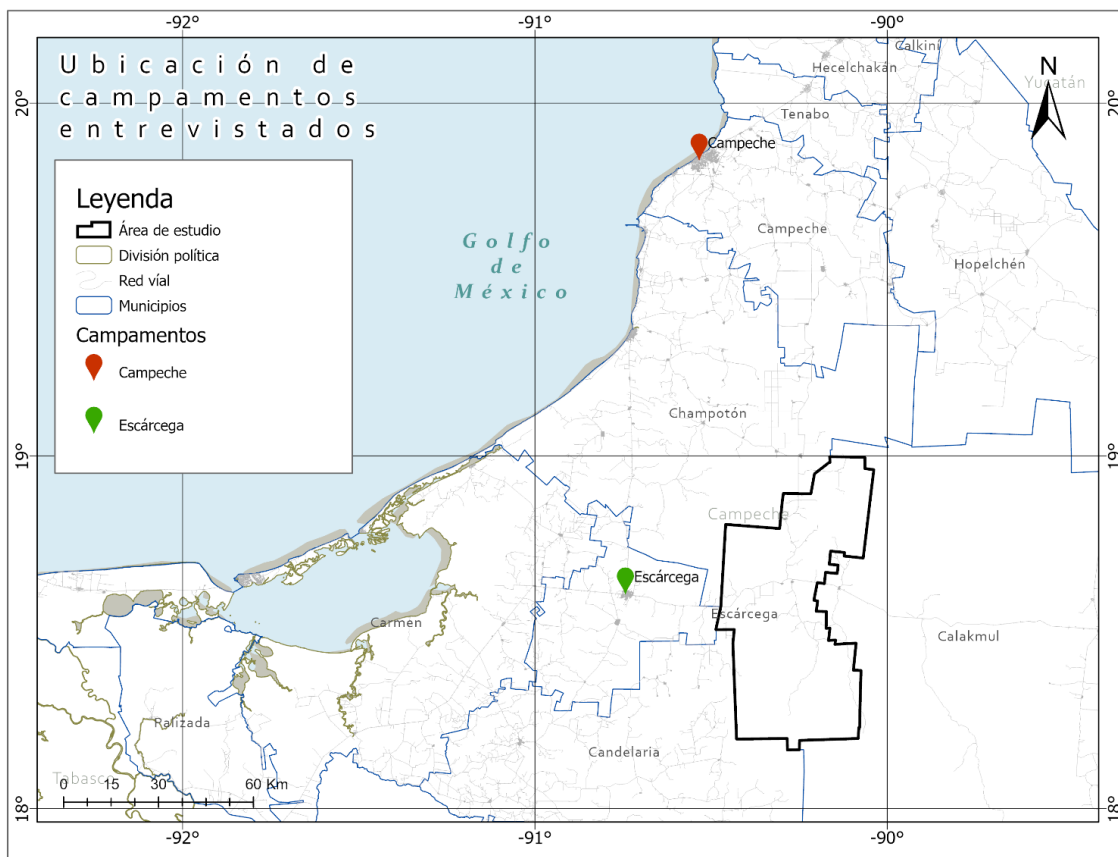


Figura 40. Campamentos entrevistados.

La entrevista se aplicó a 8 brigadistas de 20 que se encontraban ahí y para la promotoría de Escárcega a un brigadista de nueve que la conforman. Actualmente existe un total de 5 campamentos de los cuales dos son permanentes (Campeche y Escárcega) y tres son temporales (Pablo García, El Desengaño y Calakmul). Los combatientes tenían en promedio una experiencia de 10 años, entre los cuales el más experimentando tenía un total de 22 años y el menor tiempo tres meses. Es importante mencionar que entre los combatientes entrevistados se encontraba una mujer, la cual tenía un año en la brigada de Campeche. Los brigadistas más experimentados mencionaron que han tenido experiencia combatiendo incendios en estados como Guerrero, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Quintana Roo, Tabasco, y sólo uno de ellos ha participado como brigadista internacional en Canadá.

El primer tema abordado en la entrevista fue la historia de incendios, comenzó con los municipios que más se queman en Campeche, a lo que los combatientes respondieron que son Hopolchén, Candelaria, Escárcega y Calakmul. Con lo que se confirma la participación de los brigadistas en el área en estudio. Se les cuestionó su participación en la atención a incendios en la región oriental de Escárcega, Campeche, a lo que su respuesta fue una confirmación. Se les mostró un mapa en el cual los combatientes identificaron los núcleos agrarios en los que han combatido incendios (**Figura 41**).



Figura 41. Revisión de cartografía para la ubicación de los ejidos donde se atendió incendios por parte de las brigadas.

Estos fueron Chan Laguna, Constitución, El Lechugal, Laguna Grande, La Libertad, Lic. Benito Juárez, N.C.P.A Justicia Social, Silvituc y Xbonil. Aunque solo indicaron incendios en 9 de los 19 ejidos es importante mencionar que hay incendios de los cuales no se percatan, o no son solicitados para combatirlos debido a que las brigadas comunitarias o los mismos ejidatarios suelen hacerse cargo y debido a eso tampoco se genera un registro del incendio y las causas que lo originaron por temor a las sanciones que hay por las quemas de áreas forestales de acuerdo con la NORMA-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007. Otro dato importante es que los ejidatarios en la pandemia de COVID-19 (2020), no permitían entrar a los combatientes o no se les informaba para apoyar las labores de incendios debido al miedo de contagios y la mortalidad del virus (**Figura 42**).

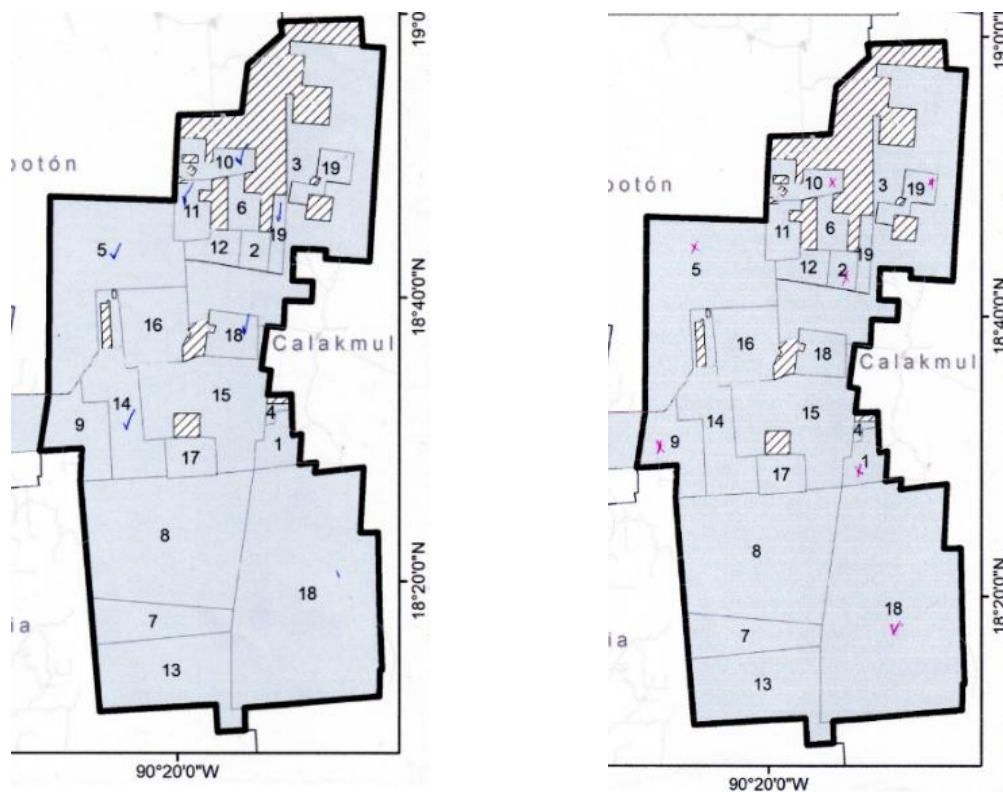


Figura 42. Ejidos con atención a incendios por parte de las brigadas, en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Según el análisis realizado, se ha constatado que las brigadas han intervenido en incendios en 10 de los 19 ejidos que se encuentran en el área de estudio (**Figura 43**). Se les preguntó por el número de incendios que llegan a atender en un año y cuál es la temporada de incendios para el estado. Ellos respondieron que anteriormente llegaban a atender de 5 a 7 incendios, pero que actualmente el número ha disminuido de 1 o 2 incendios. La disminución de los incendios se ha debido principalmente al programa gubernamental de “Sembrando Vida”, el cual a los dueños de tierras ejidales se les prohíbe hacer uso del fuego.

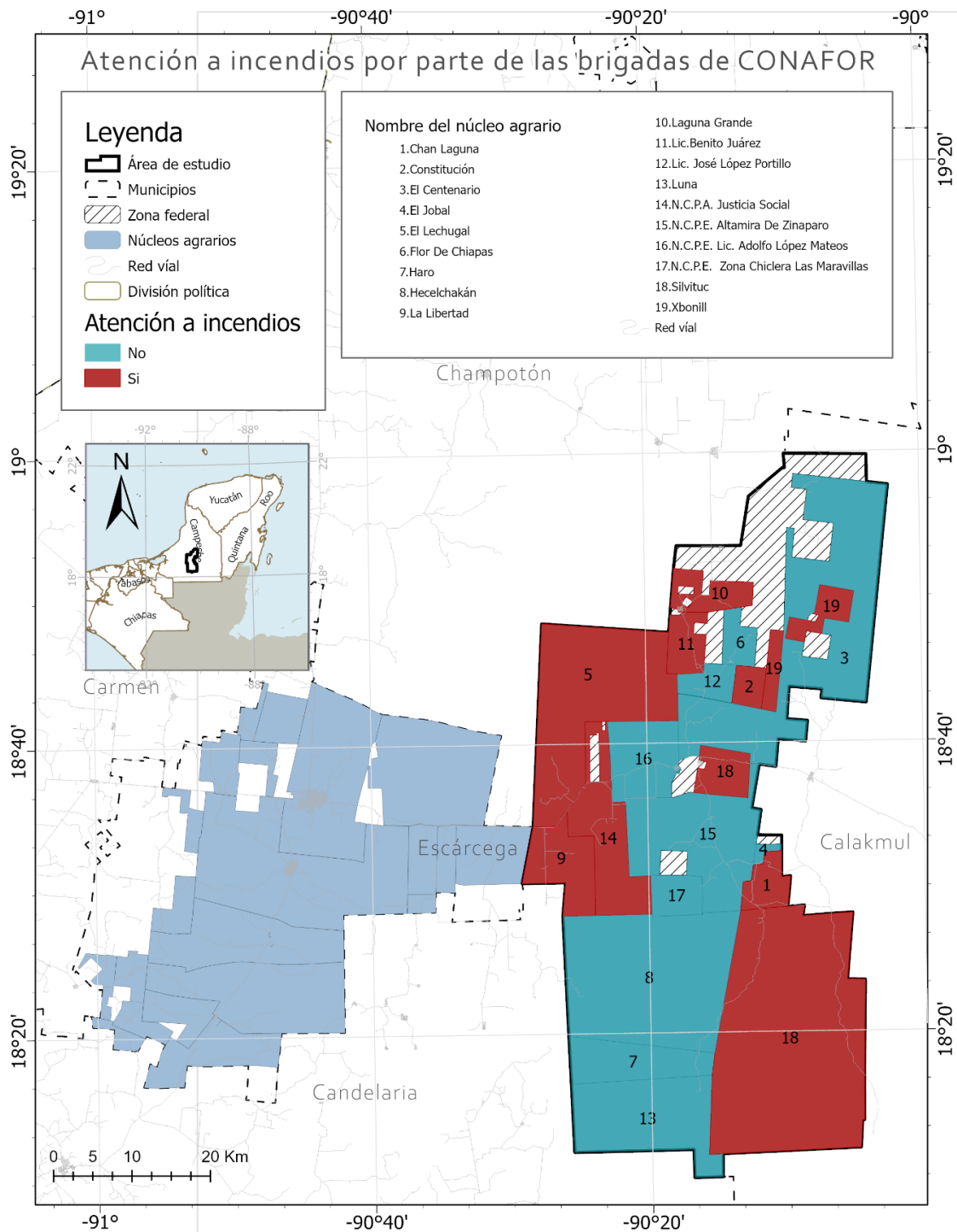


Figura 43. Atención a incendios por parte de CONAFOR las brigadas de Campeche y Escárcega.

La temporada de incendios forestales en Campeche inicia el 15 enero y termina el 30 de junio, sin embargo, los meses críticos en los que se han atendido incendios son marzo, abril y mayo. Y los años en los que se confirmaron incendios para el área de estudio han sido 2013, 2015, 2017 y 2019, siendo el año 2013 el más emblemático, porque los incendios requirieron de apoyo del ejército, ejidatarios y brigadistas de diversas entidades para liquidarlos. Los incendios de 2019 se relacionaron también con el programa Sembrando Vida, pero de manera contrario a lo observado en años posteriores, ya que al principio cuando se introdujo el programa las personas que querían beneficiarse como requisito debían de contar con 2.5 ha por lo que comenzaron a limpiar y preparar su superficie, haciendo uso del fuego.

Los brigadistas comentaron que no solo se dedican a realizar actividades de combate de incendios, ellos realizan extensionismo para el manejo y uso del fuego en los núcleos agrarios. Para apoyarse en estas actividades comparten información mediante folletos y carteles, así como actualmente el uso de redes sociales (**Figura 44**). Antes de los incendios o posterior a la temporada, los brigadistas realizan actividades como levantamiento o rehabilitación de brechas cortafuego en áreas forestales. Sin embargo, ellos mencionan que a pesar de los cursos de concientización muchos ejidatarios no siguen las recomendaciones (no hacen brechas y no avisan), debido a que ellos se basan en su conocimiento tradicional, como en las cabañuelas que son métodos tradicionales de la predicción de la meteorología. Tampoco utilizan el calendario de quemas establecido por el estado, lo que según los entrevistados provoca que el fuego se escape y queme la selva.

Según Monzón-Alvarado et al. (2014), la variabilidad climática afecta tanto la severidad como la frecuencia de los incendios, lo que complica la planificación y aplicación de regulaciones. Esto incluye la efectividad de herramientas como el calendario de quemas para la prevención de incendios en áreas como Calakmul.

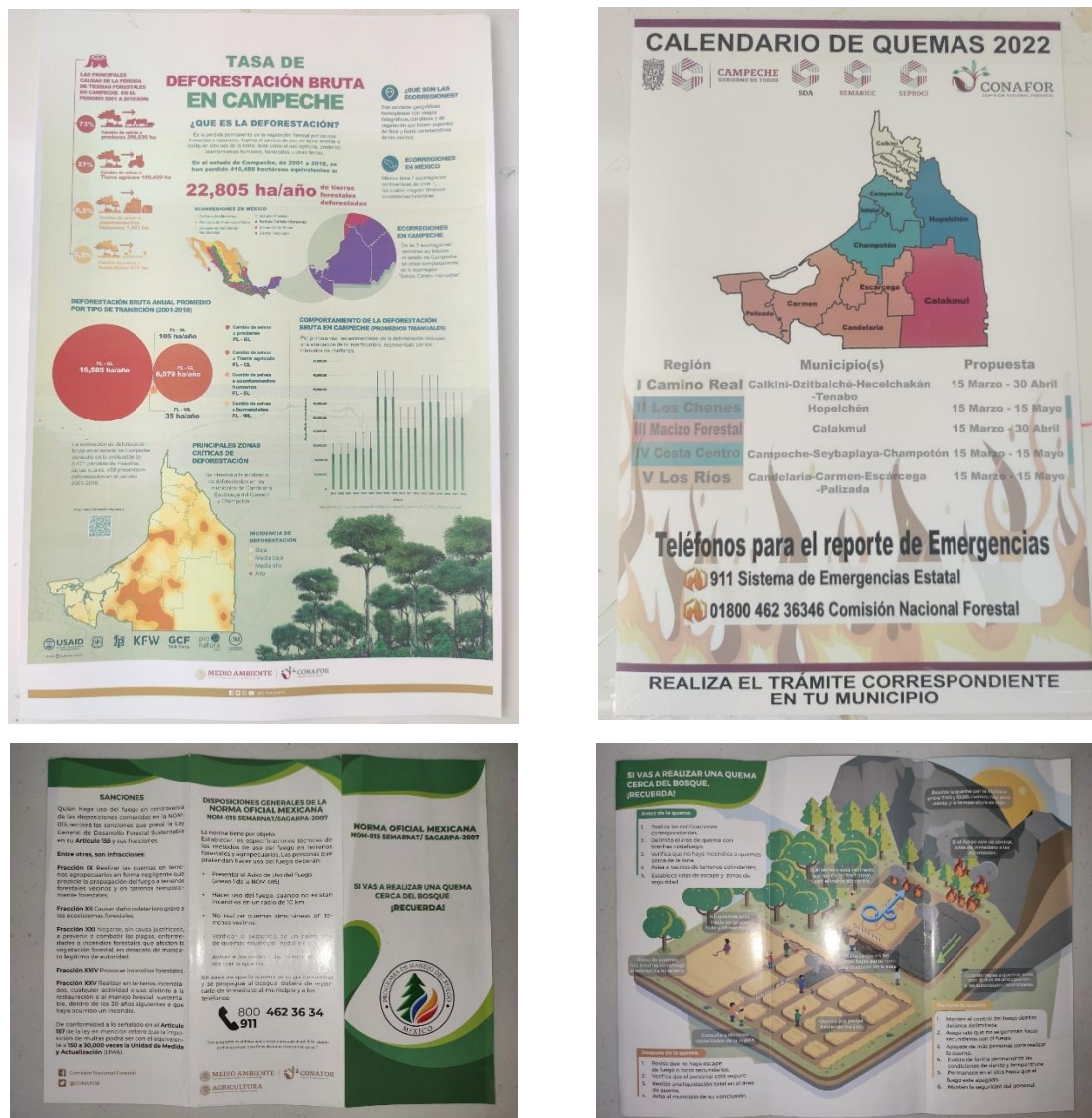


Figura 44. Carteles y folletos sobre el manejo del fuego en CONAFOR, Campeche.

Se les cuestionó, ¿cuál es la principal causa de los incendios en la vegetación de selva?, siendo su respuesta la cacería furtiva y el uso del fuego agropecuario. El problema de la cacería surge porque muchas personas recurren a la caza de subsistencia debido a la falta de alternativas proteicas. La baja o nula productividad de ganado doméstico en los bosques tropicales se debe a los elevados riesgos y costos de inversión, el escaso poder adquisitivo de los habitantes, el clima tropical y las enfermedades asociadas. Estos factores impiden que la cría extensiva de ganado sea viable. Además, existen quienes cazan con fines comerciales, aprovechando un mercado que demanda estos productos. Los habitantes suelen

utilizar el fuego para quemar áreas que permitan el recrecimiento de vegetación que atrae a los animales para alimentarse y ahí aprovechar para poder cazarlos.

En el caso del uso del fuego agropecuario es principalmente por no seguir las indicaciones del manejo del fuego (**Tabla 18**) que se comparte a través de las campañas de extensionismo y el calendario de quema que establece el gobierno de Campeche para las regiones y municipios.

Tabla 18. Actividades para el manejo del fuego en quemas agropecuarias.

No.	Antes de la quema	Durante la quema	Después de la quema
1	Realizar las notificaciones correspondientes	Mantén el control del fuego dentro del área delimitada	Revisa que no haya escape de fuego o focos secundarios
2	Delimitar el área de quema con brechas cortafuego	Asegúrate que no se generen focos secundarios con el fuego	Verifica que el personal está seguro
3	Verificar que no haya incendios o quemas cerca de la zona	Apóyate de más personas para realizar la quema	Realiza una liquidación total en el área de quema
4	Avisa a vecinos de terrenos colindantes	Evalúa de forma permanente las condiciones de viento y temperatura	Avisa al municipio de su conclusión
5	Establecer rutas de escape y zonas de seguridad	Permanece en el sitio hasta que el fuego esté apagado	
6		Mantén la seguridad del personal	

Los brigadistas argumentan que los incendios forestales se distribuyen principalmente en la vegetación de selva. Ellos distinguen tres tipos de selvas las cuales son la selva baja, la selva mediana y la selva alta a la que le conocen como montaña (vegetación muy cerrada) y donde si pudieran llegar los incendios estos se complican, por el material combustible disponible que almacena, sin embargo, la cobertura de su dosel y la humedad que mantienen ayuda a evitar que el incendio se propague rápidamente, permitiendo a los combatientes realizar sus medidas de combate. La selva alta es un tipo de vegetación con distribución muy limitada, habiendo mayor distribución de selva mediana en Campeche y en el área en estudio. De acuerdo con los llamados de alerta de incendios, la selva mediana es

donde más ha requerido a los combatientes. En este tipo de vegetación las llamas de los incendios llegan a alcanzar 1.5 m de alto.

En cuanto al tema de la severidad, los combatientes han atendido incendios en la selva donde se ha quemado una vez, dos y hasta tres veces en diferentes años. Los factores que determinan la severidad, son el combustible, el tiempo que dura el incendio, la topografía y el clima. La selva que ha sido afectada por incendios recurrentes se nota por el tamaño de las especies arbóreas (altura, diámetro, circunferencia), la ausencia de especies arbóreas, así como la presencia de estratos en donde dominan las herbáceas y las arbustivas. Esto afecta la flora y la fauna (jaguar, loro, venado, pantera, pavo, armadillo, monos entre otros), se van extinguiendo. Ellos mencionan que antes se veían caobas con circunferencias, diámetros muy grandes y alturas de hasta 20 metros. No se regeneran al 100%, en áreas con recurrencia de incendios las especies tienen 10 o 20 años y no crecen. El incendio pudiera afectar también al suelo y los nutrientes para las plantas. Las maderas tropicales son sensibles al fuego, inclusive la candela¹ llega a afectar a todos los árboles. Las especies más sensibles son el cedro (*Cedrela odorata*), caoba (*Swietenia macrophylla*), zapote (*Manilkara zapota*), chakté (*Coulteria mollis*), pukté (*Terminalia buceras*), granadillo (*Platymiscium yucatanum*), Chaká (*Bursera simaruba*), Jabín (*Piscidia piscipula*), Chechén (*Metopium brownei*), Cantemó (*Albizia niopoides*) y Ceibas (*Ceiba pentandra* y *Ceiba schottii*) si los incendios se vuelven recurrentes, la selva ya no se regenera, se vuelve acahual donde la diversidad se ve afectada. Los árboles se suelen incendiar y se tienen que remover para evitar que se siga propagando el incendio.

Los tipos de incendios en la selva principalmente son superficiales, pero también han visto incendios subterráneos y aéreos (más difícil que se dé, ocurre sobre todo cuando hay presencia de palma de guano (*Sabal sp.*)).

Los incendios más comunes se dan en la selva mediana, posteriormente en la selva baja y muy difícilmente en la selva alta. Los incendios llegan a afectar el estrato

¹ Lumbre o fuego con que se quema alguna cosa

herbáceo, el arbustivo (helechos y bejucos) y por último el arbóreo. No crece la misma vegetación debido a que no se tiene la conciencia de reforestar. Todas las especies son sensibles al fuego, llega a arrasarse cuando tiene mucha intensidad el fuego y se origina por las toneladas de combustible que pueda haber en la zona y también por la sequía. Las lluvias influyen en la temporada de incendios, si estas se adelantan benefician las labores de liquidación.

Las personas que antes realizaban quemas ahora cuentan con el apoyo del programa Sembrando Vida. Aunque pueden seguir utilizando el fuego conforme a lo establecido por la Norma, muchos han optado por dejar de quemar. El programa establece restricciones sobre las quemas, y si se realizan, deben seguirse las recomendaciones de la Norma. Las actividades mecanizadas, como el uso de tractores, resultan costosas, por lo que el fuego se convierte en la alternativa más barata, aunque también la más riesgosa. Aquellos que no tienen acceso a programas de apoyo suelen recurrir al fuego para realizar desmontes ilegales, caza o producción de carbón. La comunidad menonita ha tenido un impacto significativo al quemar grandes extensiones de selva sin enfrentar consecuencias legales. Desde su llegada en 1965, han realizado numerosos desmontes.

Cuando un incendio se da por primera vez en la selva no es severo, pero cuando se ha quemado constantemente la severidad aumenta. Los incendios recurrentes se van extendiendo cada vez más, lo cual generalmente es por la cacería y para tomar terrenos ilegalmente para la comercialización de carbón.

Para que una selva pueda regenerarse sin haber nuevos incendios podría ser entre 10 años mínimo para que haya especies arbóreas, pero para que recupere las mismas condiciones antes del incendio pudiera ser de 50 años. El problema de los incendios es que las semillas se pierden con el incendio y no vuelven a crecer las mismas especies. La reforestación podría ser una alternativa para poder lograr que se regenere en menor tiempo la selva, así como dejar el uso del fuego.

La brigada de CONAFOR del estado de Campeche, está conformada por 29 brigadistas, los cuales no son suficientes para poder atender todos los incendios debido a que se dan incendios simultáneos, es difícil y de mucho trabajo.

Los brigadistas de CONAFOR mencionan los beneficios que ellos obtienen de la selva son el oxígeno, cultivo (maíz y caña), la miel, lluvia (agua), fauna (cacería, pavo, venado, tepezcuintle, puerco de monte, entre otros), plantas medicinales (uña de gato, chechén, chakah). Ellos mencionan que han disminuido los servicios ambientales y los beneficios para cuidarlos. Los beneficios ambientales como plantas medicinales o animales se alejan y ya no es fácil encontrarlos o tenerlos cerca. La producción de la miel se ha reducido, la floración se reduce por pérdida de especies como consecuencia de los incendios.

Por último, los brigadistas mencionan que las labores que ayudarían a cuidar la selva es concientizar a las personas para hacer las cosas bien, reforestar, pero hacer estudios sobre las especies que se podrían desarrollar en cada tipo de suelo, cuidar o darles seguimiento a las áreas afectadas por incendios y las personas que aprovechan árboles, reforestar cinco por uno que aprovechan. Ha habido programas pilotos en donde han tirado desde avión semillas en zonas quemadas, pero no tuvo éxito, para ello mencionan que es necesario conocer el área afectada y desarrollar las estrategias que esta requiere por consecuencia de cada incendio. Se necesitan también incentivos para las personas y el campo agrícola que permitan a las personas subsistir y cuidar la selva sin tener que dedicarse al carbón vegetal o vender sus parcelas.

IV.1.3 Entrevistas con actores locales

Las entrevistas semiestructuradas a actores locales se realizaron del día 8 al 11 de junio de 2022 en la región oriental de Escárcega Campeche, a un total de 26 ejidatarios y comisarios distribuidos en los núcleos agrarios de Justicia Social, Adolfo López Mateo, Silvituc, Constitución, Xbonil, El Lechugal, El Centenario, Laguna grande y Benito Juárez en el área de estudio. Las entrevistas consideraron tres temas importantes, historia de incendios, severidad y beneficios de la selva.

En la **Figura 45** se muestra la ubicación espacial de los núcleos agrarios donde se realizaron las entrevistas a los actores locales.

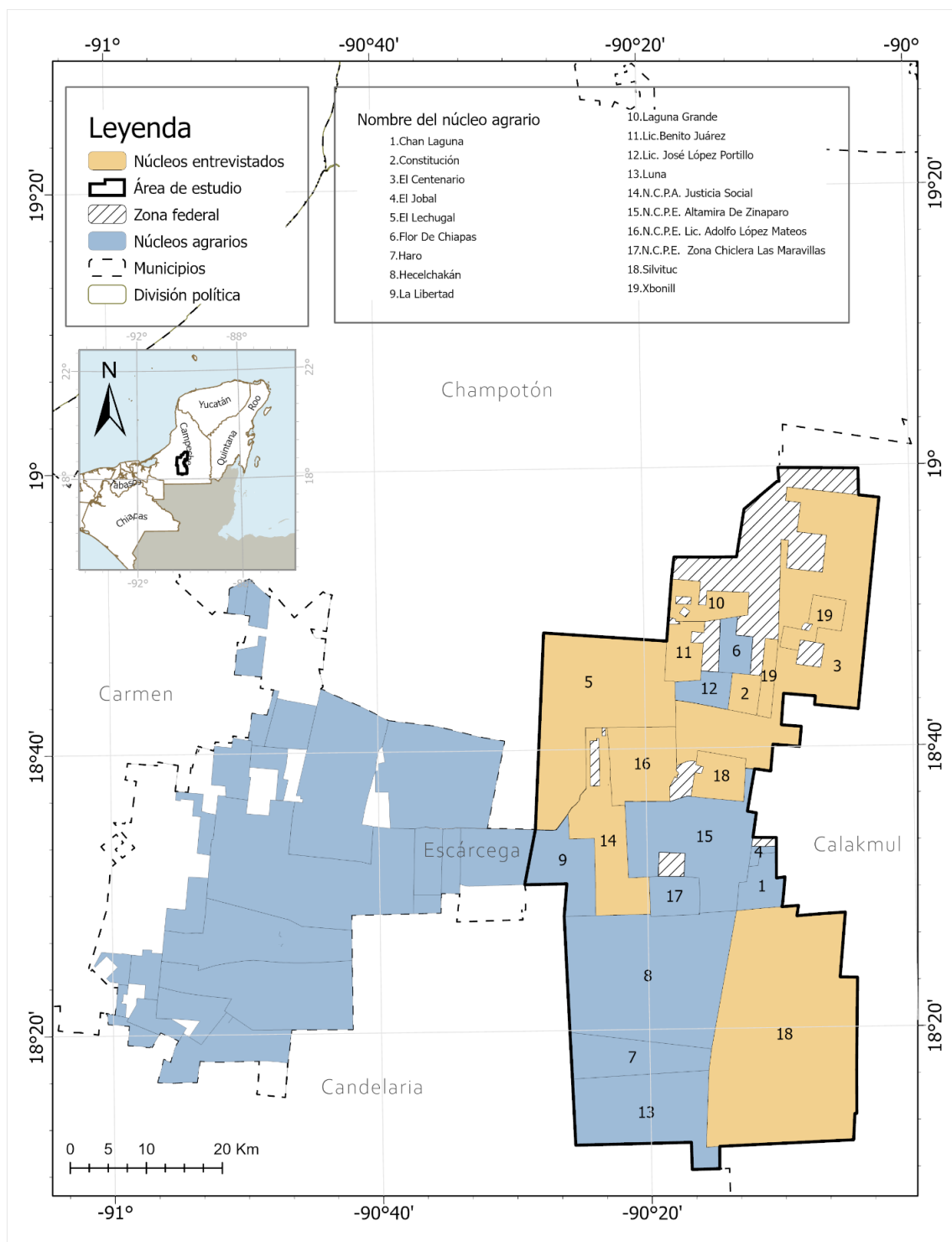


Figura 45. Núcleos agrarios entrevistados.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2018.

En relación con la historia de incendios los ejidatarios mencionaron que utilizan el fuego para sus actividades agropecuarias. Además, confirmaron que han tenido escapes de fuego en algún momento que han afectado la vegetación de selva que se distribuye en los núcleos agrarios. Se preguntó si en el periodo de estudio (2013-2022) ha habido algún incendio que afectara la selva, siete confirmaron que sí, pero en Xbonil y Constitución indicaron que su selva no se ha quemado, realizan mantenimiento de brechas y son cuidadosos con el uso del fuego. También explicaron que al estar cerca de un campamento de combatientes de incendios (Pablo García), los brigadistas pueden llegar rápidamente y apoyar en las labores, para evitar que el fuego se propague de sus terrenos agropecuarios a la selva (**Figura 46**). De acuerdo con datos de la CONAFOR en el estado de Campeche hay un total de cuatro campamentos siendo los más cercanos al área en estudio Pablo García y Escárcega.

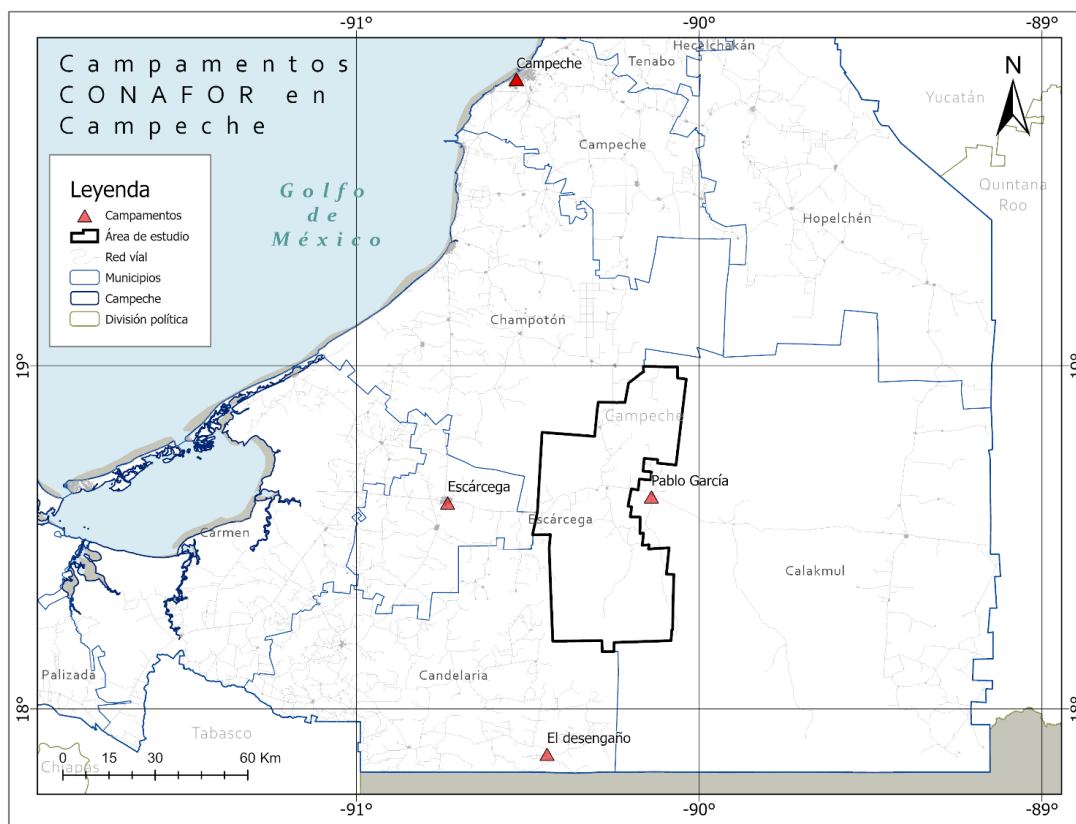


Figura 46. Campamentos de CONAFOR en Campeche.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAFOR e INEGI, 2022.

En los siete ejidos que se ha propagado el fuego en el periodo en estudio han sido principalmente los años 2013, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Ellos recuerdan años anteriores como incendios catastróficos por la extensión de selva quemada en los años 1993, 2011 y 2013 en donde tuvo que intervenir el ejército mexicano, la CONAFOR y los habitantes de los propios ejidos para poder liquidar los incendios. Se les cuestionó qué cuál es la causa de que el fuego queme la selva, a lo que se obtuvo como respuesta la cacería furtiva en donde el fuego es utilizado para quemar propiciando dos situaciones, poder hacer salir a las presas por el pánico del incendio en la vegetación y hacer que brote vegetación herbácea (pasto) para atraerlas mientras ellos preparan la emboscada. Al no haber una ley, reglamento o norma del uso del fuego para cacería, realizar esta práctica resulta ilegal debido a que no se tiene un manejo del fuego, lo que ocasiona que del área quemada el fuego se propague sin control y ocasione un incendio en la selva afectando grandes extensiones sin control. A largo plazo la cacería y por consecuencia el escape del fuego a la selva estaría ocasionando el “síndrome de bosque vacío” provocando cambios en la dinámica y estructura de la vegetación debido a la pérdida de especies dispersoras de semillas y controladoras de vegetación (Pérez Rodríguez et al., 2018).

La segunda causa que ocasiona que el fuego se escape a la selva son las actividades agropecuarias. Los ejidatarios atribuyen los incendios principalmente a que no se realizan las acciones que propone la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, principalmente el levantamiento de brechas corta fuego para impedir que el fuego se escape a los alrededores donde se utiliza. Es importante indicar que estos escapes de fuego no se atribuyen estrictamente a los habitantes del ejido, el escape de fuego puede venir de ejidos vecinos. En la **Figura 47** podemos observar una parcela en la que se usó el fuego para limpiar el área, para esto se realizaron brechas que impidieron que el fuego se escapara. Las brechas de la imagen tienen en promedio una separación de 2.5 m con las parcelas colindantes, que fueron suficientes para contener la quema en la parcela.



Figura 47. Uso de brechas cortafuego en el núcleo agrario El Centenario obtenidas con RPAS.

Los ejidatarios comentaron que otra causa es que otros compañeros o vecinos colindantes no utilizan el calendario de quemas que el estado de Campeche propone para cada año, región, municipios y la propuesta de fechas para que realicen sus quemas (**Figura 48**). Con ese calendario deben de realizar el trámite

“aviso de quema” correspondiente al municipio para el área de quemado y así estar al pendiente de la quema en caso de que el fuego se escape a parcelas colindantes o a la selva.



Figura 48. Calendario de quemas para Campeche 2022.

Sin embargo, algunos ejidatarios han argumentado que a pesar de seguir las indicaciones de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 y el calendario de quema, el fuego se llega a salir de control, esto debido a condiciones climáticas adversas en las que mencionan la sequía y vientos fuertes como factores detonantes que hacen que las quemas se salgan de control a pesar de que realicen las actividades correspondientes a la Norma y las notificaciones. En la **Figura 49** podemos ver que en un terreno colindante dentro del área en estudio se realizó una quema en una parcela y a pesar de que dicho terreno cuenta con las brechas, el fuego se escapó y afectó la vegetación de otra parcela. Como se muestra las especies arbóreas que fueron afectadas por el incendio murieron, por lo que se corrobora la sensibilidad de las especies de selva al fuego.

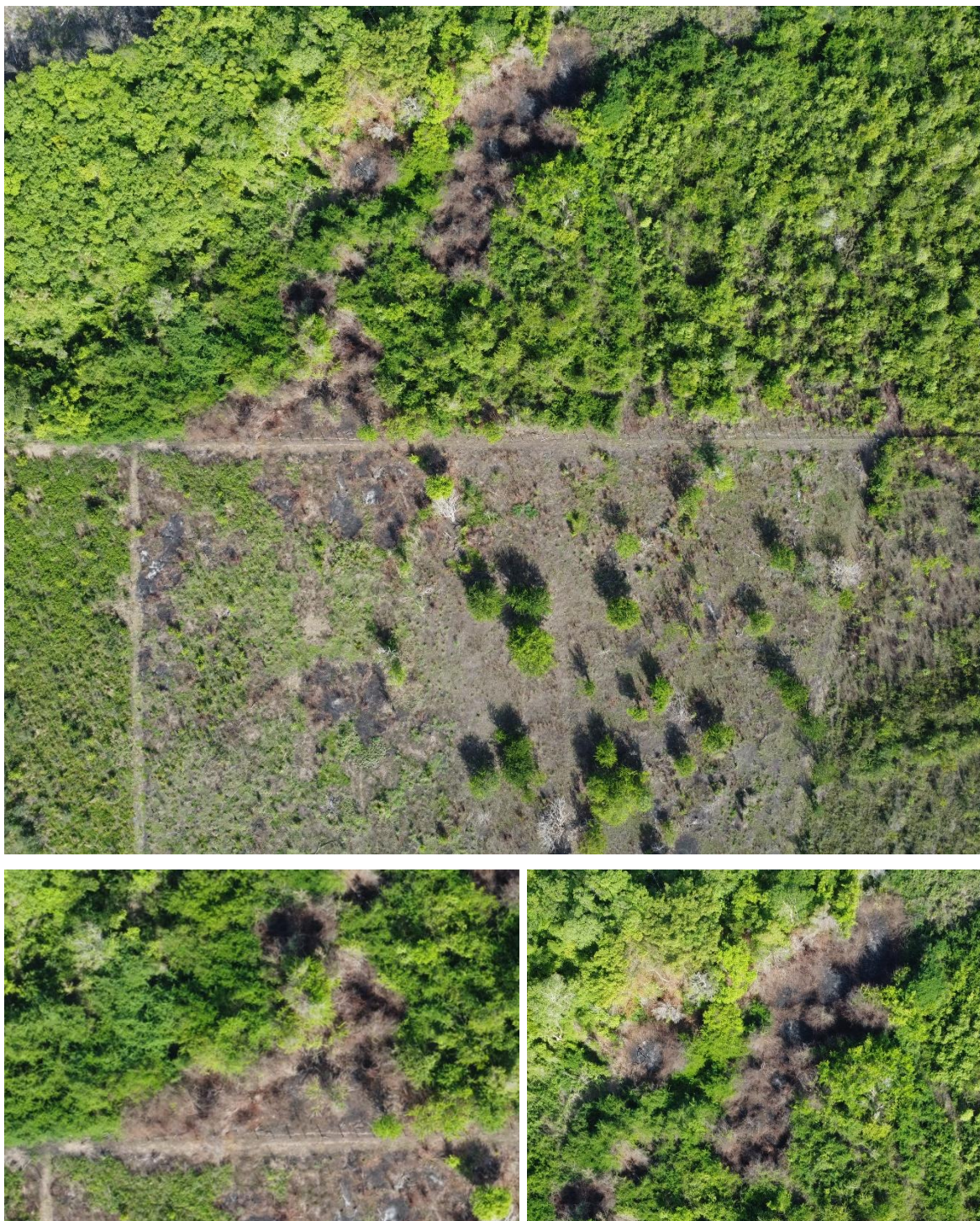


Figura 49. Escape del fuego entre parcelas.

Durante el trabajo de campo realizado del 21 al 27 de mayo de 2023 se corroboró el uso de fuego en terrenos agropecuarios dentro del área en estudio. En las

fotografías aéreas capturadas con el RPAS, se observó como medida preventiva la delimitación del área a quemar, el uso de brechas cortafuego (**Figura 50**).



Figura 50. Uso de fuego para la limpia de terrenos agropecuarios con la implementación de brechas cortafuego.

Sin embargo, también se identificaron quemaduras en las que no se realizaron medidas preventivas como la implementación de brechas y el fuego se escapó, afectando la vegetación de selva colindante (**Figura 51**).



Figura 51. Escapes de fuego en áreas de aprovechamiento agropecuario.

El tema de la severidad o gravedad de los incendios comenzó con la pregunta ¿Cómo afecta el fuego a la selva? Los ejidatarios respondieron que cuando el fuego entra por primera vez sólo se quema la materia orgánica superficial (hojarasca y troncos en estado de descomposición), pero cuando una selva se ha quemado recurrentemente la vegetación se deteriora “deja a los árboles heridos o sufriendo” e inclusive mata a los árboles. Esto ocasiona que la selva se transforme en un

acahual. La recurrencia de los incendios hace que la selva se vaya deforestando y broten otros tipos de vegetación como herbáceas y plantas trepadoras (bejucos) que abonan material combustible haciendo que los nuevos incendios sean cada vez más severos matando un mayor número de plantas. Y una vez que la selva se quemó, de acuerdo con los ejidatarios, tardaría alrededor de 8 a 15 años en que vuelvan a crecer las especies arbóreas, pero, para que estas puedan volver a tener un diámetro al de antes del incendio requeriría por lo menos que pasen de 50 a 100 años para que la selva vuelva a su estado original.

Se les preguntó a los ejidatarios si creen que actualmente los incendios son más recurrentes y severos, a lo que mencionaron que han disminuido los incendios principalmente por el programa gubernamental Sembrando Vida el cual fue puesto en marcha a principios de enero de 2019 en la Península de Yucatán, en el cual a las personas que están inscritas se les prohíbe hacer uso del fuego para evitar ser sancionado o expulsado del programa, pero así mismo las personas que utilizan el fuego para limpiar sus terrenos deben de ser más cuidadosos con sus quemas para no perjudicar a las personas que se encuentran dentro de programa Sembrando Vida. De tal modo que las personas se benefician del apoyo económico del programa y de los productos que cosechan. Para corroborar si los incendios han disminuido por el programa Sembrando Vida, se sumó al análisis de puntos de calor del período en estudio (2013-2020) los años 2021 y 2022 (**Figura 52**), para identificar la tendencia posterior al periodo en estudio, con lo que se observa que después de 2019 si hubo una tendencia a la baja de los puntos de calor en la selva. Por consecuencia del programa Sembrando Vida, al hacer uso del fuego con el mayor cuidado y atención a las recomendaciones de la NORMA-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 que comparten los supervisores del programa. En 2022 se vuelve a notar un ligero incremento de los puntos de calor sin sobrepasar los años de 2013, 2016, 2019 y 2020 donde se ha registrado el mayor incremento de estos puntos de calor analizados.

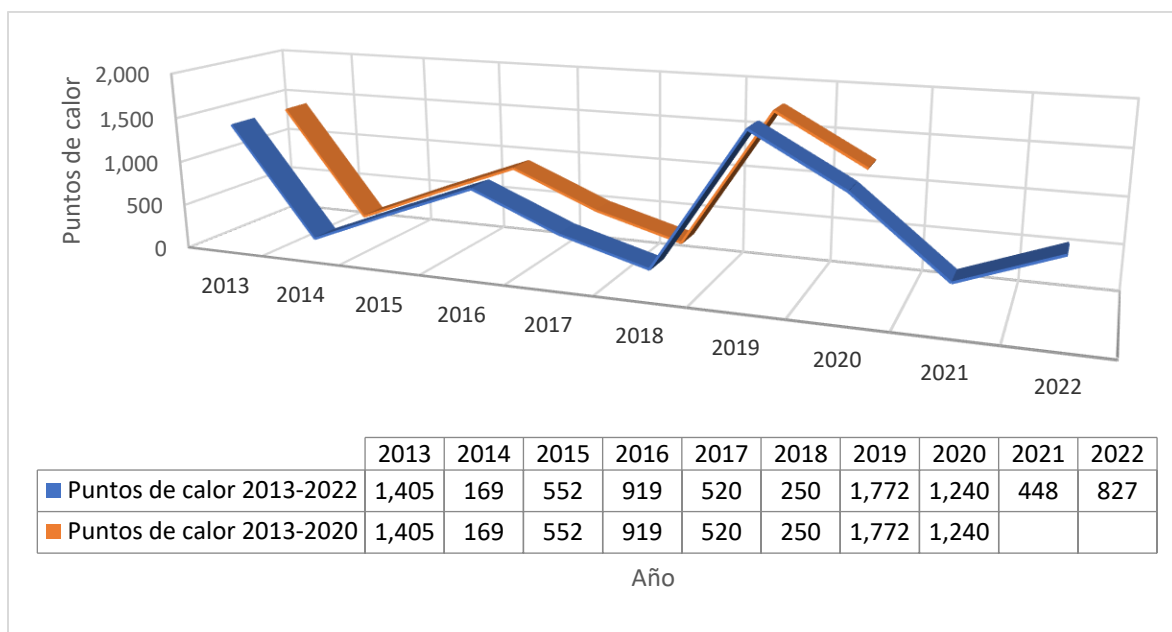


Figura 52. Puntos de calor 2013-2022.

Fuente: Elaboración propia con datos de FIRMS (2022).

Por último, entre los beneficios que obtienen los ejidatarios de la selva están la apicultura, el aprovechamiento de plantas medicinales, maderables que utilizan para construcción o para cocinar sus alimentos, así como la cacería de fauna para autoconsumo y el carbón vegetal. En ejidos como Silvituc y el Centenario también se benefician de la pesca debido a que se encuentran colindantes con la laguna de Silvituc (**Figura 53**), además de que algunos de ellos realizan actividades de acuicultura. Se les cuestionó si los beneficios que obtienen de la selva actualmente se han reducido o agotado por el uso del fuego, la mayoría respondió claramente que sí. Los incendios ocasionan que la producción de miel disminuya, por consecuencia de la pérdida de vegetación en floración o inclusive por la quema de las colonias de abejas. También la pérdida de ciertas especies arbóreas de las que se benefician ya sea medicinales o maderables. La pérdida de cobertura vegetal, en consecuencia, también ha ocasionado la ausencia de fauna que la consumía. Ellos asumen que otro efecto de la quema de la selva es la reducción del recurso hidrológico, como escasez de agua y el desfase de la temporada de lluvias. La mayoría de los actores locales se dedican a la agricultura de temporal por lo que la escasez de lluvias están afectando el modo de vida de las personas que no cuentan

con una fuente de agua cercana y que solo dependen de las precipitaciones para la producción de sus cultivos. Palabras de los actores locales es que *“las lluvias se han desfasado y que cada vez llueve menor cantidad, hace muchos años los terrenos se inundaban”*.

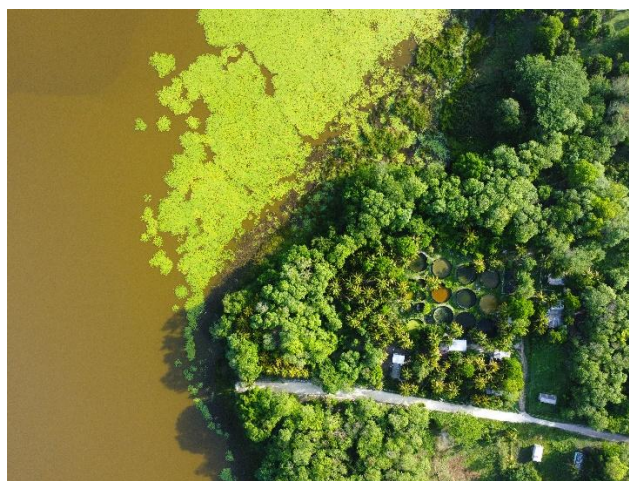


Figura 53. Laguna de Silvituc, Escárcega.

La selva es importante para los ejidatarios porque atrae al turismo y subsistir de actividades ecoturísticas, culturales y arqueológicas por visitantes extranjeros o nacionales. En el área en estudio se encuentran hoteles, comercio, restaurantes que brindan hermosos paisajes de la selva, además de tener la vía de comunicación que conecta con el área de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y al estado de Quintana Roo (**Figura 54**).



Figura 54. Beneficios culturales y ecoturísticos de la selva.

IV.1.4 Hallazgos de las entrevistas semiestructuradas

De acuerdo con las entrevistas realizadas a los actores federales, municipales y locales, así como los no gubernamentales, se presentan tres diagramas de flujo que compilan los resultados, con el porcentaje obtenido de las entrevistas semiestructuradas realizadas a los 39 actores durante el trabajo de campo llevado a cabo en el mes de mayo mediante la plataforma virtual de Google Meet y en campo en el mes de junio.

En el tema de la historia de incendios (**Figura 55**), participaron los cuatro tipos de actores considerados en esta investigación. Uno de los principales temas abordados fue el registro de incendios en el área y en el periodo comprendido entre 2013 y 2020, con un 95% de confirmación por parte de los actores.

Las causas de los incendios en la selva se atribuyen principalmente a la cacería furtiva (38%), las quemas agropecuarias (38%) y, en menor medida, al cambio de uso de suelo (24%). Los actores que mencionaron la cacería furtiva indicaron que esta es de subsistencia (77%) y para comercialización (33%). Utilizan el fuego para hacer crecer vegetación que atrae a los animales. En cuanto a las quemas agropecuarias, el escape del fuego suele ser provocado por los propios ejidatarios (41%) o por ejidos vecinos (59%). Esto se debe principalmente a la falta de respeto al calendario de quemas del estado, la falta de participación en las jornadas de concientización y el desconocimiento de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007.

Además de estas actividades, las personas están quemando la selva para apropiarse de nuevas áreas de aprovechamiento o para establecerse, lo que genera un cambio de uso de suelo, según el 24% de los entrevistados. Estos indicaron que los incendios en la selva son principalmente superficiales (90%). Sin embargo, también mencionaron que el número de incendios está disminuyendo (90%), gracias principalmente a la implementación del programa Sembrando Vida, presentado en el año 2018. El análisis de la distribución espacial y temporal de incendios mostró una disminución en las áreas quemadas entre 2019 y 2020. Esta

tendencia a la baja también se observó en el seguimiento de puntos de calor durante 2021 y 2022, en contraste con años anteriores, donde se registró un incremento en la cantidad de incendios.



Figura 55. Diagrama de flujo de historia de incendios del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

La información analizada sobre la severidad de los incendios (**Figura 56**), de acuerdo con los actores entrevistados, indica que está relacionada con la meteorología (18%), el tipo de vegetación (26%), el tipo de incendio (13%) y la recurrencia de incendios (44%). Este último fue el más mencionado, ya que la vegetación que se quema recurrentemente muestra una mayor mortandad de especies vegetales.

En cuanto a la meteorología, los entrevistados señalaron que la variable que más influye en la severidad es la sequía (38%) debido a la mayor disponibilidad de material combustible. Respecto al tipo de vegetación, la variable más influyente en la severidad sería el tipo de combustible (54%) que aporta cada tipo de selva. Las selvas caducifolias suelen proporcionar más material combustible que las selvas perennifolias, lo que puede aumentar la intensidad y, por tanto, la severidad del incendio.

En el área de estudio, los incendios superficiales (51%) son los más comunes, pero también los que han ocasionado mayor severidad, principalmente por su recurrencia. Una variable determinante en la severidad es la ubicación del incendio (62%), que está relacionada con el tiempo de aviso a la CONAFOR, el tipo de llegada de las brigadas y si se cuenta con apoyo de brigadas rurales comunitarias en caso de que el incendio no pueda ser contenido con el personal disponible.

Para garantizar la recuperación de las áreas afectadas con diferentes grados de severidad, el 69% de los entrevistados indicó que se requieren medidas de mitigación que consideren como primer paso la determinación de la afectación del incendio en el área, para decidir si se requiere reforestación y qué especies se deben utilizar para restaurar el área. Estas medidas de mitigación también deben incluir un seguimiento y vigilancia, ya que es común que se queme la selva por cambio de uso de suelo. En áreas propensas a recurrencia de incendios, se deberá habilitar guardarrayas o mantener las existentes.

Un estimado de los datos de recuperación de la selva indica que esta puede tardar en promedio 12 años en permitir el crecimiento de especies arbóreas. El 59% de los entrevistados concordaron en que actualmente los incendios están siendo más severos.



Figura 56. Diagrama de flujo de severidad de incendios del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

En cuanto a los beneficios de la selva, este apartado consideró únicamente a los actores locales (**Figura 57**), a quienes se les preguntó si los incendios en la selva han tenido una repercusión en los servicios ambientales que obtienen. Se les explicó sobre los servicios ambientales tangibles e intangibles para que pudieran compartir su conocimiento e interpretación.

En el caso de los servicios ambientales intangibles, mencionaron al aire (23%) como un beneficio crucial que provee la vegetación, ya que les brinda oxígeno. Además, destacaron los servicios culturales (77%), que representan el turismo ecoturístico, arqueológico y cultural. Mantener y cuidar la selva es vital para atraer turismo nacional y extranjero, beneficiando así a la comunidad.

En cuanto a los servicios tangibles, mencionaron al agua (58%) como el más importante, aprovechando los cuerpos de agua como la Laguna de Silvituc para pescar y la lluvia para sus cultivos de temporal. También se benefician de la vegetación de la selva de diversas formas, como en el uso medicinal, la construcción de potreros o casas y para el consumo. Además, aprovechan la cacería para subsistencia y comercialización, así como la apicultura para la venta de miel.

Todos los actores locales coinciden en que los incendios en la selva están causando la disminución y pérdida de los servicios ambientales. Las principales problemáticas a las que se enfrentan son las sequías (12%), la disminución de las lluvias (27%), la reducción de la producción de miel (23%) y el alejamiento de la fauna (12%). Estas consecuencias han derivado en problemas sociales como el uso de la selva para la producción de carbón vegetal (38%), el abandono de actividades agropecuarias (19%), la venta de terrenos (19%) y la migración de jóvenes debido a la falta de oportunidades laborales (19%).

Los actores locales requieren de apoyos gubernamentales que les permitan conservar la selva y sus servicios ambientales. Actualmente, las personas cuentan

con programas como Sembrando Vida (62%), apoyos para el campo (15%) y, en algunos casos, pago por servicios ambientales (23%). Sin embargo, no se han abierto más convocatorias para participar en estos programas sociales.

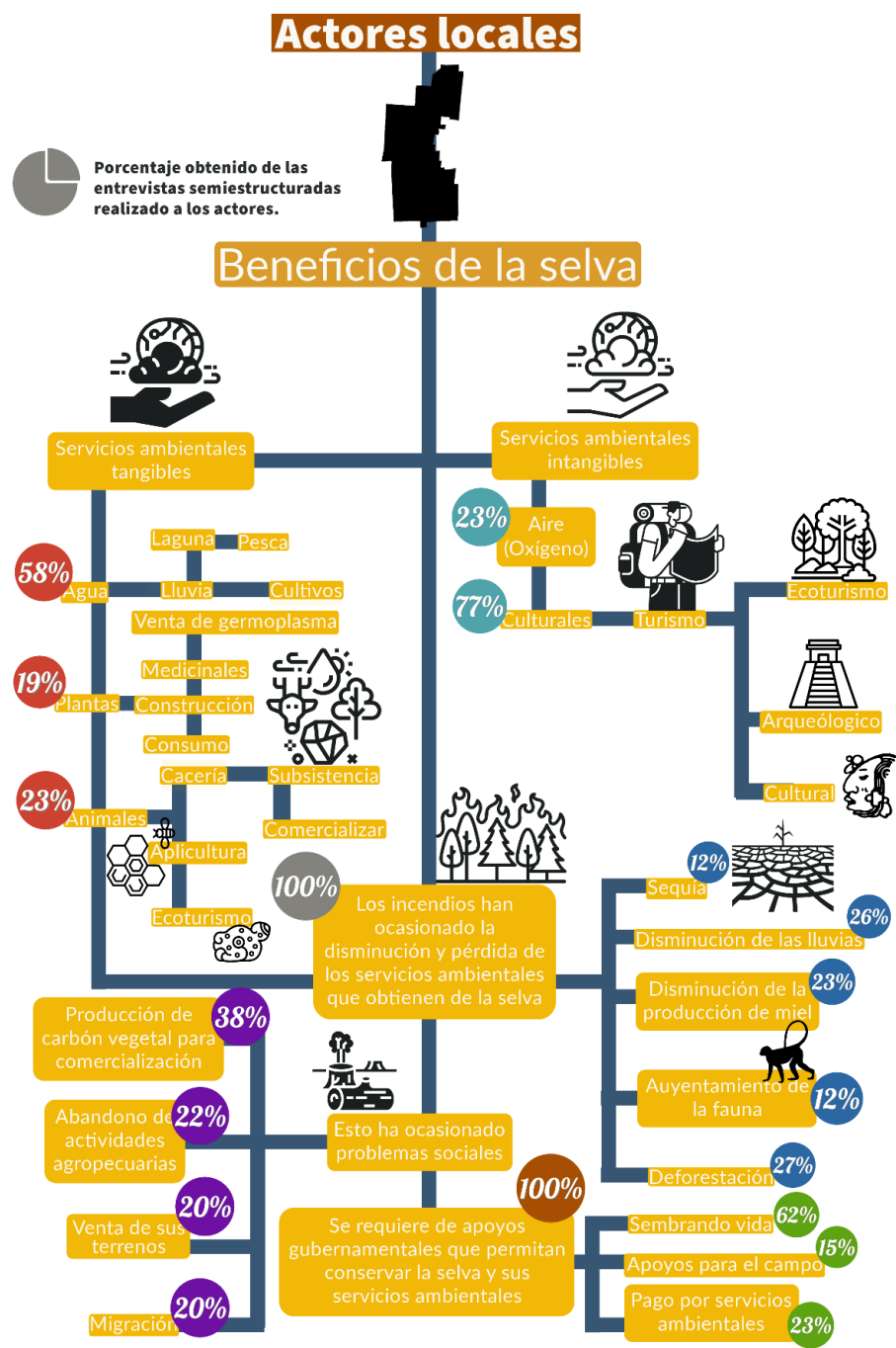


Figura 57. Diagrama de flujo de beneficios de la selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

IV.2 Distribución espacial y temporal de los incendios en la selva detectados con puntos de calor (2013-2020)

Los puntos de calor obtenidos del satélite VIIRS además del aporte en la identificación y ubicación de fechas de incendios para la adquisición de las imágenes de satélite nos permitieron evaluar la respuesta de los índices BAI y NBR permitiendo identificar el conglomerado de puntos de calor en las áreas quemadas, un ejemplo se muestra en la **Figura 58**, observamos la imagen Landsat 8 del 24 de abril de 2019 donde se identificó un incendio que fue delimitado por los índices y en los cuales se sobrepuso los puntos de calor que corresponden a esa fecha. De acuerdo con la base de datos obtenida de VIIRS se descargaron para el área en estudio 7,398 puntos de calor de los cuales 5,216 se ubicaron en la vegetación de selva.

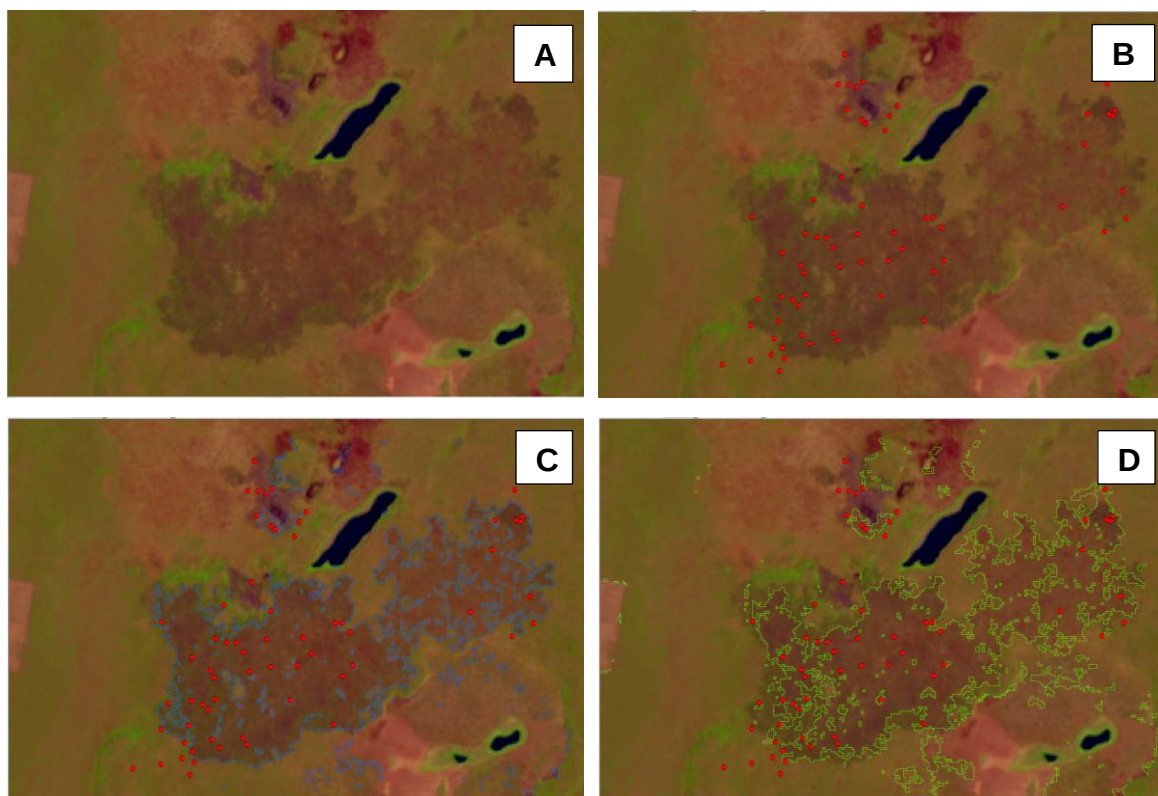


Figura 58. Validación de los índices BAI y NBR utilizando los puntos de calor VIIRS. (A) Identificación de un área de selva afectada por el fuego. (B) Superposición de los puntos de calor en el área de selva afectada por el fuego. (C) Superposición de los puntos de

calor y el índice BAI en el área afectada por el fuego. (D) Sobreposición de los puntos de calor y el índice NBR en el área afectada por el fuego.

Por otra parte, el número total de puntos de calor que se registraron en vegetación de selva fue de 5,216 de los cuales 1,901, se ubicaron dentro de los polígonos de áreas quemadas (**Tabla 19**).

Tabla 19. Frecuencia y extensión de las áreas quemadas de selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Año	Polígonos de áreas quemadas	Suma de áreas quemadas (ha)	Promedio de áreas quemadas (ha)	Máxima superficie quemada (ha)	Mínima superficie quemada (ha)	Puntos de calor VIIRS
2013	137	1,860.20	10.28	310.27	2.07	1,096
2014	187	1,191.70	4.97	104.4	2.04	86
2015	146	926.75	4.98	117.28	2.05	360
2016	316	5,120.16	12.74	987.92	2	718
2017	228	1,835.13	6.7	104.21	2.01	421
2018	281	1,377.11	3.98	86.74	2.01	168
2019	405	11,027.91	18.98	2,203.14	2.02	1 450
2020	482	5,812.86	9.29	312.25	2.01	917
Total	2 182	29,151.82	10.28	2,203.14	2	5 216

En el periodo en estudio los años 2016, 2019 y 2020 concentraron el mayor número de puntos de calor. Este incremento también se registró en los polígonos y superficie afectada por el fuego en la selva. Sin considerar el año 2013 debido a que las imágenes disponibles de Landsat 8 con las que se realizó el procesamiento presentaron un grado importante de nubosidad que impidió obtener un cálculo preciso en la superficie quemada de selva de ese año (**Figura 59**). Pero en los años posteriores (2014-2020) podemos observar que los puntos de calor y el área quemada aumentaron en los años 2016, 2019 y 2020, a la vez que disminuyeron en los años 2015, 2017 y 2018.

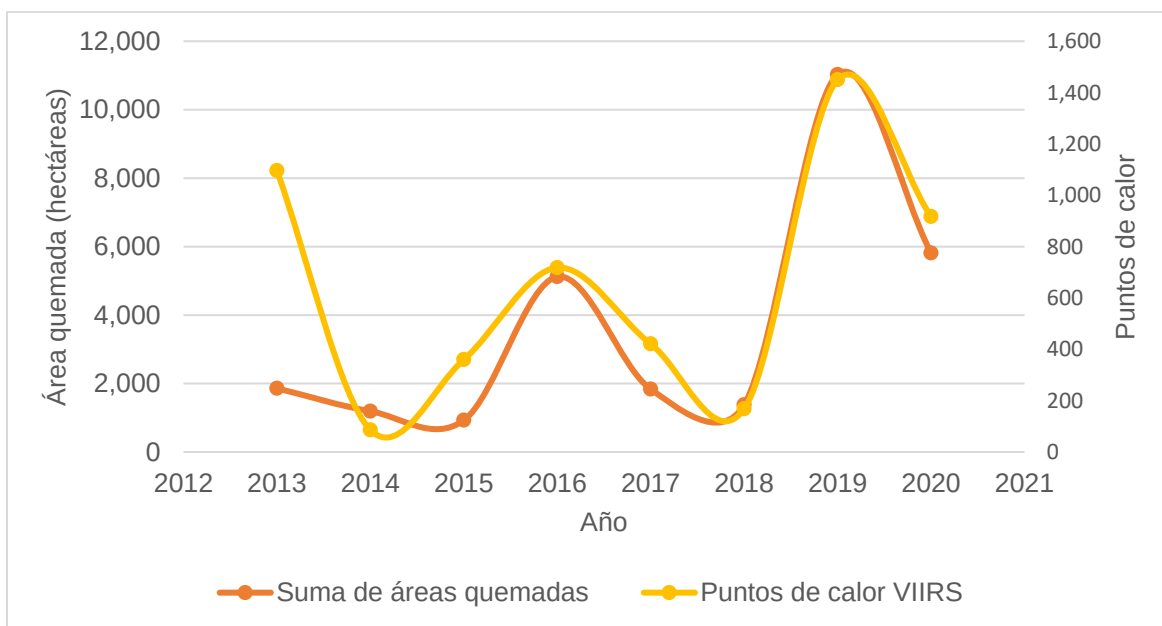


Figura 59. Área quemada de selva y los puntos de calor registrados.

En la **Figura 60** podemos observar la distribución espacial de los puntos de calor que se ubicaron en la vegetación de selva y que corresponden al periodo en estudio. Estos tienen una acumulación principalmente en ejidos como El Centenario y El Lechugal. Pero también tienen una importante representación en el área considerada como zona federal. Este análisis evidencia que en el área en estudio hay una importante actividad del uso del fuego en los terrenos agrícolas, que está ocasionando que se escape a la selva y sea detectado como puntos de calor por el sensor satelital VIIRS.

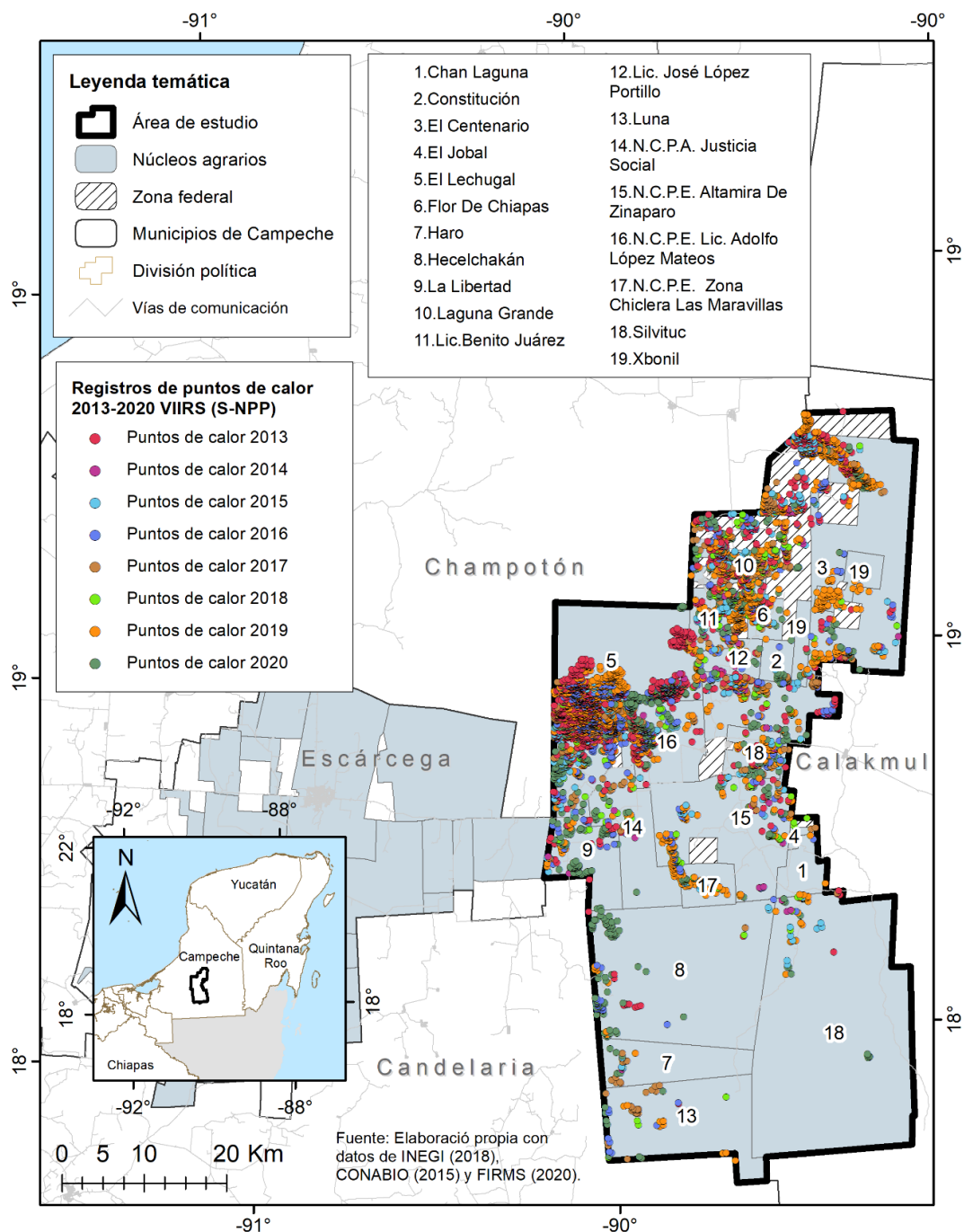


Figura 60. Distribución espacial de los puntos de calor en el área en estudio.

Con los puntos de calor se realizó un análisis para observar cuándo ocurren los incendios de acuerdo con la fecha de adquisición. El análisis realizado por mes a todos los puntos de calor en selva del periodo en estudio (**Figura 61**), demostró que

los incendios en el área en estudio tienen un incremento en los meses de febrero a junio teniendo los registros más altos en marzo, abril y mayo.

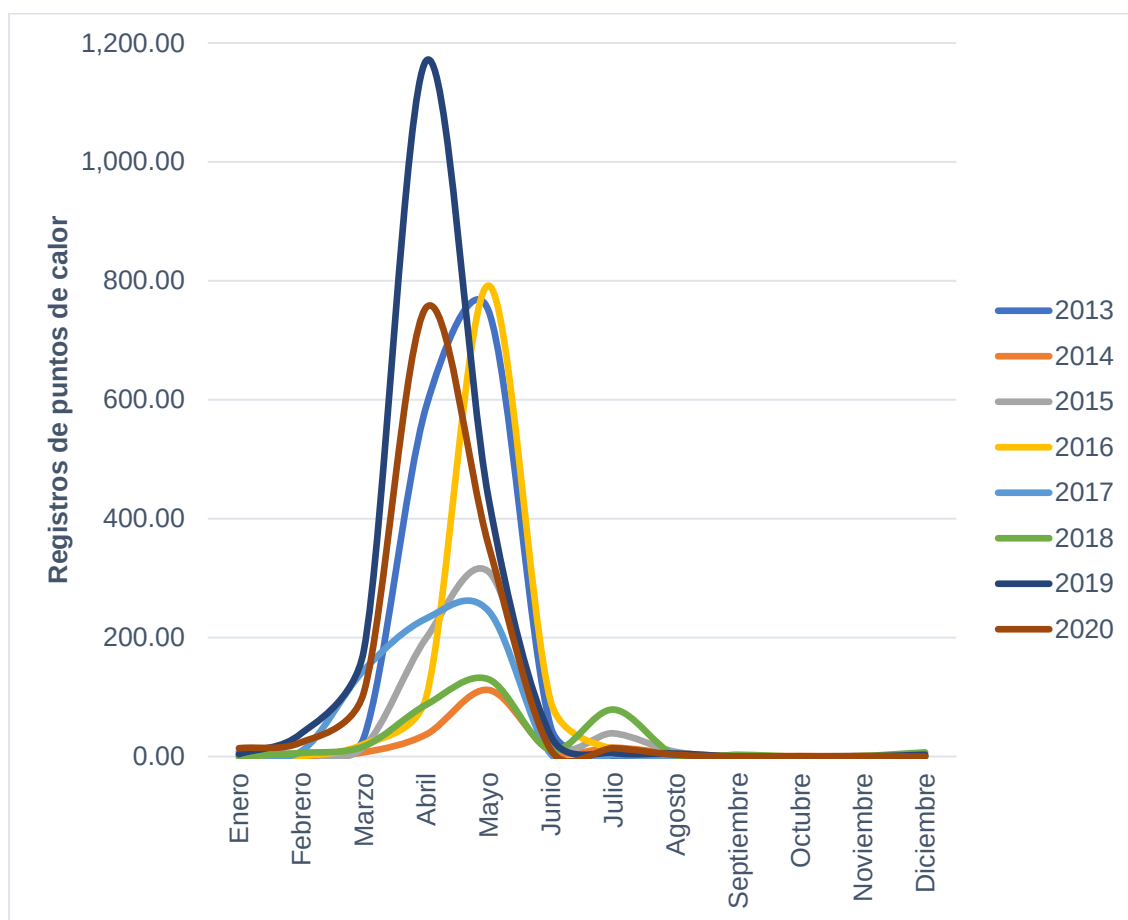


Figura 61. Análisis mensual de puntos de calor 2013-2020.

Este análisis coincide con las fechas del calendario de quemas (**Figura 62**) que se establece de manera anual por regiones (camino real, los chenes, macizo forestal, costa centro y los ríos), el área en estudio se ubica en la región los ríos y de acuerdo con el calendario de quemas de 2022, la propuesta de quemas es del 15 de marzo al 15 de mayo, un periodo de 61 días para la ubicación del área en estudio. En el caso del calendario de quemas 2023, la propuesta es del 16 de abril al 31 de mayo (45 días). Estos periodos de quemas coinciden con los escapes de fuego en la selva que ha registrado el sensor del satélite VIIRS. Esto es importante debido a que si se conoce en qué fechas se realizan las quemas que ocasionan que se escape el

fuego, se pueden proponer o reforzar medidas de mitigación en las áreas más sensibles a incendios identificadas en esta investigación.

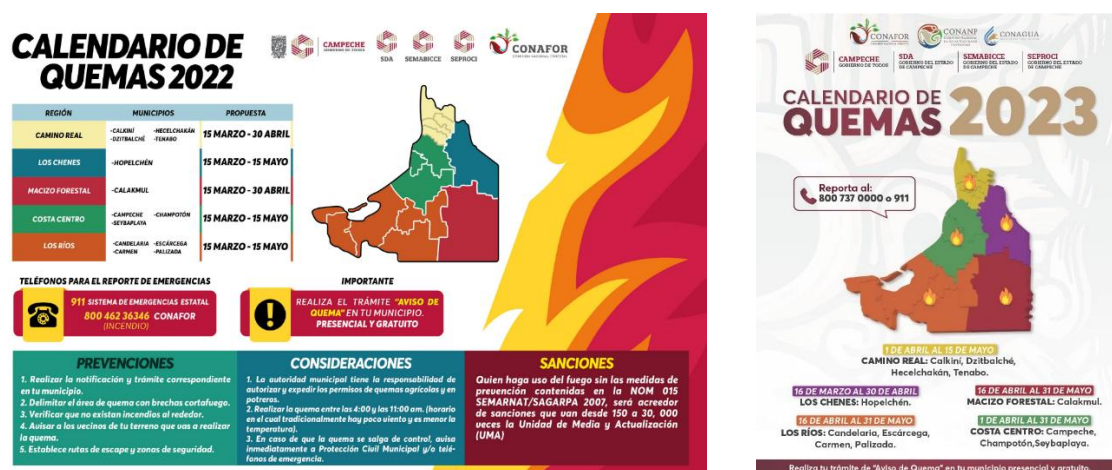


Figura 62. Calendario de quemas para Campeche 2022 y 2023.

IV.3 Distribución espacial y temporal de las áreas quemadas en selva

A partir de la combinación de los índices BAI y NBR generados con imágenes Landsat 8, se delimitaron las superficies de selva afectadas por incendios, denominadas áreas quemadas. La identificación se basó en la delimitación de los valores obtenidos de los índices.

En la **Figura 63** se muestra un comparativo entre el índice BAI y NBR para la identificación de las superficies de selva afectadas por el fuego. Como se muestra ambos índices se complementan para la identificación y delimitación de las superficies afectadas por incendios.

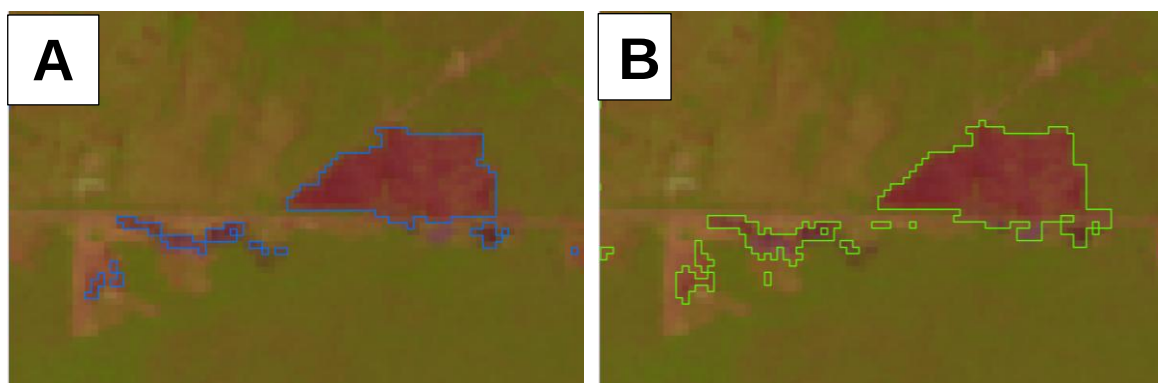


Figura 63. Delimitación del área afectada por el fuego en abril 25 de 2019. En la imagen A se muestra el resultado obtenido del índice BAI y en la imagen B se muestra el resultado generado por el índice NBR.

Los cálculos de las áreas anuales obtenidas por ambos índices se muestran en la **Tabla 20**, BAI identificó 1,164.05 ha más que NBR. El año en que se cuantificó una mayor superficie de selva afectada por incendios fue el año 2019. BAI identificó 8,718.05 ha y NBR 10,173.91 ha ambas sumando 11,027.91ha, al hacer la intersección de índices. Considerando que la superficie de selva es de 242,027.51 ha, la superficie identificada para el año 2019 representó el 4.56% y la superficie total quemada en el periodo en estudio representó el 12.04%.

Tabla 20. Cálculos anuales de superficies afectadas por incendios en la selva.

Año	BAI	BAI (%)	NBR	NBR (%)	Intersección de BAI y NBR	Intersección de BAI y NBR (%)
2013	860.55	3.60	1,860.19	8.19	1,860.20	6.38
2014	922.34	3.86	742.96	3.27	1,191.70	4.09
2015	790.93	3.31	705.90	3.11	926.75	3.18
2016	4,626.52	19.38	3,988.16	17.56	5,120.16	17.56
2017	1,579.09	6.61	1,388.85	6.11	1,835.13	6.30
2018	1,118.53	4.68	807.42	3.55	1,377.11	4.72
2019	8,718.05	36.51	10,173.91	44.79	11,027.91	37.83

Tabla 20. Cálculos anuales de superficies afectadas por incendios en la selva.

Año	BAI	BAI (%)	NBR	NBR (%)	Intersección de BAI y NBR	Intersección de BAI y NBR (%)
2020	5,260.87	22.03	3,045.44	13.41	5,812.86	19.94
	23,876.88	100.00	22,712.83	100.00	29,151.82	100

En la **Figura 64** podemos observar la variación anual de las áreas afectadas por los incendios en donde podemos notar que los años 2016, 2019 y 2020 registraron la mayor superficie de selva afectada por el fuego. El comportamiento de los índices BAI y NBR se muestra muy similar. Pero BAI en el año 2016 mostró una mayor respuesta que NBR, caso contrario ocurre en el año 2019 donde hay una mayor delimitación de áreas por parte de NBR. La intersección de los índices muestra un incremento de la delimitación de las áreas quemadas de selva lo cual es resultado de índices que trabajan con bandas siendo más sensibles en la delimitación de áreas quemadas debido a la adquisición de las imágenes de satélite, el tiempo de incendio y el tipo de selva.

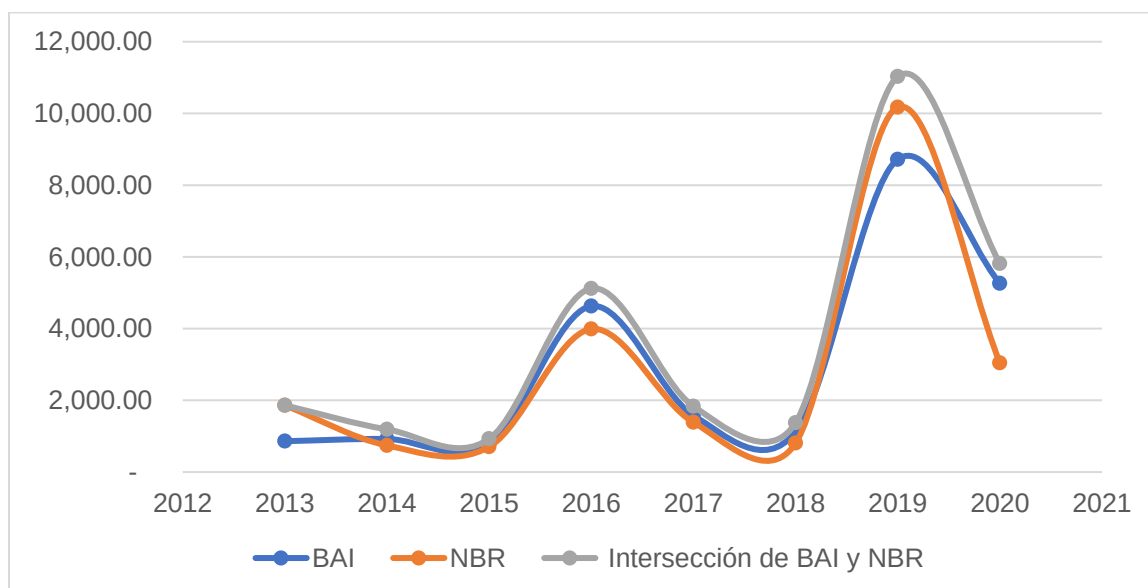


Figura 64. Representación de los cálculos anuales de superficies afectadas por incendios en selva con los índices BAI, NBR y la intersección de ambos índices.

IV.4 Caracterización de las áreas quemadas por tipo de vegetación de selva

El análisis de la distribución de selva indica que la vegetación primaria de selva mediana subperennifolia (SMQ) ha acumulado un total de 10,924 ha ubicándose como el principal tipo de vegetación con mayor área quemada. La vegetación de selva baja espinosa subperennifolia (SBQ) ha registrado un total de 4,280 ha. Por otra parte, la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (VSA/SMQ) acumuló 6,935 ha, seguida de la vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia (VSa/SMQ) con 6,099 ha. Las variantes de vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia (VSA/SBQ) y vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia (VSa/SBQ) obtuvieron 882 y 31 ha respectivamente. En este análisis acumulado de la superficie indica que la vegetación primaria presentó un área de quemado significativa colocándose por encima de la vegetación secundaria. Sin embargo, al normalizar los datos (**Tabla 21**) nos muestra que la vegetación de SBQ quemada representa solo el 5% del total. Pero la VSa/SMQ tiene una representatividad de área quemada del 41% del total de ese tipo de vegetación.

Tabla 21. Área quemada total por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Superficie	Superficie afectada por el fuego	Representación de la superficie quemada
	(ha)	(ha)	(%)
Selva baja espinosa subperennifolia (SBQ)	81,877	4,280	5
Selva mediana subperennifolia (SMQ)	99,220	10,924	11
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia (VSA/SBQ)	5,511	882	16
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (VSA/SMQ)	39,809	6,935	17
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia (VSa/SBQ)	435	31	7

Vegetación secundaria arbustiva de selva de selva mediana subperennifolia (VSa/SMQ)	14,868	6,099	41
---	--------	-------	----

Como se muestra en la **Figura 65** la selva mediana subperennifolia ha sido el tipo de vegetación que más se ha visto afectada por incendios dentro del periodo en estudio. El año 2019 registró la mayor área quemada de selva dentro del periodo en estudio para todos los tipos de vegetación de selva presentes.

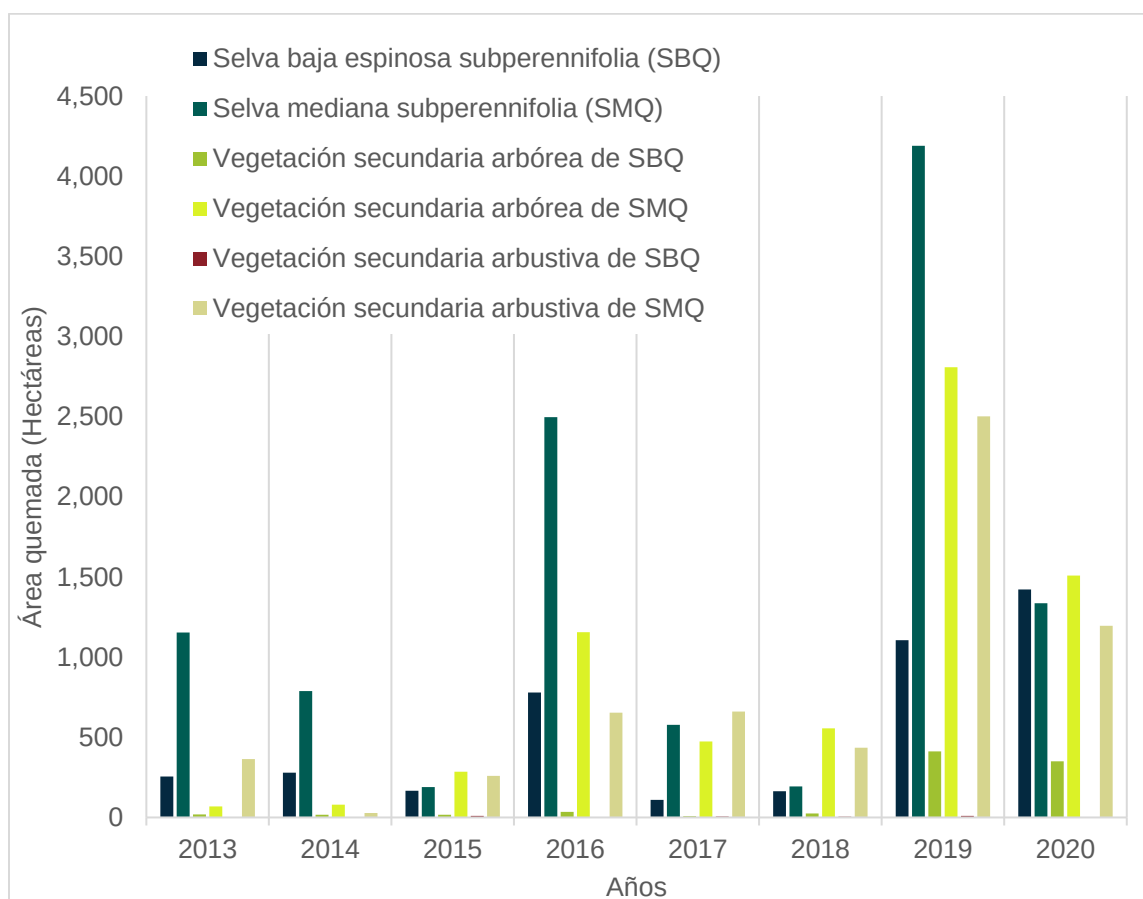


Figura 65. Área quemada por tipo de vegetación.

De los dos tipos de vegetación considerados como vegetación conservada de selva (selva baja subperennifolia y selva mediana subperennifolia). La selva baja subperennifolia obtuvo un máximo de área quemada acumulada, registrada en el

Área Federal obteniendo 1,179.96 ha. Y la selva mediana subperennifolia ha tenido el máximo acumulado de 6,832.35 ha en el ejido El Lechugal.

En la **Figura 66**, se observa que las áreas de selva que han sido quemadas colindan espacialmente con los agroecosistemas, los cuales incluyen actividades agrícolas y ganaderas según la clasificación del INEGI (2018). La vegetación de selva que colinda con los agroecosistemas tiene la categoría de vegetación secundaria.

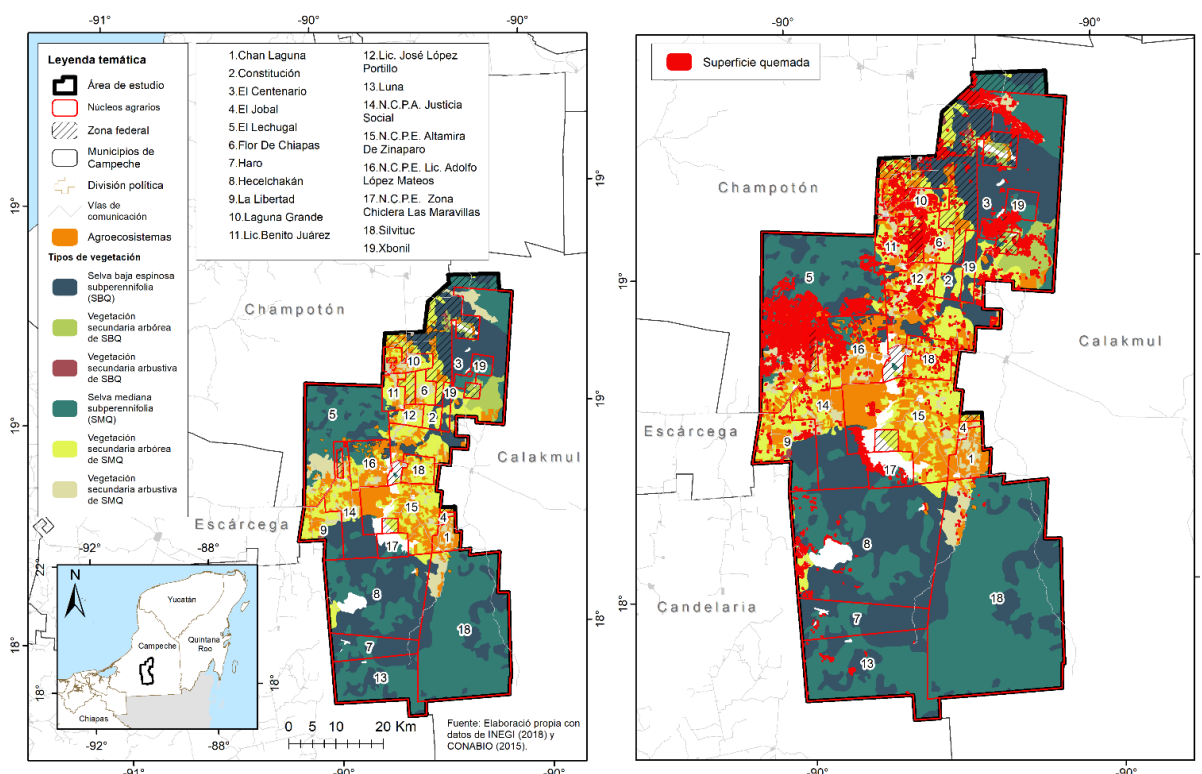


Figura 66. Distribución de los tipos de selva del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2018.

IV.5 Caracterización de las áreas quemadas por ejido

Los mayores valores de áreas quemadas se encontraron para los ejidos de El Centenario (4,907 ha) y El Lechugal (9,409 ha). Por otro lado, el ejido Silvituc, con una extensión de 58,121.20 ha de selva, acumuló una escasa superficie de área

quemada (522 ha). Esto se atribuye a que forma parte del Área Natural Protegida Balam-Kú, donde el uso del fuego está restringido.

Xbonil, que es una extensión del municipio de Calakmul, registró una superficie quemada de 974 ha, de un total de 1,046 ha. Por otro lado, el ejido Hecelchakán, que también pertenece al mismo municipio, se encuentra en último lugar con 871 ha quemadas. En 2019, la mayoría de los ejidos alcanzaron el máximo de área quemada de todo el periodo en estudio (**Tabla 22**), lo que indica que la superficie quemada ha ido aumentando en los últimos años. Es importante mencionar que, dentro del área en estudio, se encuentra una superficie considerada como Zona Federal. Esta ha experimentado un incremento del área quemada en los últimos años. Una verificación en campo permitió constatar que esta es un área quemada frecuentemente para el establecimiento de asentamientos humanos.

En general, parece que hay una tendencia de aumento en los incendios en 2019 y 2020 en todos los ejidos, independientemente de la población o la superficie de selva. Esto podría sugerir que otros factores, como cambios en las políticas de manejo del fuego o condiciones climáticas, podrían estar influyendo en esta tendencia.

Tabla 22. Distribución de las áreas quemadas por ejido

Ejido	Población	Superficie del ejido (ha)	Superficie de selva (ha)	Superficie quemada (ha)	Superficie quemada por año (ha)							
					2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
El Lechugal	635	27,690	25,814	9,409	1,411	773	181	2,256	282	75	3,392	1,039
El Centenario	1,038	35,148	32,067	4,907	117	57	99	276	363	575	2,034	1,386
Sin categoría (Zona Federal)		27,532	23,601	4,459	250	286	337	428	258	88	2114	698
N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos	371	8,403	4,569	1,636	8	28	34	475	166	53	440	432
N.C.P.A. Justicia Social	775	11,558	8,998	1,493	6	10	36	384	259	44	461	293
Laguna Grande	998	3,900	3,020	1,451	24	21	98	110	339	77	639	143
Xbonil	587	4,648	4,622	974	0	0	0	0	2	2	786	184

Tabla 22. Distribución de las áreas quemadas por ejido

Ejido	Población	Superficie del ejido (ha)	Superficie de selva (ha)	Superficie quemada (ha)	Superficie quemada por año (ha)							
					2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Hecelchakán	9,974	34,244	32,320	871	0	0	5	334	2	4	64	462
N.C.P.E. Altamira De Zinaparo	1,167	18,359	8,113	808	0	4	21	284	11	62	204	222
Lic. Benito Juárez	304	3,460	2,931	537	27	7	19	4	48	21	195	216
Silvituc	985	58,121	56,294	522	8	2	72	141	12	25	190	72
Flor De Chiapas	357	2,619	2,312	485	0	0	5	56	12	18	310	84
La Libertad	1,469	7,520	12,065	410	0	0	8	202	7	2	12	179
N.C.P.E. Zona Chiclera Las Maravillas	79	3,326	1,879	410	0	0	0	82	3	77	22	226
Lic. José López Portillo	363	2,733	1,823	397	8	0	7	0	6	160	101	115
Luna	884	17,109	17,012	251	0	0	0	74	31	75	58	13
Constitución	1,386	1,947	1,923	73	0	0	3	4	8	5	5	48
Haro	1,231	8,197	8,054	54	0	0	3	10	26	15	0	0
Chan Laguna	582	3,323	1,057	4	0	2	0	0	0	0	0	2
El Jobal	189	501	128	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total					1,860	1,192	927	5,120	1,835	1,377	11,028	5,813

La **Figura 67** muestra la distribución de incendios por año y el número de años en que un ejido ha experimentado incendios durante el periodo de estudio. Se evidencia que algunos ejidos han sido afectados por incendios de manera recurrente, mientras que en pequeñas regiones los incendios han sido poco frecuentes o inexistentes. Los intervalos entre incendios varían entre dos y ocho años.

Según el análisis, los ejidos ubicados en la región norte y en la Zona Federal mostraron una incidencia constante de incendios a lo largo del periodo estudiado. La distribución de las áreas quemadas se concentra al oeste en el ejido El Lechugal, al noreste en el ejido El Centenario y al norte en el ejido Laguna Grande, los cuales se han caracterizado por delimitar áreas quemadas cada año del periodo en estudio.

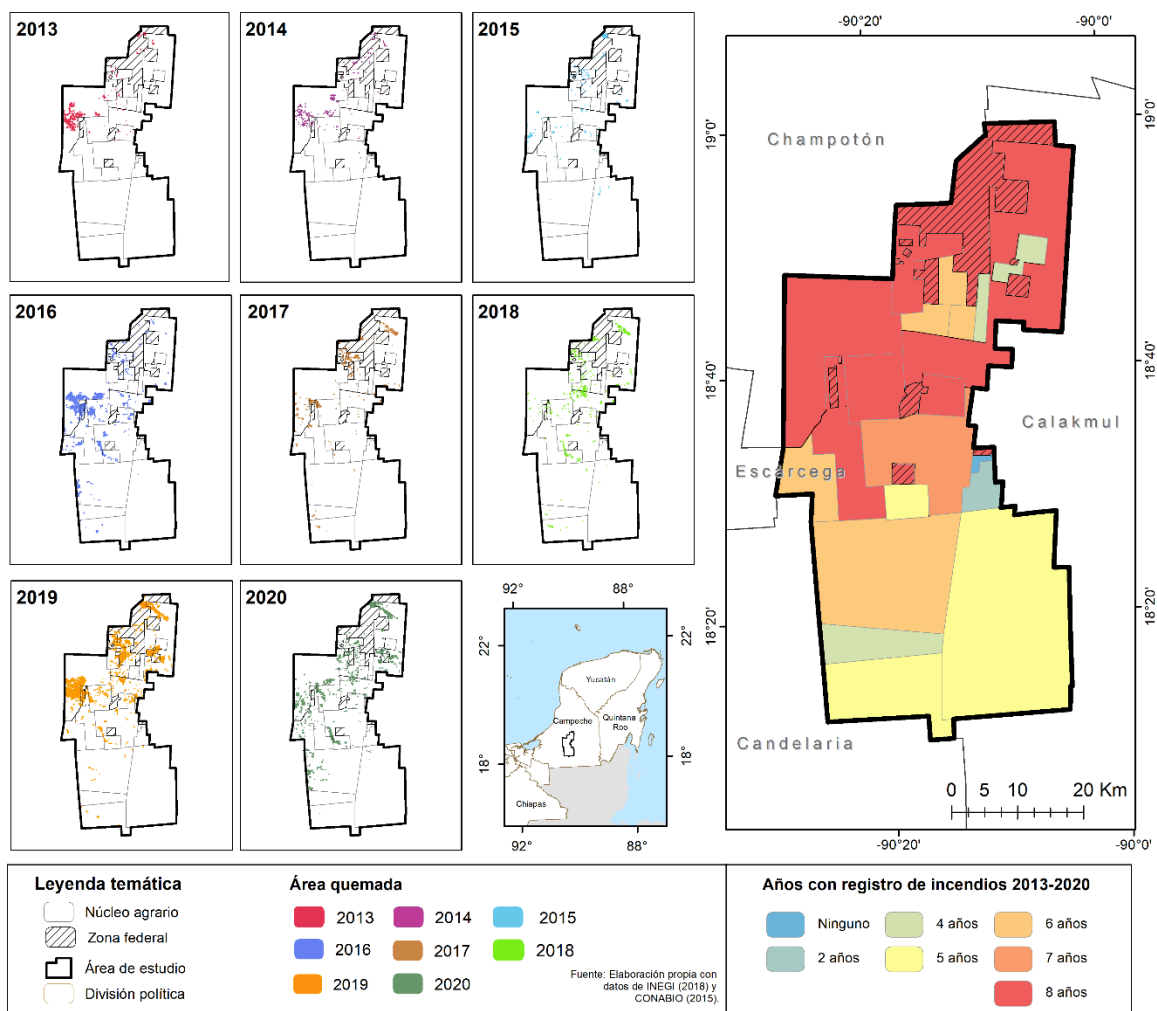


Figura 67. Registro de incendios y distribución de las áreas quemadas del periodo en estudio 2013-2020 en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2018

IV.6 Validación de la delimitación de las áreas quemadas

Se seleccionaron mediante un muestreo aleatorio simple 31 áreas quemadas que conformaron una superficie de 887.05 ha, que se distribuyeron en cuatro tipos de

selva, cinco áreas en SBQ, una en SMQ, una en VSA/SBQ y 24 en VSA/SMQ (Figura 68).

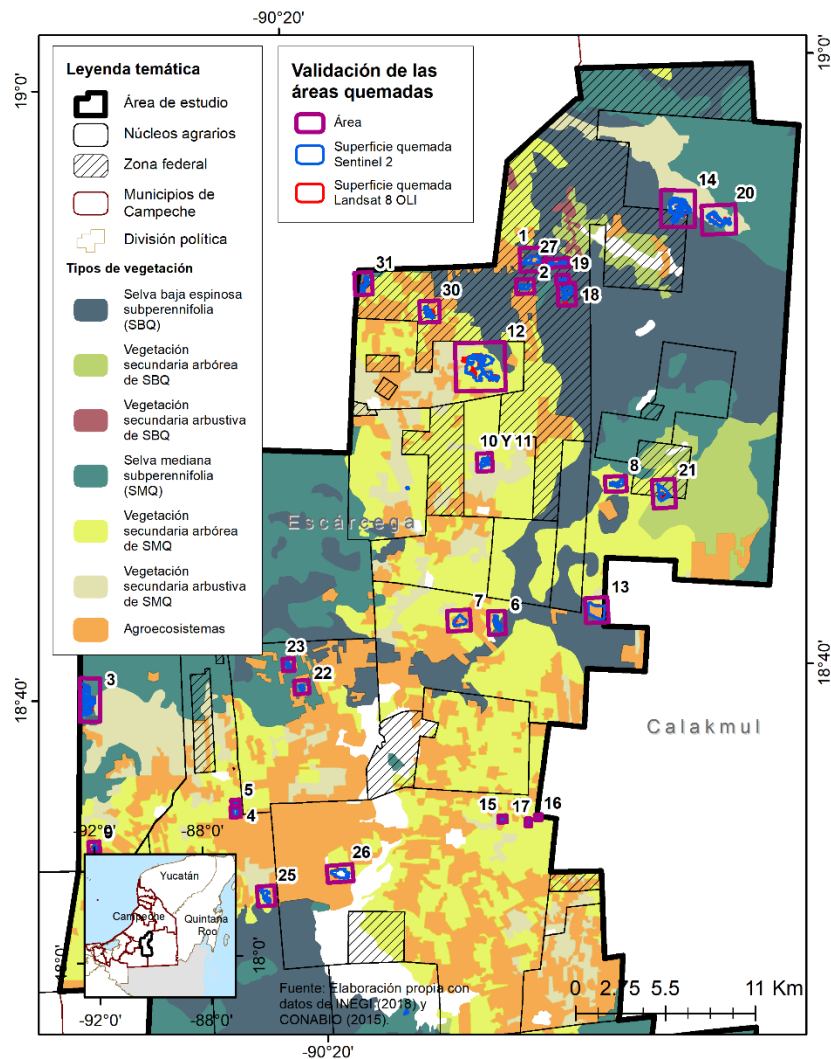


Figura 68. Ubicación espacial de las áreas quemadas sometidas a validación.

En la **Figura 69** podemos observar del lado izquierdo el error de omisión que se debe principalmente por la imagen Sentinel-2 que fue obtenida 10 días posteriores (05 de mayo de 2019) a la imagen Landsat 8 y en la cual podemos notar que el incendio continuó avanzando lo cual ocasionó una diferencia del cálculo de la superficie quemada. En la imagen del lado derecho se muestra un ejemplo del error de comisión ocasionado por la delimitación de la imagen Landsat 8 que tiene un

píxel de 30 metros a diferencia de la imagen Sentinel-2 que tiene un píxel de 10 metros. Como se muestra en la Imagen un píxel más grande hará una delimitación menor a la realidad por lo que se podría estar sobre estimando el área quemada.

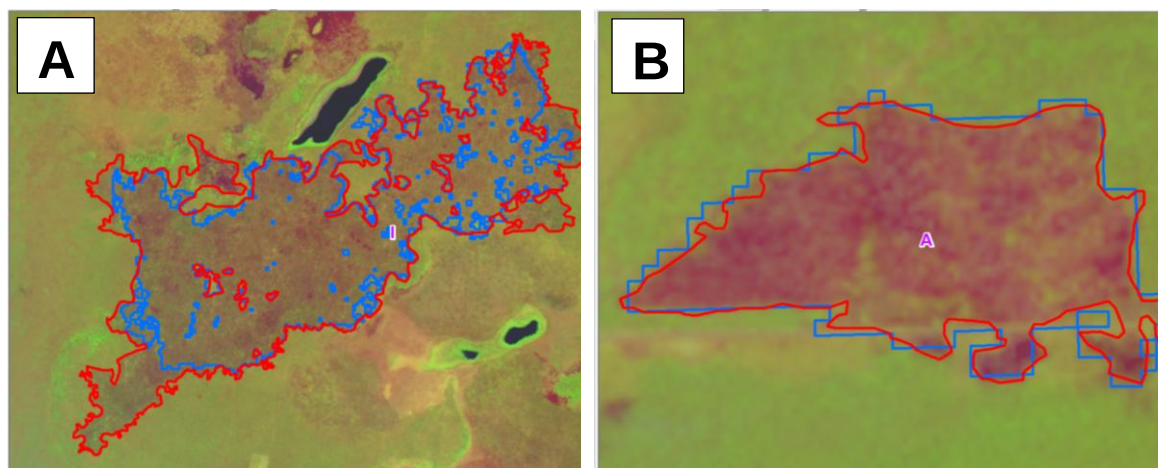


Figura 69. Error de omisión (A) y error de comisión (B) en la delimitación del área quemada (Sentinel-2- (color rojo) y Landsat 8 (color azul) para dos polígonos aleatorios.

El valor promedio del índice Kappa obtenido fue de 88.75% con un error de omisión promedio de 1.67% y un error de comisión del 12.86%. La precisión obtenida en promedio fue de 95.91% (**Tabla 23**), entre las áreas quemadas de Sentinel-2 y Landsat 8 OLI. Los errores de omisión promedio se debieron al desfase en la fecha de adquisición de la imagen Sentinel-2 con 10 días posteriores a la imagen Landsat 8 OLI, lo que sugiere que los incendios continuaron avanzando, cubriendo más superficie quemada que no pudo ser delimitada por los índices.

Tabla 23. Resultado de la validación de las áreas seleccionadas con la imagen Sentinel-2.

Área	Superficie ha (Landsat 8 OLI)	Superficie ha (Sentinel 2)	Superficie de intersección (ha)	Tipos de selva	Precisión	Error de omisión %	Error de comisión %	Índice Kappa
1	36.09	33.65	31.43	SBQ	96.94	7.22	12.94	88.03
2	15.55	14.69	14.61	SBQ	98.26	5.25	5.74	93.47

Tabla 23. Resultado de la validación de las áreas seleccionadas con la imagen Sentinel-2.

Área	Superficie ha (Landsat 8 OLI)	Superficie ha (Sentinel 2)	Superficie de intersección (ha)	Tipos de selva	Precisión	Error de omisión %	Error de comisión %	Índice Kappa
3	113.04	101.89	94.74	SMQ	91.73	10.5	16.16	80.61
4	8.70	8.79	7.88	VSA/SMQ	98.02	-1.16	9.43	94.3
5	4.05	3.60	3.46	VSA/SMQ	95.27	10.36	13.5	85.1
6	17.69	17.02	16.17	VSA/SBQ	98.47	4.04	8.64	92.74
7	30.78	31.16	29.97	VSA/SBQ	99.73	-1.22	2.69	99.06
8	18.27	18.84	17.08	VSA/SMQ	99.42	-3.26	6.67	97.71
9	5.27	4.38	3.62	VSA/SMQ	94.39	20.26	31.7	70.46
10	8.64	8.01	7.69	VSA/SMQ	98.49	7.13	10.58	90.29
11	8.47	8.63	8.22	VSA/SMQ	99.85	-1.61	3.29	99.01
12	153.96	144.54	132.77	VSA/SBQ	96.62	6.65	13.79	87.62
13	74.52	72.20	70.95	SMQ	97.22	3.14	4.77	93.9
14	91.34	101.99	84.33	VSA/SMQ	100.83	-14.52	7.63	102.76
15	3.66	3.08	2.67	VSA/SMQ	92.53	18.84	27.84	71.98
16	3.69	3.45	3.12	VSA/SMQ	94.67	7.42	15.68	84.82
17	2.62	2.12	2.03	VSA/SMQ	93.35	19.12	21.92	75.49
18	30.06	27.56	24.75	SBQ	94.77	9.31	17.77	83.03
19	4.32	4.01	3.13	SBQ	96.6	8.48	27.21	79.25
20	34.38	47.78	14.33	VSA/SMQ	103.41	-68.2	4.07	123.88
21	32.09	36.57	11.98	VSA/SMQ	101.62	-16.63	2.34	107.23
22	7.64	7.90	7.60	VSA/SMQ	100.41	-4.11	0	102.24
23	5.95	7.96	5.70	VSA/SMQ	103.77	-56.59	3.39	121.45
24	49.21	36.33	35.29	VSA/SMQ	92.14	26.72	28.27	67.91
25	17.41	17.80	17.00	VSA/SMQ	100	-2.41	2.3	100
26	41.35	37.53	37.21	VSA/SMQ	94.03	9.42	10.12	85.93
27	16.38	16.43	14.21	SBQ	97.3	0	13.35	91.19
28	2.61	2.59	2.32	SMQ	98.57	0.43	10.77	93.31
29	13.95	12.32	11.12	VSA/SMQ	81.43	13.13	20.57	62.64
30	18.72	15.66	14.32	VSA/SMQ	80.17	17.51	23.42	60.34

Tabla 23. Resultado de la validación de las áreas seleccionadas con la imagen Sentinel-2.

Área	Superficie ha (Landsat 8 OLI)	Superficie ha (Sentinel 2)	Superficie de intersección (ha)	Tipos de selva	Precisión	Error de omisión %	Error de comisión %	Índice Kappa
31	15.41	12.75	12.00	VSA/SMQ	83.22	18.09	22.08	65.49
Total	885.80	861.22	741.71	Promedio	95.91	1.72	12.86	88.75

IV.7 Distribución espacial y temporal de la severidad de los incendios en la selva

Comprender la distribución espacial y temporal de la severidad de los incendios es crucial para la conservación y gestión de las selvas. En esta sección, se analizarán los tipos de vegetación en el área de estudio y la severidad de los incendios en cada uno, así como la distribución de estos incendios y los ejidos donde se ha registrado una mayor severidad.

La **Figura 70**, muestra la distribución anual del área quemada en hectáreas, clasificada por diferentes niveles de severidad de los incendios (recrecimiento, severidad baja, severidad moderada y severidad alta) para los años 2013 a 2020 obtenida del método de Jenks.

Comenzando con la categoría de recrecimiento, esta obtuvo picos significativos en los años 2013, 2016, 2019 y 2020, con el mayor pico en 2019, superando las 2,500 hectáreas. Esto indicaría que hubo escapes de fuego hacia la vegetación de la selva; sin embargo, dicha vegetación ha logrado recuperarse. Este proceso de recuperación podría analizarse mediante la serie temporal de valores de NDVI, lo que permitiría un monitoreo de su recuperación. La severidad baja mostró incrementos notables en los años 2013, 2016, 2019 y 2020, con el mayor valor registrado también en 2019, superando las 1,500 hectáreas. La severidad moderada presentó incrementos prominentes en 2016, 2019 y 2020, alcanzando su pico más alto en 2019, acercándose a las 2,000 hectáreas. Las áreas con severidad

alta tuvieron picos en los años 2013, 2015, 2016, 2019 y 2020, con un valor notable en 2019, aunque menor comparado con el recrecimiento y la severidad moderada, pero aún significativo.

En general, los años 2019 y 2020 destacan por tener la mayor área quemada, con un incremento significativo en todas las categorías de severidad, especialmente en 2019. También, el año 2016 muestra un aumento notable en todas las categorías de severidad, aunque no tan alto como en 2019. Por otro lado, los años 2014, 2015, 2017 y 2018 presentan menores áreas quemadas en comparación con los demás años, con valores relativamente bajos en todas las categorías de severidad.

Estos resultados evidencian que los incendios más severos y extensos ocurrieron en 2019 y 2020, con 2019 siendo el año más crítico. La variabilidad en la severidad de los incendios a lo largo de los años subraya la importancia de realizar un monitoreo continuo y desarrollar estrategias de gestión adaptativas para minimizar el impacto de los incendios en la selva.

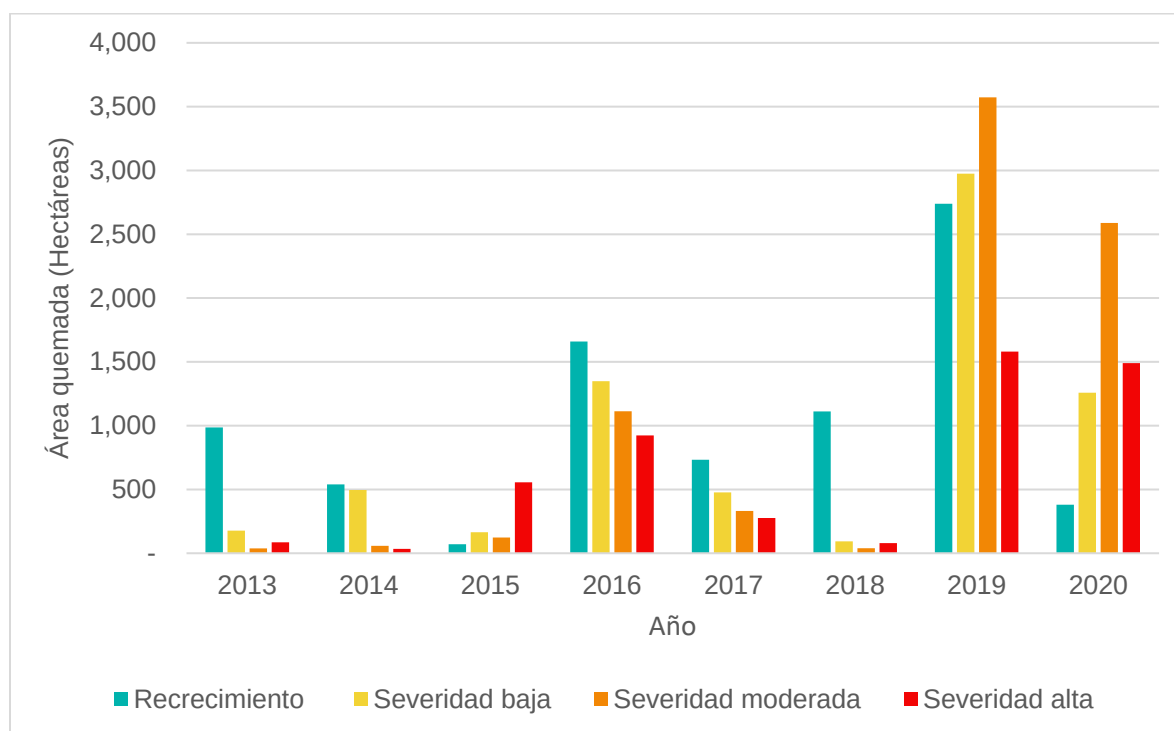


Figura 70. Severidad del periodo en estudio.

IV.7.1 Caracterización de la severidad de los incendios por tipo de vegetación

La **Figura 71** muestra la distribución del área quemada clasificada por tipo de vegetación y niveles de severidad del incendio. La Selva Mediana Subperennifolia (SMQ) es el tipo de vegetación más afectada, presentando la mayor área quemada en todas las categorías de severidad, especialmente en las categorías de severidad baja y moderada, ambas superando las 3,000 hectáreas. El recrecimiento también es significativo en todos los tipos de vegetación, destacando en SMQ y en la vegetación secundaria arbórea de SMQ con más de 2,000 hectáreas cada uno. La selva baja espinosa subperennifolia (SBQ) y la vegetación secundaria arbustiva de SMQ presentan áreas quemadas considerables en recrecimiento y severidad baja, mientras que la severidad alta es menos prominente pero aún notable en varios tipos de vegetación, especialmente en SMQ. En general, los datos indican que el recrecimiento es un proceso importante en todos los tipos de vegetación de selva, sugiriendo una recuperación significativa del área quemada, y subrayan la necesidad de estrategias de gestión y recuperación específicas para cada tipo de vegetación afectada por incendios.

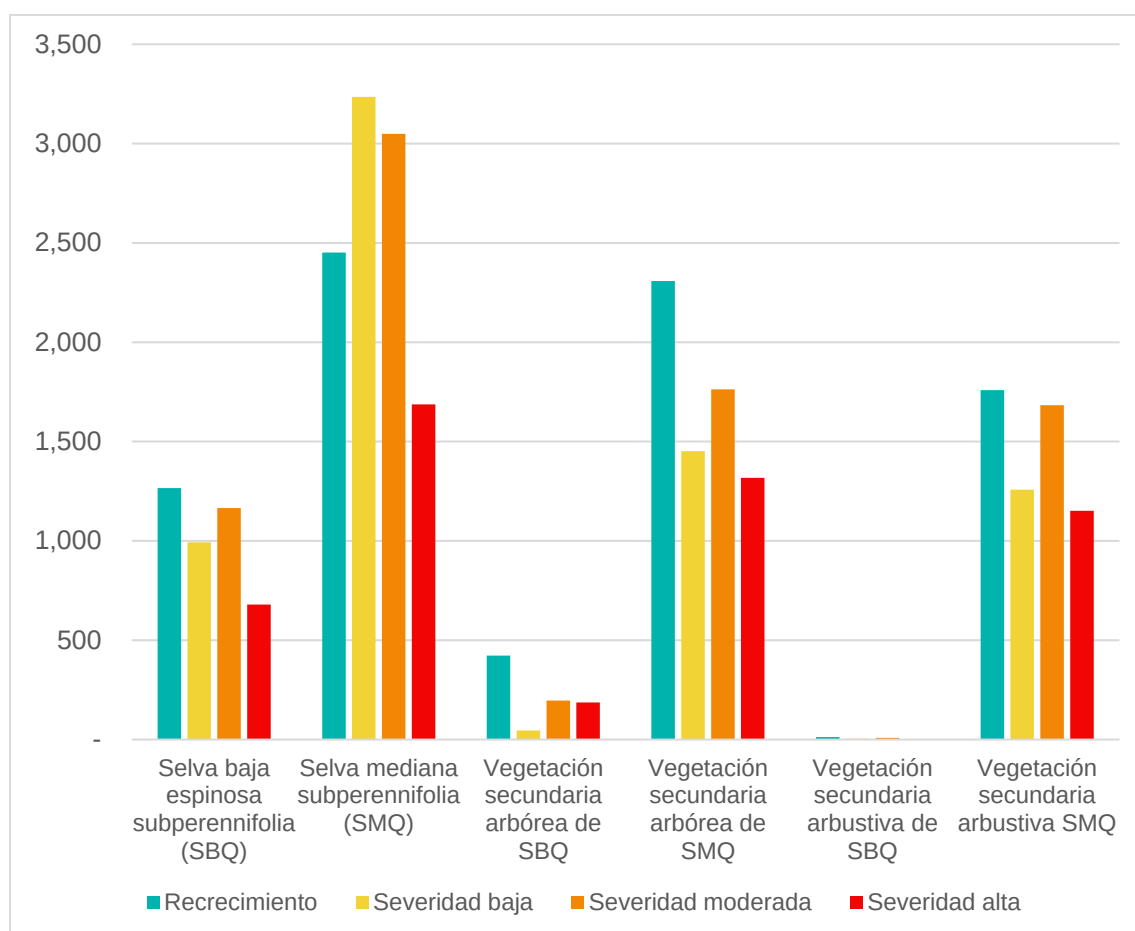


Figura 71. Severidad por tipo de vegetación

IV.7.2 Caracterización de la severidad de los incendios por ejido

El análisis de la severidad por ejido (**Figura 72**) muestra que donde existe un uso habitual del fuego suele quemar las selvas y así mismo incrementar las clases de severidad como se muestra en El Centenario y El Lechugal.

El Lechugal es el ejido que presenta la mayor severidad de incendios en todas las categorías, con 1,586.74 unidades en severidad alta, 2,802.10 unidades en severidad moderada y 2,440.21 unidades en severidad baja. Le sigue El Centenario, con 752.34 unidades en severidad alta y 1,065.70 unidades en severidad baja. En cuanto a la severidad moderada, después de El Lechugal, es la Zona federal la que presenta un mayor índice con 1,426.52 unidades. En general, los datos sugieren que los ejidos con mayor cantidad de recrecimiento tienden a presentar una mayor

severidad de incendios en todas las categorías. Sin embargo, también es importante considerar otros factores que pueden influir en la severidad de los incendios, como las prácticas de manejo del suelo, la proximidad a las zonas urbanas y las condiciones climáticas. A pesar de tener la mayor severidad de incendios en todas las categorías, El Lechugal también tiene la mayor cantidad de recrecimiento. Esto podría indicar que, a pesar de los incendios, la vegetación de este ejido tiene una gran capacidad para recuperarse y regenerarse.

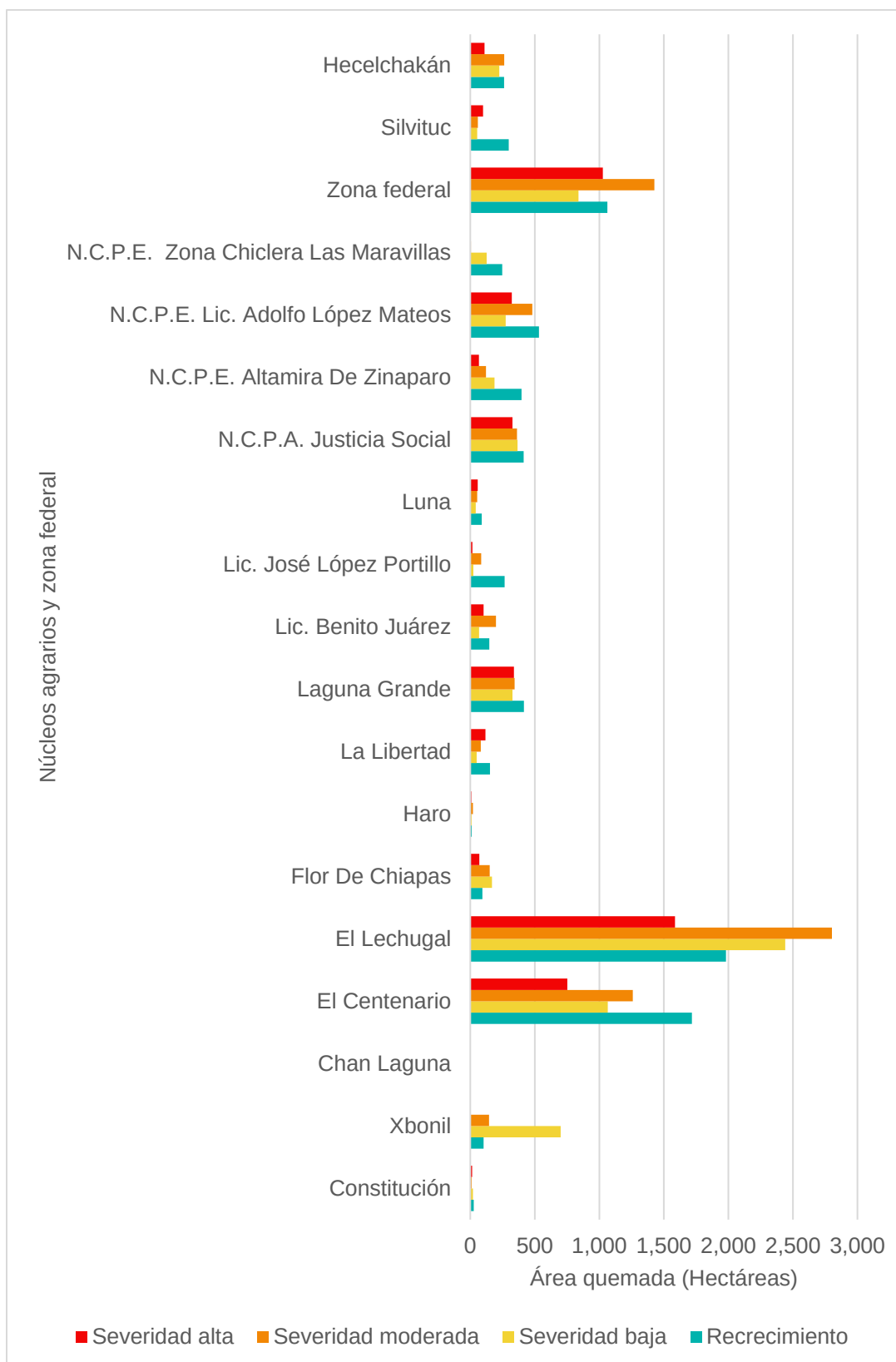


Figura 72. Severidad en los ejidos y área federal.

IV.8 Evaluación del impacto de la severidad de los incendios en la vegetación

La evaluación de la severidad de los incendios en la vegetación es una herramienta crucial para entender el impacto del fuego en los ecosistemas. A través del trabajo de campo, se pueden obtener datos directos y detallados sobre los efectos de los incendios. Este proceso incluye la medición de diversos parámetros, como la extensión de la vegetación quemada y la alteración de la composición de especies. Estos datos son esenciales para clasificar la severidad de los incendios en categorías que van desde baja hasta alta, proporcionando una base sólida para la planificación de la restauración y la gestión de los recursos naturales afectados (Guillem-Cogollos et al., 2017; Key & Benson, 2006).

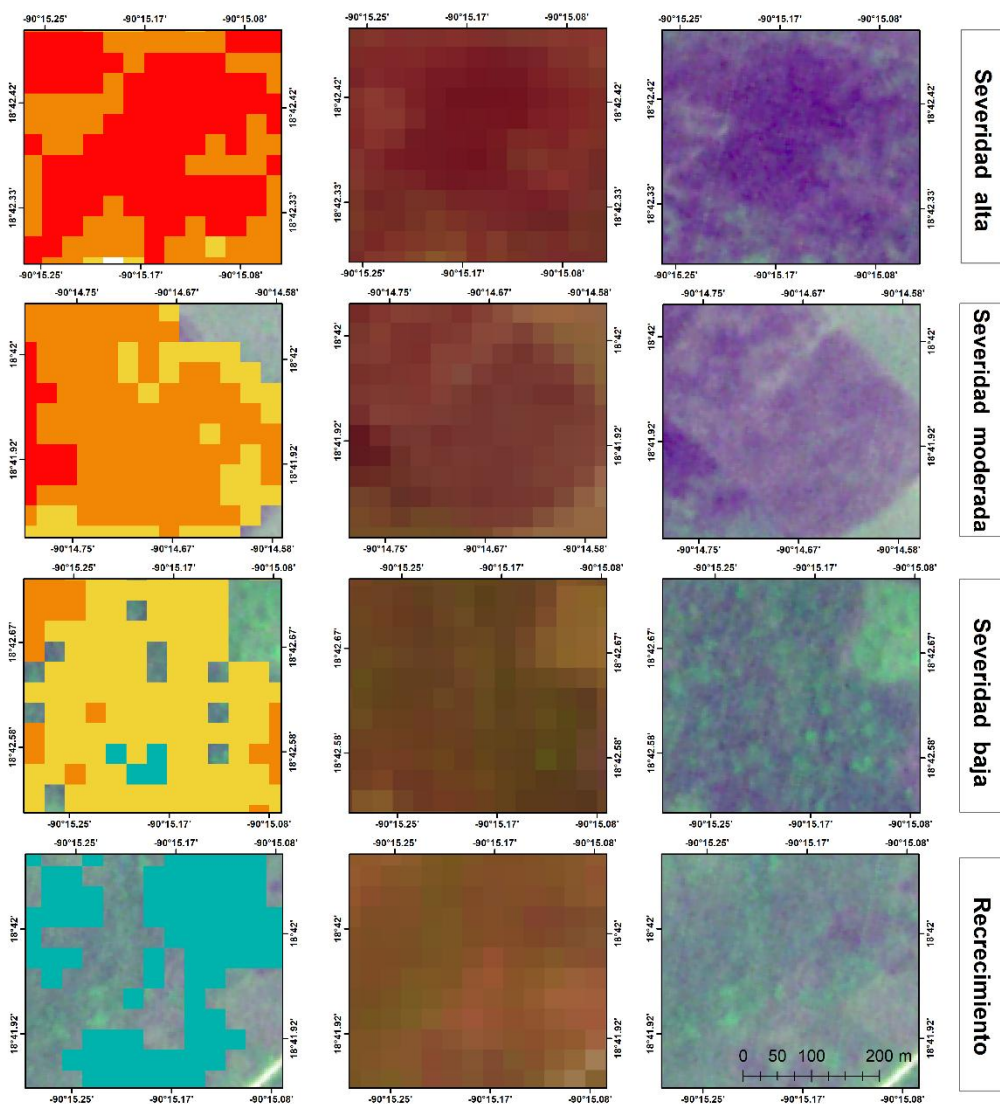
De acuerdo con la clasificación de la severidad, las áreas identificadas con alta severidad indican que el incendio causó daños graves, probablemente quemando la mayoría o toda la vegetación y alterando significativamente el suelo y otros aspectos del ecosistema. En estas áreas, la vegetación ha sido completamente consumida (**Figura 73**). Por otro lado, las áreas con severidad moderada sugieren que el incendio causó daños significativos, quemando una parte considerable de la vegetación, pero sin destruir completamente el ecosistema. La severidad baja se refiere a incendios que causaron daños mínimos, quemando solo la capa superficial de vegetación y dejando intacta la mayoría de la misma (Arellano et al., 2017; Gómez-Sánchez et al., 2017; Keeley, 2009; Montorio Llovería et al., 2014).

Estas tres clases de severidad muestran cambios en la estructura de la vegetación, a diferencia de las áreas de selva no afectadas por el fuego. Estos cambios se pueden observar con mayor detalle en imágenes de alta resolución, como las imágenes Planet, que tienen una resolución de 4.5 m y permiten ver claramente los efectos del fuego en las diferentes clases de severidad propuestas por Jenks.

Categorías de ruptura natural de Jenks

Imagen Landsat 8 OLI Fecha: 25-04-2019

Imagen Planet Fecha: 26-04-2019



Leyenda tematica

Categorías de ruptura natural de Jenks

- | | |
|----------------|--------------------|
| Recrecimiento | Severidad moderada |
| Severidad baja | Severidad alta |

Fuente: Elaboración propia con
datos de INEGI (2018), Glovis (2020) y
Planet Labs PBC (2023).

Figura 73. Clasificación de la severidad con la propuesta de ruptura natural de Jenks.

IV.8.1 Análisis de la riqueza de especies en los sitios de muestreo

Como resultado del muestreo de los 20 sitios, se registró una riqueza de 22 especies y un conteo total de 1440 individuos. Las especies observadas pertenecen a 9 órdenes, 12 familias y 19 géneros diferentes (**Tabla 24**). La familia Fabaceae es la más rica en términos de diversidad de especies, con un total de 7 especies registradas. Esto concuerda con los resultados de estudios florísticos realizados en vegetación de selvas, donde la familia Fabaceae es la mejor representada debido a su gran diversidad en todo el mundo, especialmente en regiones tropicales (Zamora-Crescencio et al., 2011). Del total de especies analizadas, el 49% corresponde al estrato arbóreo, el 33% al estrato arbustivo, el 11% a plántulas y el 7% al estrato herbáceo. Ninguna de las plantas muestreadas presentó especies epífitas. Además, solo el 1% de las plantas examinadas mostró signos de quemaduras. Todas las especies registradas son consideradas nativas, no identificándose ninguna especie endémica en los sitios de muestreo. Asimismo, ninguna de las especies fue incluida en la NOM-059-SEMARNAT-2010, en la Lista Roja de Especies Amenazadas (Redlist) ni en el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).

Tabla 24. Especies presentes en los sitios de muestreo.

Orden	Familia	Género	Nombre científico	Nombre común
Ericales	Sapotaceae	Pouteria	<i>Pouteria campechiana</i>	Caniste
Fabales	Fabaceae	Acacia	<i>Acacia cornigera</i>	Cornizuelo
		Albizia	<i>Albizia niopoides</i>	Cantemo
		Coulteria	<i>Coulteria mollis</i>	Chakte viga
		Lonchocarpus	<i>Lonchocarpus castilloi</i>	Machiche
			<i>Lonchocarpus xuul</i>	Palo gusano
		Lysiloma	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Tzalam
		Piscidia	<i>Piscidia piscipula</i>	Jabín
Gentianales	Apocynaceae	Asclepias	<i>Asclepias curassavica</i>	Algodoncillo tropical
Lamiales	Verbenaceae	Lantana	<i>Lantana camara</i>	Cinco negritos
Malvales	Malvaceae	Hampea	<i>Hampea trilobata</i>	Majagua
Poales	Poaceae	Brachiaria	<i>Brachiaria fasciculata</i>	Pasto
Rosales	Moraceae	Brosimum	<i>Brosimum alicastrum</i>	Ramón
		Ficus	<i>Ficus maxima</i>	Matapalo

Sapindales	Anacardiaceae	Metopium	<i>Metopium brownei</i>	Chechen prieto
		Spondias	<i>Spondias mombin</i>	Jobo
	Burseraceae	Bursera	<i>Bursera simaruba</i>	Cha-kah
	Sapindaceae	Allophylus	<i>Allophylus cominia</i>	Chirimoya
	Sapotaceae	Thouinia	<i>Thouinia paucidentata</i>	Verde lucero
Solanales	Convolvulaceae	Ipomoea	<i>Ipomea batatas</i>	Camote morado
			<i>Ipomea petersi</i>	Quiebra plato
			<i>Ipomoea cordatotriloba</i>	Campanilla

Según los lugares de muestreo (**Tabla 25**), se observó que el mayor número de registros de individuos se encuentra en los sitios de control SM6, SM7, SM13, SM19 y SM20. Por otro lado, el menor número de individuos se registró en los sitios con severidad alta SM9, SM11, SM16 y SM18. A partir de esta observación se procedió a realizar los análisis de biodiversidad.

Tabla 25 Sitios de muestreo por severidad.

Tipo de severidad	Sitio de muestreo (SM)	Tipo de vegetación	Año del incendio
Sitio de control (N/A)	6	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	7	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	13	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	19	Selva mediana subperennifolia	2020
	20	Selva mediana subperennifolia	2020
Total de sitios de muestreo	5		
Recrecimiento (R)	1	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	2	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	10	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	12	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
Total de sitios de muestreo	4		

Tabla 25 Sitios de muestreo por severidad.

Tipo de severidad	Sitio de muestreo (SM)	Tipo de vegetación	Año del incendio
Severidad baja (SB)	4	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	8	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	14	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
Total de sitios de muestreo	3		
Severidad moderada (SM)	3	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	5	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	15	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	17	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2020
Total de sitios de muestreo	4		
Severidad alta (SA)	9	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	11	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	16	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	2019
	18	Selva mediana subperennifolia	2020
Total de sitios de muestreo	4		

IV.8.2 Análisis del índice de Shannon-Wiener

En términos generales, se observa una disminución de la diversidad en relación con la severidad del incendio. Se aprecia una tendencia a la baja en el índice de Shannon-Wiener a medida que aumenta la severidad del incendio. Los sitios de control clasificados como "sin quemar" y "recrecimiento" exhiben los valores más altos de diversidad, mientras que los sitios con severidad "moderada" y "alta" presentan valores más bajos.

Para validar esta premisa, se llevó a cabo la prueba del coeficiente de correlación lineal, analizando la relación entre la severidad y el índice de Shannon-Wiener. Los resultados revelaron una correlación negativa y significativa ($r=-0.63$), indicando una tendencia inversa entre estas dos variables. A medida que aumenta la severidad del incendio, la diversidad de la vegetación tiende a disminuir (**Figura 74**).

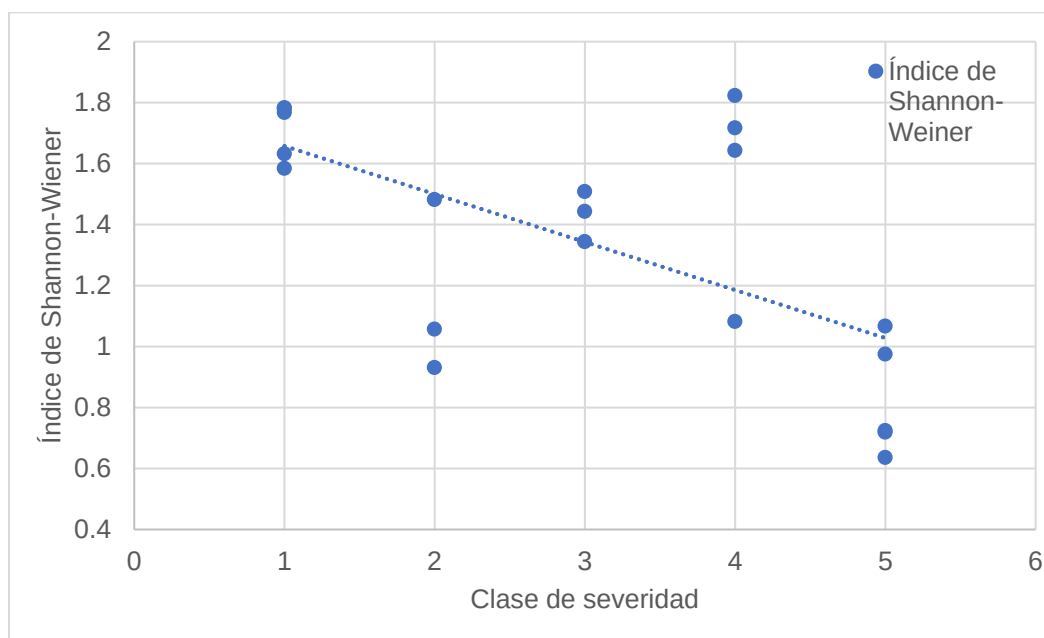


Figura 74. Coeficiente de correlación lineal.

Severidad: 1:NA No aplica-Sitios de control; 2: Recrecimiento; 3: Severidad baja; 4: Severidad moderada y 5: Severidad alta.

Se observa variabilidad en los valores de diversidad dentro de cada categoría de severidad en algunos sitios de muestreo, lo que resulta en que no se haya obtenido una correlación negativa perfecta ($r= -0.1$). Esto se debe a la influencia de factores como el tipo de vegetación, actividades antropogénicas, clima y topografía en la diversidad de especies.

Según los resultados del índice de diversidad de Shannon-Wiener, en áreas con severidad alta (valores entre 0.6359 y 1.067), se evidencia una diversidad baja en la cual se registró una riqueza entre dos y cuatro especies como *Asclepias*

curassavica, *Brachiaria fasciculata*, *Ipomea batatas* e *Ipomea petersi*. Estas áreas fueron afectadas por incendios destinados al cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias, principalmente. Los sitios con severidad alta muestran menor número de individuos y riqueza de especies, predominantemente herbáceas y plántulas.

En áreas con severidad moderada (valores de 1.082 a 1.823), la biodiversidad tiende a ser baja a media. Estas áreas fueron afectadas por escapes de incendios, manteniendo una cobertura vegetal con algunas especies arbóreas y arbustivas, ya que no se destinan a actividades agropecuarias como *Acacia cornigera*, *Bursera simaruba*, *Ipomea petersi* y *Metopium brownei*.

La categoría de severidad baja (valores de 1.3444 a 1.508) indica que estas áreas han sido quemadas superficialmente, manteniendo una riqueza de especies superior a la severidad alta y con mayor riqueza que la severidad moderada. Estas áreas se utilizan actualmente para actividades agropecuarias como el pastoreo de ganado, en el cual se mantienen ciertas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas que benefician las actividades agropecuarias o fueron áreas en donde simplemente hubo un escape de fuego.

En áreas consideradas como recrecimiento (valores de 0.9307 a 1.4820), la riqueza puede ser baja o moderada debido a múltiples quemas durante el periodo de estudio, principalmente escapes de fuego. En estos sitios de muestreo se observaron actividades agropecuarias como el pastoreo de ganado al igual que las áreas con severidad baja.

Los sitios de control muestran valores más altos (1.584 a 1.783) de diversidad en comparación con áreas afectadas por incendios. La riqueza de especies en estas áreas varía entre 6 y 8 especies, siendo evidente la presencia de incendios posteriores al periodo de estudio y sitios donde no se han registrado incendios.

En la **Figura 75** se ilustra la relación entre el número de registros (abundancia) y la riqueza de especies identificadas en sitios de muestreo con diferentes niveles de severidad de incendios. Específicamente, se observa que los sitios con severidad alta (SM9, SM11, SM16 y SM18) registraron menos individuos tanto en términos de riqueza como de abundancia. En los sitios con severidad moderada (SM3, SM5, SM15 y SM7), la riqueza y la abundancia varían, pudiendo ser bajas o altas. Los sitios con severidad baja (SM4, SM8 y SM14) presentan una riqueza intermedia y una alta abundancia. Los sitios en proceso de recrecimiento (SM1, SM2, SM10 y SM12) muestran una variación intermedia en cuanto a riqueza y abundancia de especies. Finalmente, los sitios de control (SM6, SM7, SM13, SM19 y SM20) se caracterizan por tener el mayor número de especies y abundancia, según los datos recopilados en el trabajo de campo.

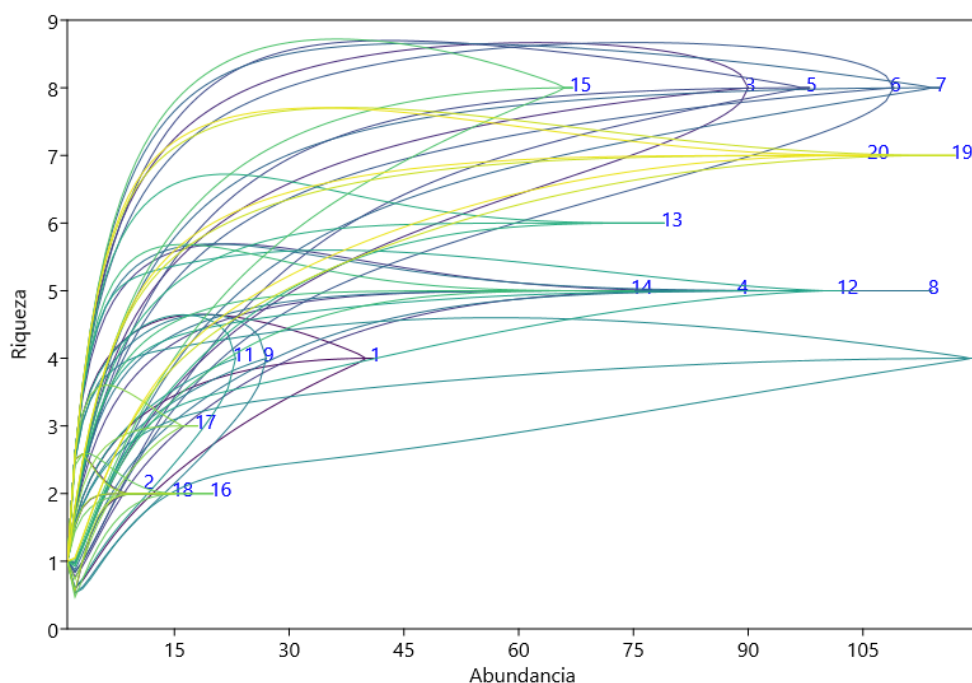


Figura 75. Relación entre la abundancia y riqueza de especies de acuerdo a la clasificación de la severidad.

Nota: Los valores representados en el gráfico corresponden a los sitios de muestreo, mientras que las líneas de colores que los conectan indican la relación entre la riqueza y la abundancia en cada sitio.

IV.8.3 *Evaluación de la desviación estándar*

Los valores de desviación estándar (**Figura 76**) obtenidos presentan una variabilidad considerable, oscilando entre 0.70171 y 34.37, indicando una dispersión significativa de los datos en los distintos sitios de muestreo.

Algunos sitios exhiben desviaciones estándar relativamente bajas, que corresponden en su mayoría a los sitios con alta severidad y severidad moderada (0.7071 a 7.8049) señalando una mayor agrupación de los datos en estas ubicaciones. Este patrón sugiere una tendencia decreciente en la desviación estándar conforme aumenta la severidad del incendio (moderada-alta). Por ejemplo, sitios con severidad moderada, como SM13 (8.29) y SM15 (7.53), pueden considerarse relacionados debido a sus desviaciones estándar similares.

Por otro lado, algunos sitios presentan valores más elevados, como aquellos clasificados sin quemar, recrecimiento y severidad baja, con rangos de 8.1547 a 34.3705. Esto indica una mayor variabilidad en los sitios que no fueron afectados significativamente por la severidad del incendio, reflejando la heterogeneidad en características como la composición de la vegetación en cuanto a riqueza y abundancia de especies.

La variabilidad en los valores de desviación estándar refleja las diferencias en el impacto del fuego en cada sitio. Sitios con desviaciones estándar más altas podrían haber experimentado menos afectación por el fuego, según las clases de severidad derivadas por el método de Jenks, resultando en mayor variabilidad en los datos. Contrariamente, la agrupación de datos es más evidente en sitios con severidad alta y media, así como en los sitios de control, indicando que las clases de severidad establecidas por el método de Jenks han identificado efectivamente las diferencias en la afectación del fuego en cada sitio de muestreo.

Las pruebas de ANOVA ($p = 0.5884$) y Kruskal-Wallis ($p = 0.2853$), utilizadas para comparar las medias de dos o más grupos, sugieren que no existen diferencias significativas entre las medianas de las muestras en términos de riqueza de especies.

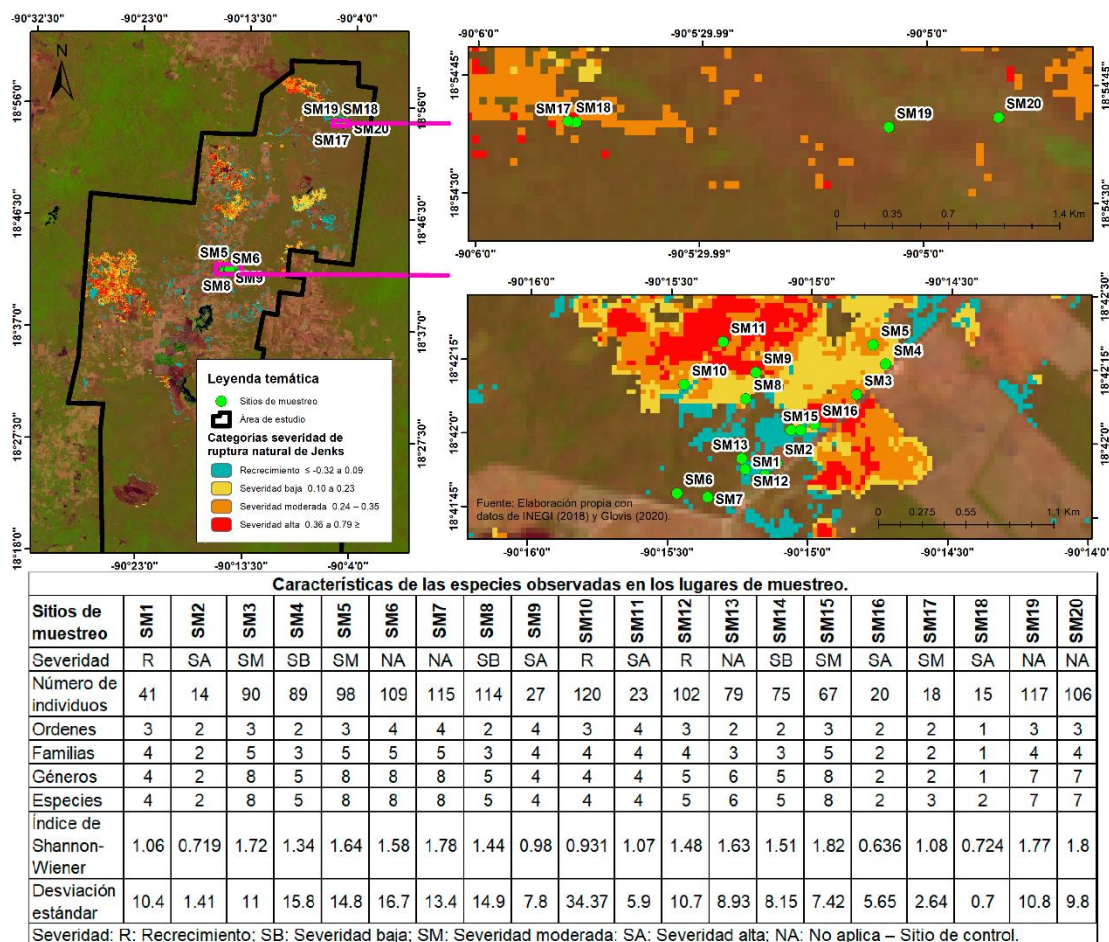


Figura 76. Ubicación y características de las especies observadas en los lugares de muestreo

IV.8.4 Análisis del Índice de Valor de Importancia

Los resultados obtenidos a través del Índice de Valor de Importancia (IVI), que evalúa la abundancia, frecuencia y dominancia de las especies dentro de una comunidad vegetal, revelan una variación a nivel familia en relación con las distintas clases de severidad y los sitios de control, como se muestra en la **Tabla 26**.

Tabla 26. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las familias registradas en las clases de severidad de incendios.

Tipo de severidad	Familia	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
Sitio de control (N/A)	Burseraceae	89	16.21	5	22.73	58.56	10.16	16.37
	Fabaceae	92	16.76	5	22.73	182.56	31.67	23.72
	Moraceae	187	34.06	5	22.73	293.14	50.86	35.88
	Sapotaceae	12	2.19	2	9.09	9.95	1.73	4.33
Total		549	100.00	22	100.00	576.42	100.00	100.00
Recrecimiento (R)	Anacardiaceae	137	57.08	3	27.27	19.90	15.48	33.28
	Burseraceae	38	15.83	3	27.27	7.54	5.87	16.32
	Fabaceae	45	18.75	3	27.27	10.67	8.30	18.11
	Moraceae	20	8.33	2	18.18	90.46	70.35	32.29
Total		240	100.00	11	100.00	128.58	100.00	100.00
Severidad baja (SB)	Anacardiaceae	95	34.17	3	33.33	6.37	0.00	22.50
	Burseraceae	20	7.19	3	33.33	0.32	3.12	14.55
	Fabaceae	163	58.63	3	33.33	3.70	35.60	42.52
Total		278	100.00	9	100.00	10.40	100.00	100.00
Severidad moderada (SM)	Anacardiaceae	123	45.05	3	17.65	1.07	53.82	38.84
	Burseraceae	18	6.59	3	17.65	0.12	5.97	10.07
	Convolvulaceae	15	5.49	1	5.88	0.00	0.00	3.79
	Fabaceae	94	34.43	4	23.53	0.74	37.11	31.69
	Malvaceae	8	2.93	3	17.65	0.02	1.17	7.25
	Sapindaceae	15	5.49	3	17.65	0.04	1.93	8.36

Tabla 26. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las familias registradas en las clases de severidad de incendios.

Tipo de severidad	Familia	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
Total		273	100.00	17	100.00	1.99	100.00	100.00
Severidad alta (SA)	Apocynaceae	24	24.24	4	30.77	0.00	0.00	18.34
	Convolvulaceae	19	19.19	3	23.08	0.00	0.00	14.09
	Poaceae	54	54.55	4	30.77	0.00	0.00	28.44
	Verbenaceae	2	2.02	2	15.38	0.00	0.00	5.80
	Total	99	100.00	13	100.00	0.00	0	66.67

En términos generales, en la clase de severidad alta en la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, la familia que destacó fue Poaceae. Esta prevalencia se atribuye al cambio de uso de suelo de selva a actividades agropecuarias en estas áreas. Poaceae (también conocida como Gramineae), con un índice de 28.44, desempeña un papel fundamental como fuente primaria de alimento para numerosos animales herbívoros. Durante la visita de campo, se observó que el ganado es el principal beneficiario de estas gramíneas, las cuales son esenciales en las actividades predominantes del área de estudio, como el cultivo de maíz para consumo y la existencia de pastizales.

En la actualidad, se constata que la quema de terrenos agropecuarios es una práctica común durante las temporadas de incendios. Esta actividad se lleva a cabo con el propósito de mantener las áreas limítrofes entre la selva y los terrenos agropecuarios. Sin embargo, la falta de un manejo adecuado en estas quemas puede resultar en escapes del fuego, afectando y comprometiendo la integridad de la selva ver **Figura 77**.



Figura 77. Cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en el área en estudio.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Sin embargo, en áreas de selva mediana subperennifolia que se han quemado con una severidad alta establecido por el método de Jenks y en donde no se realizan actividades agropecuarias, la especie dominante es la familia Convolvulaceae que

tuvo un IVI de 14.09. Esta familia agrupa a pequeñas especies de hierbas (erectas, postradas o volubles), hasta grandes líneas y árboles. En áreas donde se perdió la cobertura forestal arbórea y arbustiva, esta familia fue predominante, exclusivamente el género *Ipomea* (**Figura 78**).



Figura 78. Presencia de la familia Convolvulaceae en áreas afectadas por severidad alta y moderada.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante enero de 2024.

En la categoría de severidad moderada en la vegetación selva mediana subperennifolia y secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, la familia Anacardiaceae se destacó como la más representativa, con un 38.84%. Esta familia desempeña un papel esencial en la salud y el equilibrio de los ecosistemas, debido a su alto valor como fuente de alimento y refugio para la fauna frugívora y herbívora. Los frutos comestibles de las Anacardiaceae no solo nutren a la fauna local, sino que también facilitan la dispersión de semillas y la regeneración natural de las selvas. Además, su presencia contribuye a la protección del suelo contra la erosión, la regulación del clima local y la captura de carbono. Sin embargo, los incendios pueden tener un impacto negativo en la regeneración de las poblaciones de Anacardiaceae, especialmente en aquellas se observó monos saraguatos en árboles de la familia Anacardiaceae, donde se alimentaban y descansaban (**Figura 79**).

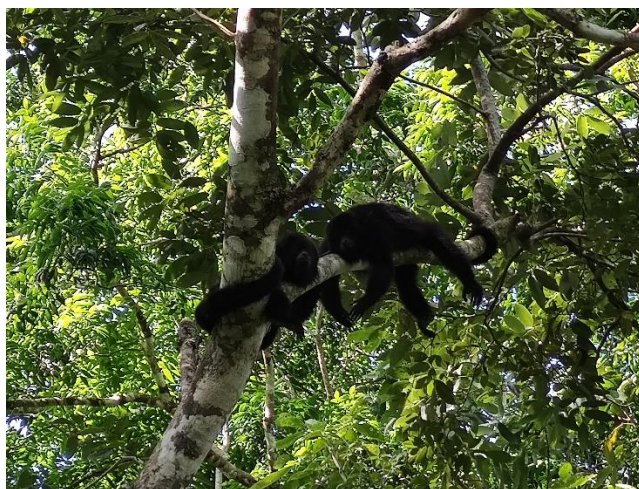


Figura 79. Presencia de monos saraguatos (*Alouatta villosa*) en especies de árboles de la familia Anacardiaceae.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

En las áreas con severidad baja en la vegetación secundaria arbórea de la selva mediana subperennifolia, la familia dominante en este tipo de incendio fue la familia Fabaceae (42.52) **(Figura 80)**.



Figura 80. Presencia de especies de la familia Fabaceae en áreas afectadas por incendios con severidad baja.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

En los sitios considerados con recrecimiento se registró la presencia de dos familias muy importantes, la familia Anacardiaceae (33.28) y Moraceae (32.29). En la visita

de trabajo de campo se observó que estas son las especies más altas y con diámetros más grandes de los sitios de control (NA), en la imagen de RPAS se puede observar cómo su cobertura sobresale del resto de la especie arbóreas presentes en los sitios de muestreo teniendo una copa redondeada que sobresale en la vegetación de selva **Figura 81.**



Figura 81. Presencia de especies de la familia Moraceae en áreas afectadas por incendios con severidad baja.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

En los sitios considerados como de control con vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, las familias con el índice de valor de importancia más alto fueron Moraceae, con un 35.88%, seguida de la familia Fabaceae (23.72%) y, en último lugar, la familia Burseraceae (16.37%). Al igual que las dos familias anteriores, esta familia proporciona alimento y refugio a una gran variedad de animales, desde pequeños insectos hasta grandes mamíferos. Las especies de burseras suelen ser más susceptibles al fuego debido a que la mayoría de ellas tienen cortezas delgadas, lo que las hace vulnerables a los incendios (**Figura 82**). Aunque en el área de estudio no fueron dominantes debido al tipo de vegetación (selva mediana subperennifolia), se observó que fueron abundantes en cada uno de los diferentes sitios de muestreo, especialmente en áreas de severidad baja a media.





Figura 82. Presencia de especies de la familia Burseraceae en el área en estudio.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

El análisis del IVI a nivel de especie muestra variaciones según las especies registradas en las áreas afectadas por incendios en diferentes clases de severidad. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las especies durante el muestreo de campo (**Tabla 27**).

Tabla 27. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las especies registradas en las clases de severidad de incendios.

Tipo de severidad	Nombre científico	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
Sitio de control (NA)	<i>Acacia cornigera</i>	8	1.457	2	5.71	0.066	0.01	2.39
	<i>Albizia niopoides</i>	24	4.372	2	5.71	82.997	14.40	8.16
	<i>Brosimum alicastrum</i>	97	17.668	5	14.29	92.678	16.08	16.01
	<i>Bursera simaruba</i>	89	16.211	5	14.29	58.559	10.16	13.55
	<i>Coulteria mollis</i>	8	1.457	2	5.71	41.112	7.13	4.77
	<i>Ficus maxima</i>	90	16.393	3	8.57	200.463	34.78	19.91
	<i>Lonchocarpus castilloi</i>	19	3.461	2	5.71	21.465	3.72	4.30
	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	11	2.004	3	8.57	8.081	1.40	3.99
	<i>Metopium brownei</i>	169	30.783	5	14.29	32.209	5.59	16.89

Tabla 27. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las especies registradas en las clases de severidad de incendios.

Tipo de severidad	Nombre científico	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
	<i>Piscidia piscipula</i>	22	4.007	2	5.71	28.839	5.00	4.91
	<i>Pouteria campechiana</i>	9	1.639	2	5.71	0.529	0.09	2.48
	<i>Thouinia paucidentata</i>	3	0.546	2	5.71	9.425	1.64	2.63
	Total	549	100.000	35	100.00	576.422	100.00	100.00
Recrecimiento (R)	<i>Acacia cornigera</i>	6	2.500	1	7.14	0.037	0.03	3.22
	<i>Brosimum alicastrum</i>	20	8.333	2	14.29	90.461	70.35	30.99
	<i>Bursera simaruba</i>	38	15.833	3	21.43	7.544	5.87	14.38
	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	18	7.500	1	7.14	0.988	0.77	5.14
	<i>Metopium brownei</i>	132	55.000	3	21.43	19.780	15.38	30.60
	<i>Piscidia piscipula</i>	21	8.750	3	21.43	9.646	7.50	12.56
	<i>Spondias mombin</i>	5	2.083	1	7.14	0.125	0.10	3.11
Total		240	100.000	14	100.00	128.581	100.00	100.00
Severidad baja (SB)	<i>Bursera simaruba</i>	20	7.194	3	20.00	0.325	3.12	10.11
	<i>Lonchocarpus xuul</i>	107	38.489	3	20.00	2.070	19.90	26.13
	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	56	20.144	3	20.00	1.633	15.70	18.61
	<i>Metopium brownei</i>	75	26.978	3	20.00	4.584	44.08	30.35
	<i>Spondias mombin</i>	20	7.194	3	20.00	1.788	17.19	14.80
Total		278	100.000	15	100.00	10.399	100.00	100.00
Severidad moderada (SM)	<i>Acacia cornigera</i>	32	11.722	3	11.11	0.132	6.65	9.83
	<i>Albizia niopoides</i>	3	1.099	1	3.70	0.000	0.00	1.60
	<i>Allophylus cominia</i>	15	5.495	3	11.11	0.038	1.93	6.18
	<i>Bursera simaruba</i>	18	6.593	3	11.11	0.119	5.97	7.89
	<i>Hampea trilobata</i>	8	2.930	3	11.11	0.023	1.17	5.07
	<i>Ipomea batatas</i>	7	2.564	1	3.70	0.000	0.00	2.09
	<i>Ipomea peteri</i>	8	2.930	1	3.70	0.000	0.00	2.21
	<i>Lonchocarpus xuul</i>	5	1.832	3	11.11	0.014	0.71	4.55
	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	54	19.780	3	11.11	0.592	29.75	20.21
	<i>Metopium brownei</i>	103	37.729	3	11.11	0.771	38.72	29.19
	<i>Spondias mombin</i>	20	7.326	3	11.11	0.301	15.11	11.18
Total		273	100.000	27	100.00	1.991	100.00	100.00
Severidad alta (SA)	<i>Asclepias curassavica</i>	24	24.242	4	28.57	0.000	0.00	17.60
	<i>Brachiaria fasciculata</i>	54	54.545	4	28.57	0.000	0.00	27.71
	<i>Ipomea batatas</i>	7	7.071	1	7.14	0.000	0.00	4.74
	<i>Ipomea peteri</i>	8	8.081	1	7.14	0.000	0.00	5.07

Tabla 27. Abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia de las especies registradas en las clases de severidad de incendios.

Tipo de severidad	Nombre científico	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
	<i>Ipomoea cordatotriloba</i>	4	4.040	2	14.29	0.000	0.00	6.11
	<i>Lantana camara</i>	2	2.020	2	14.29	0.000	0.00	5.44
	Total	99	100.000	14	100.00	0.000	0.00	66.67

En las áreas de alta severidad en áreas con vegetación de selva mediana subperennifolia y vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, las especies con el Índice de Valor de Importancia (IVI) más alto fueron *Brachiaria fasciculata* (27.71) y *Asclepias curassavica* (17.60), mientras que el género *Ipomea* obtuvo un IVI de 15.92. Estas dos especies predominan principalmente en las áreas donde se eliminó la vegetación arbórea y arbustiva (**Figura 83**).

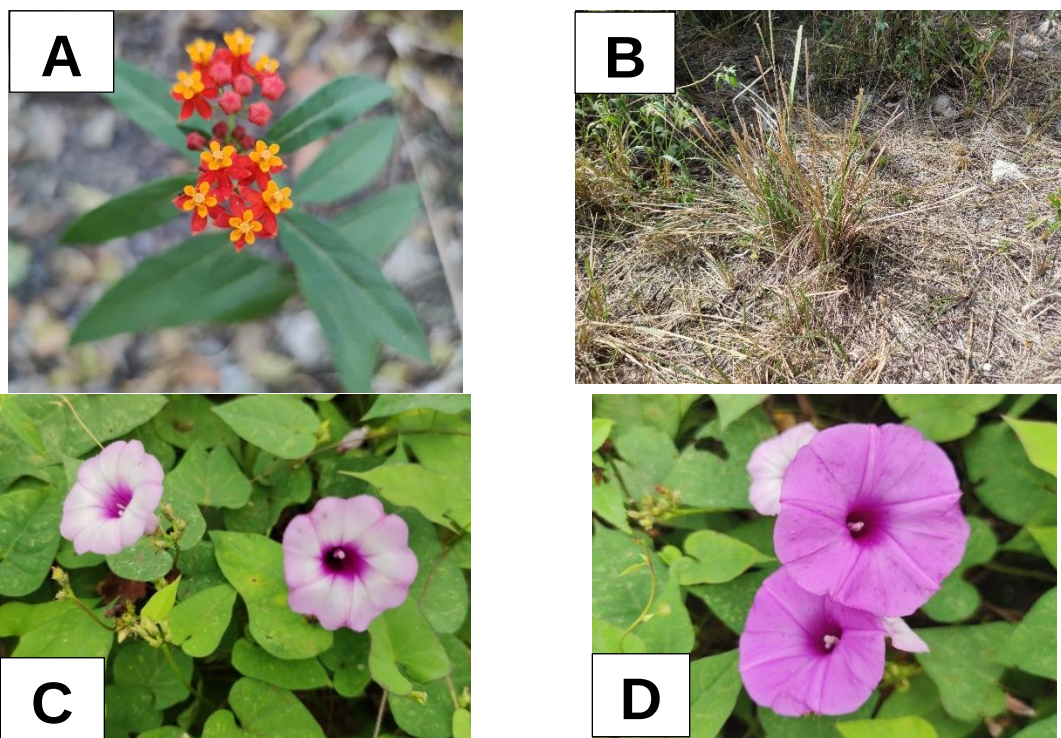


Figura 83. Especies con el IVI en la clase de severidad alta: (A) *Asclepias curassavica*, (B) *Brachiaria fasciculata*, (C y D) *Ipomea* sp.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023 y enero de 2024.

Tanto *Asclepias curassavica* como *Brachiaria fasciculata*, que son consideradas herbáceas, estuvieron presentes en las áreas de alta severidad. Por lo tanto, las áreas identificadas con alta severidad debido al cambio de uso del suelo, presentan principalmente especies herbáceas estacionales. Estas especies son beneficiosas para las actividades silvopastoriles de los habitantes del área en estudio, ya que pueden servir como forraje para el ganado o como abono para los cultivos. Su mantenimiento en el área en estudio es importante para las actividades productivas de la misma. Sin embargo, también podrían estar propiciando el escape de fuego a la selva.

El género *Ipomea*, que suele colonizar ambientes perturbados, tuvo una abundancia significativa en áreas con alta severidad de afectación. Esta especie llegó a cubrir completamente áreas donde antes existían especies arbóreas y arbustivas (Alcántar-Mejía et al., 2012). Es importante destacar que estas áreas no colindan con actividades agropecuarias, lo que podría explicar la ausencia de *Brachiaria fasciculata* y *Asclepias curassavica*.

En áreas de severidad moderada con vegetación de selva mediana subperennifolia y vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, las especies más representativas (**Figura 84**) son *Metopium brownei* (29.19), *Lysiloma latisiliquum* (20.21) y *Spondias mombin* (11.18). Por otro lado, en áreas de severidad baja, las especies con el Índice de Valor de Importancia (IVI) más alto son *Metopium brownei* (30.35), *Lonchocarpus xuul* (26.13) y *Lysiloma latisiliquum* (18.61).

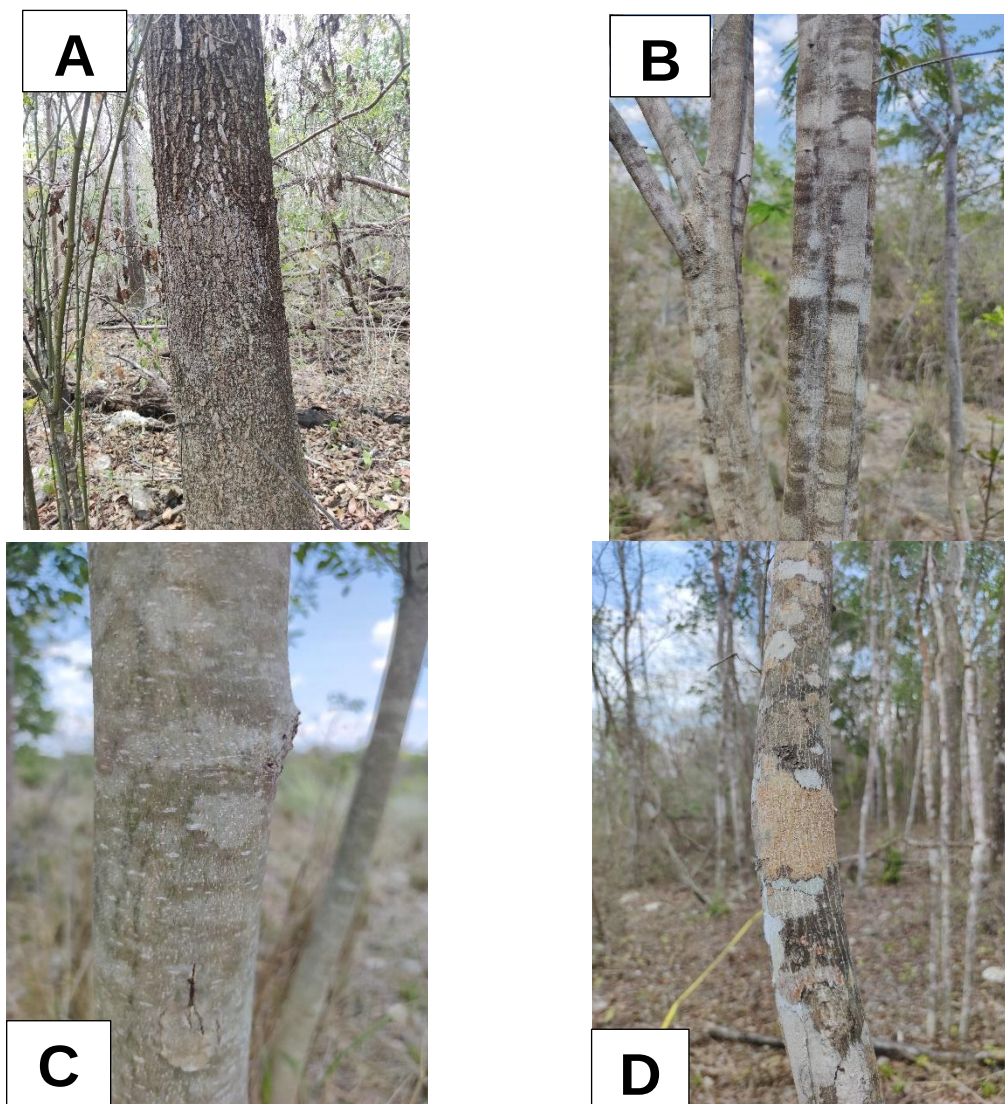


Figura 84. Especies con el IVI en la clase de severidad moderada y baja: (A) *Metopium brownei* (B) *Lysiloma latisiliquum*, (C) *Spondias mombin* y D) *Lonchocarpus xuul*.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Según el índice de severidad en con vegetación de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, tanto bajo como moderado, existen dos especies comunes: *Metopium brownei* y *Lysiloma latisiliquum*. *Metopium brownei*, también conocido como chechén prieto, es una especie de gran importancia en diversos tipos de sitios, ya que presenta un IVI alto en sitios controlados, con recrecimiento, con severidad baja y moderada.

En las áreas categorizadas como de reforestación con vegetación de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (**Figura 85**), las especies más representativas son *Brosimum alicastrum* (30.99), *Metopium brownei* (30.60) y *Bursera simaruba* (14.38). En los sitios de control, que presentan una mayor diversidad de especies, las más destacadas son *Ficus maxima* (19.91), *Metopium brownei* (16.89), *Brosimum alicastrum* (16.01) y *Bursera simaruba* (13.55).

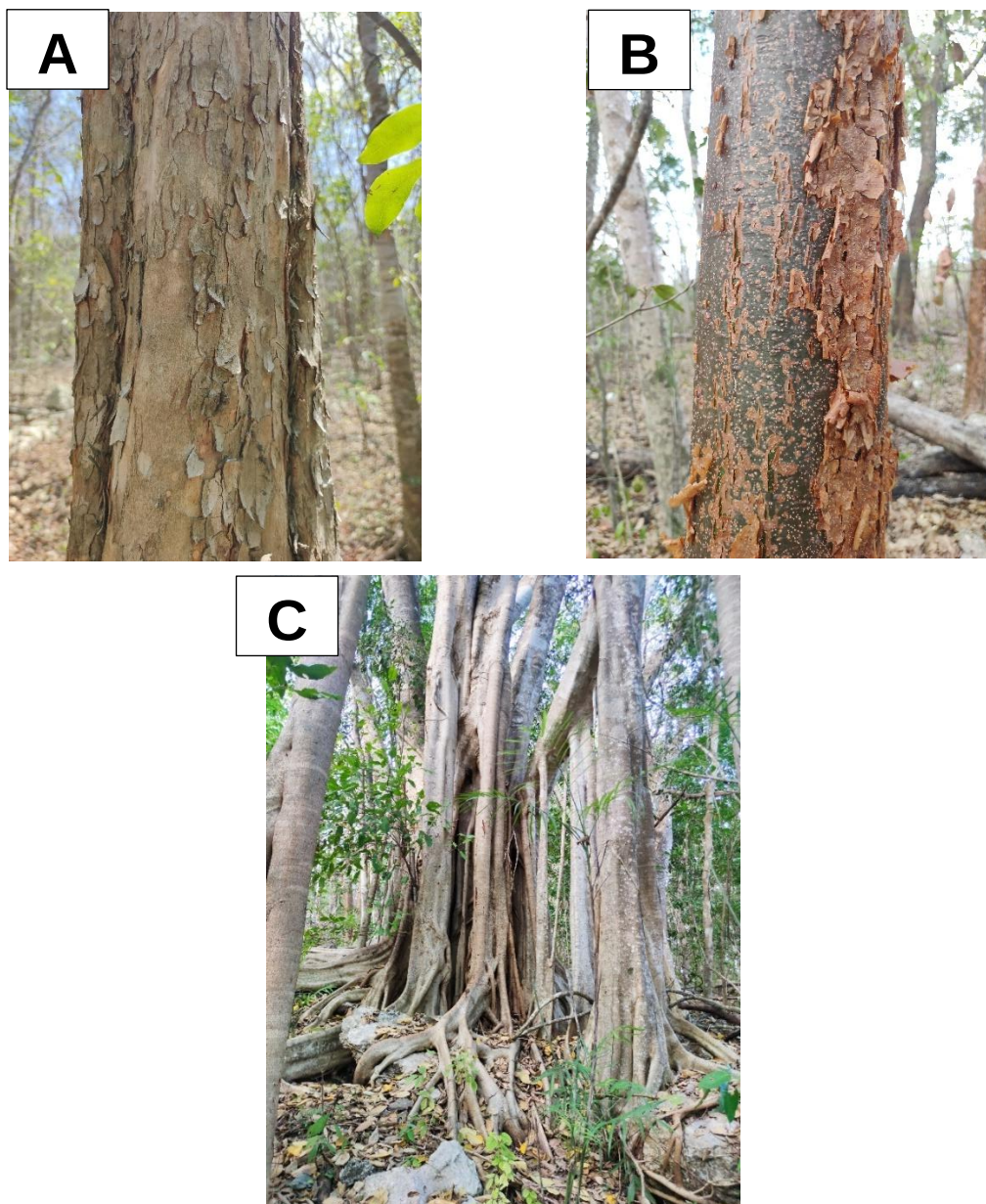


Figura 85. Especies con el IVI en la clase de severidad con reforestación y sitios de control: (A) *Brosimum alicastrum*, (B) *Bursera simaruba* y (C) *Ficus maxima*.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

El género *Ficus* (familia Moraceae) es crucial para mantener la biodiversidad de las selvas tropicales. Su presencia contribuye a la salud y diversidad del ecosistema, gracias a su gran interacción con polinizadores y su papel en la dispersión de semillas por frugívoros (Ibarra-Manríquez et al., 2012). Esta especie se encuentra principalmente en los sitios de control y con recrecimiento. Al ser uno de los árboles más altos y con mayores diámetros, puede ser menos afectado por incendios. Esto se corroboró en un área donde se utilizó fuego para cambiar el uso de la selva a la agricultura de maíz y calabaza, y este árbol no fue afectado por el fuego (**Figura 86**).





Figura 86. Área con cambio de uso de suelo para cultivo de maíz y calabaza en donde se mantuvo la presencia de la especie *Ficus maxima*.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Bursera simaruba y *Brosimum alicastrum* son otras dos especies dominantes en los sitios de control y con recrecimiento. *Bursera simaruba* tiene una alta tolerancia a la sequía y al fuego, lo que le permite sobrevivir en condiciones adversas y facilitar el establecimiento de otras especies. Ambas especies contribuyen a la restauración de suelos degradados por la agricultura y la ganadería, gracias a su alta capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y mejorar la fertilidad del suelo (Fernández et al., 2020; Hernández-Rodríguez et al., 2021).

La presencia de estas especies en diferentes grados de severidad indica su adaptabilidad y resiliencia frente a perturbaciones como los incendios. Sin embargo, su predominancia también puede alterar la dinámica del ecosistema, especialmente en términos de ciclos de fuego y regeneración de la vegetación. Es crucial mantener un equilibrio en la gestión de estas especies para asegurar la salud del ecosistema, la productividad de las actividades agropecuarias y la prevención de incendios

forestales. Esto implica un manejo cuidadoso del uso del suelo y la implementación de prácticas sostenibles de silvicultura y agropecuaria.

Por lo tanto, la gestión de la vegetación en estas áreas requiere un enfoque equilibrado que tenga en cuenta tanto las necesidades de las actividades agropecuarias como la salud y la resiliencia del ecosistema.

IV.8.5 *Análisis de las clases diamétricas*

Al analizar las clases diamétricas obtenidas de los 20 sitios de muestreo, que incluyen diferentes grados de severidad, sitios con recrecimiento y sitios de control (**Figura 87**), se observa una tendencia clara hacia la disminución del tamaño del diámetro en relación con la severidad del incendio.

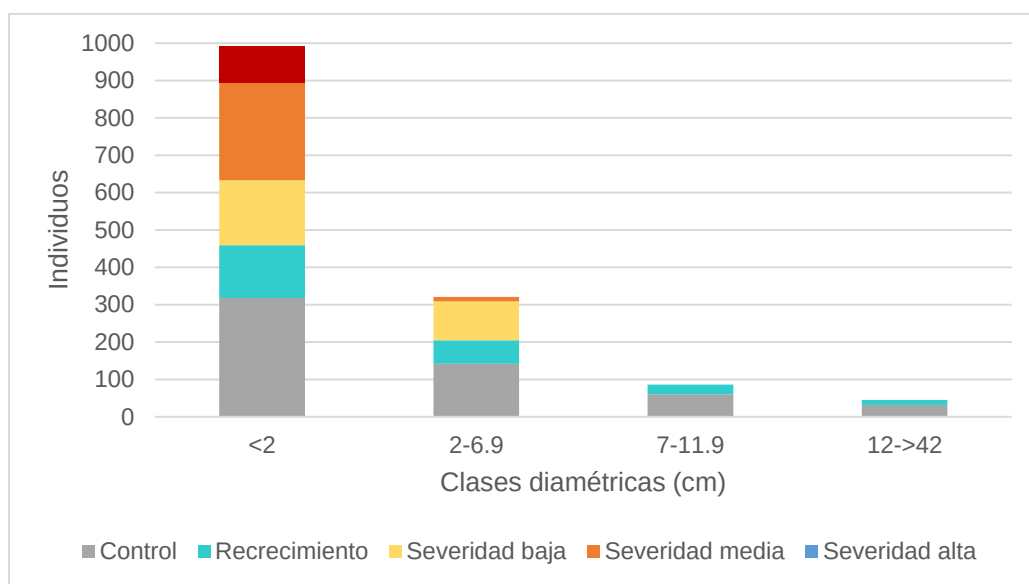


Figura 87. Distribución de las clases diamétricas agrupadas por severidad.

De acuerdo con el análisis de la proporción del diámetro (**Figura 88**) la selva, la severidad de los incendios tiene un impacto considerable en la estructura diamétrica de las especies vegetales. A medida que aumenta la severidad del fuego, se observa una disminución significativa en la proporción de árboles de mayor

diámetro, lo que refleja los efectos destructivos del fuego sobre la vegetación más establecida y madura.

En áreas no afectadas por incendios (Control), la estructura diamétrica está dominada por árboles de mayor diámetro, principalmente en las clases de 7-11.9 cm y 12->42 cm, lo que sugiere un ecosistema en equilibrio con una presencia significativa de árboles grandes y maduros. Este patrón también es evidente, aunque en menor proporción, en las áreas de recrecimiento, donde se nota una recuperación progresiva de la vegetación después de una perturbación.

Sin embargo, en áreas afectadas por incendios de baja severidad, se mantiene una proporción considerable de árboles grandes, pero hay una mayor diversidad en las clases diamétricas. Esto podría indicar que, aunque el fuego ha afectado la estructura del bosque, no ha sido lo suficientemente severo como para eliminar los árboles más grandes, permitiendo la coexistencia de varias clases diamétricas.

En contraste, en áreas donde los incendios han sido de severidad media y alta, la estructura del bosque muestra un cambio drástico. En la severidad media, predominan los árboles de diámetros menores a 2 cm, lo que sugiere una regeneración dominada por plántulas y árboles jóvenes, posiblemente debido a la mortalidad de los árboles más grandes. Este patrón se acentúa en las áreas de alta severidad, donde la proporción de árboles es baja en todas las clases diamétricas, destacando la destrucción generalizada de la vegetación debido al fuego intenso.

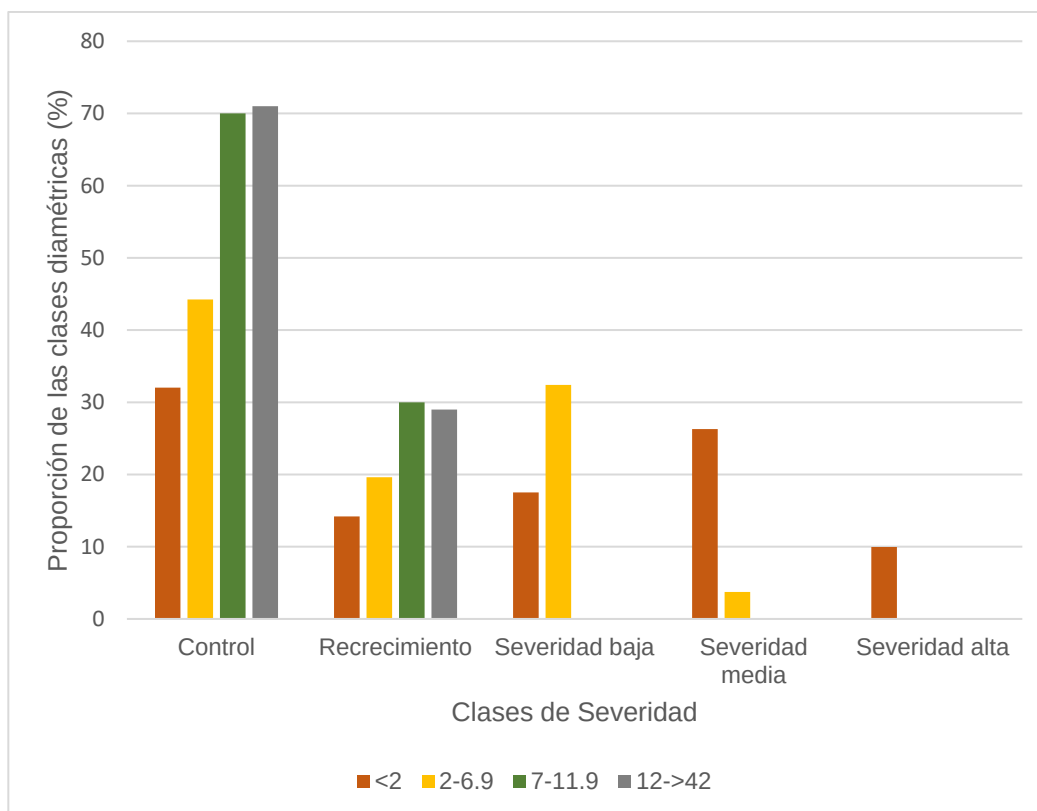


Figura 88. Proporción de las clases diamétricas agrupadas por severidad.

De acuerdo a lo observado en campo la clase de alta severidad agrupa principalmente a las especies con un diámetro menor a 2 cm (**Figura 89**). Este resultado es consecuencia de que un incendio con alta severidad tiende a eliminar los árboles más grandes. Pero también es consecuencia de las actividades antropogénicas que buscan realizar cambio de uso de suelo y tienen que eliminar los árboles en los terrenos donde se va a cultivar o para el pastoreo con el uso del fuego. Por lo que únicamente están predominando individuos de especies herbáceas. Se observó que terrenos utilizados para actividades agropecuarias son quemados para estimular el crecimiento de pasto y para evitar el crecimiento de especies que no benefician sus actividades. Áreas que se quemaron con una severidad alta y donde no se realizan actividades agropecuarias fueron cubiertas principalmente por el género *Ipomea*, que es un género que suele crecer en áreas perturbadas (Alcántar-Mejía et al., 2012).

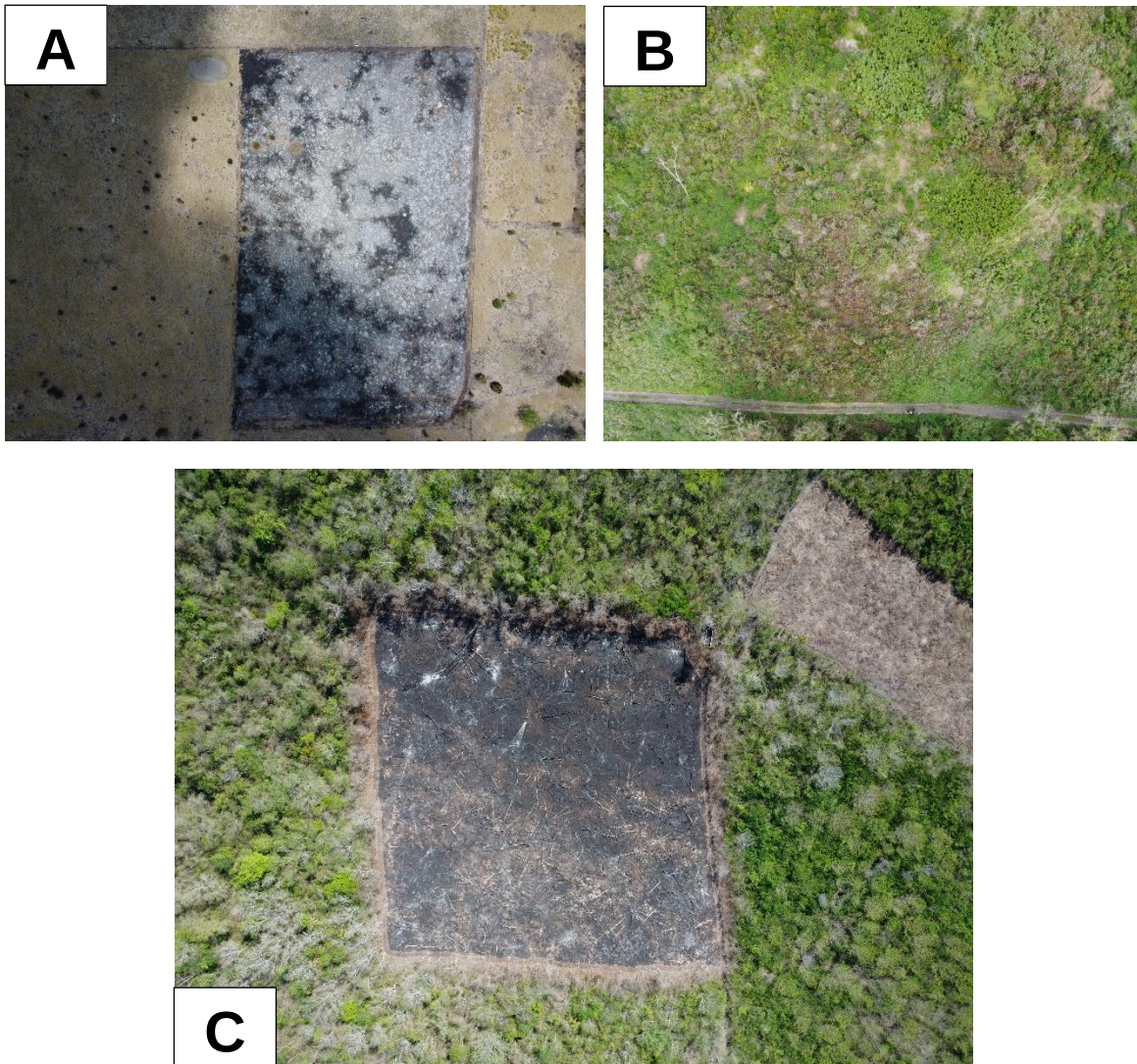


Figura 89. Vista aérea de la clasificación de severidad alta: (A) Actividades de pastoreo, (B) Escape de fuego con presencia de Ipomea y (C) Cambio de uso de suelo para cultivo.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Durante el uso de RPAS en los sitios de muestreo, se observó que en algunas áreas previamente destinadas al cultivo de maíz y afectadas por incendios de alta severidad, se está permitiendo la regeneración natural de la selva después del cultivo. Esto sugiere que no toda la vegetación de la selva en el área de estudio está destinada a la deforestación, ya que algunas zonas están siendo recuperadas naturalmente (Monzón-Alvarado et al., 2012). Esto abre la posibilidad de aprovechar estos terrenos nuevamente en un futuro (**Figura 90**).

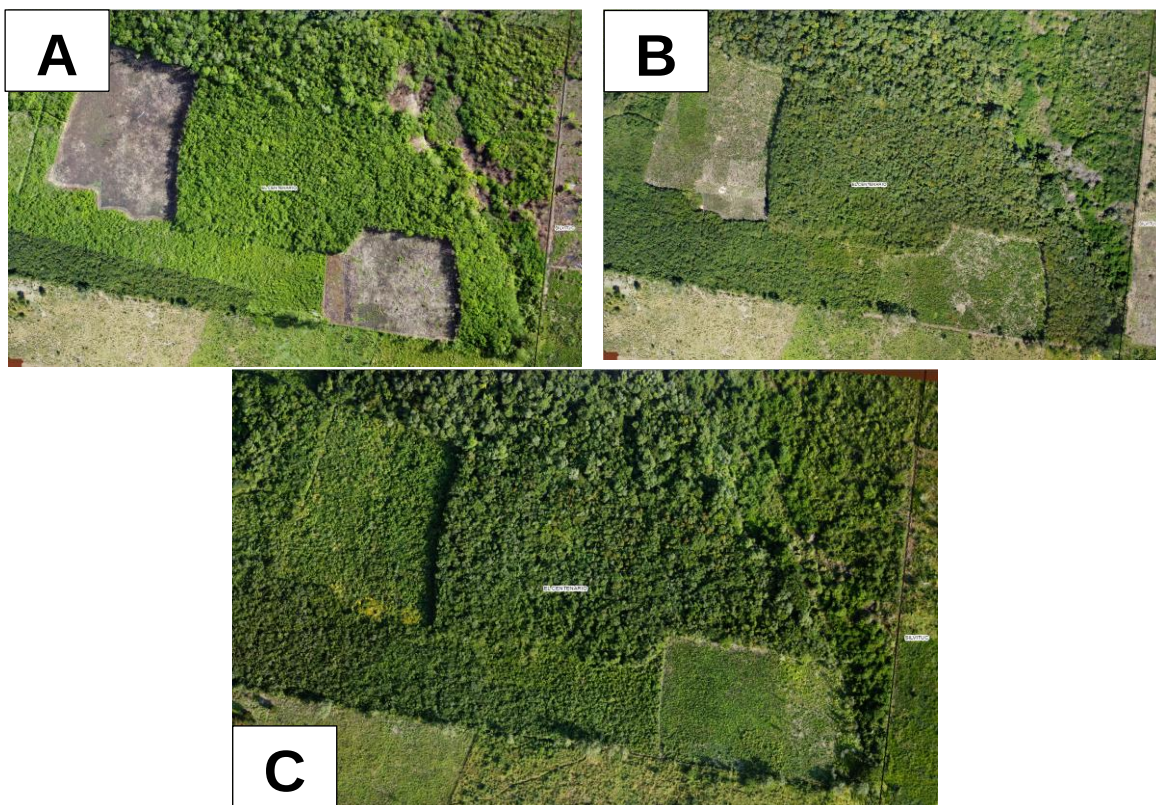


Figura 90. Vista aérea de una zona en donde se identificó como severidad alta para cambio de uso de suelo: (A) Junio-2022; (B) Mayo-2023 y (C) Enero-2024 en el ejido El Centenario.

En las clases de severidad moderada y baja, también se observa que los árboles presentan diámetros en su mayoría menores a 2 cm y entre 2 y 6.9 cm (véase **Figura 91**). En estas áreas, donde el fuego se escapó, se eliminaron los árboles con los diámetros más grandes, dando inicio a un periodo de regeneración en el que las especies arbóreas jóvenes y pequeñas son más comunes.

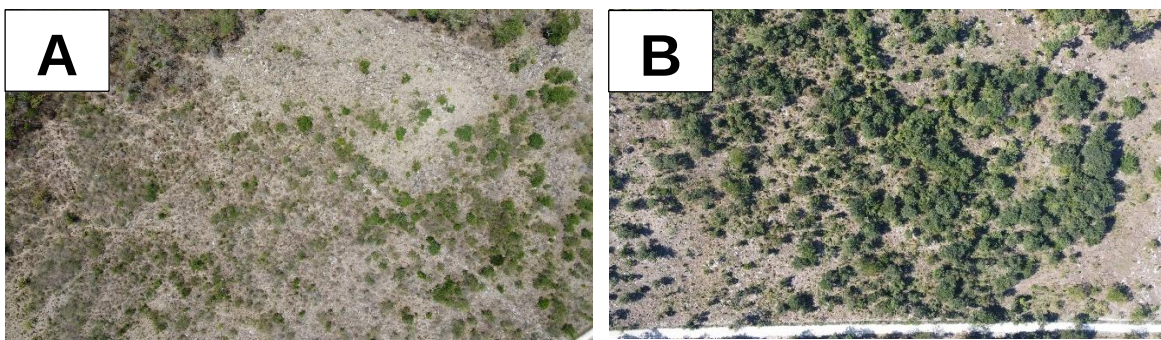


Figura 91. Vista aérea de la clasificación de severidad: (A) Moderada y (B) Baja.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Por otro lado, las clases con recrecimiento y los sitios de control presentan una mayor variabilidad en las clases diamétricas, que van desde menos de 2 cm hasta 12-16.9 cm. Sin embargo, en los sitios de control, las clases diamétricas más grandes, que van desde 17-21.9 cm hasta más de 42 cm, es donde se encuentran los árboles con los diámetros más grandes. Tres especies con los diámetros más grandes fueron *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba* y *Ficus maxima* (**Figura 92**).

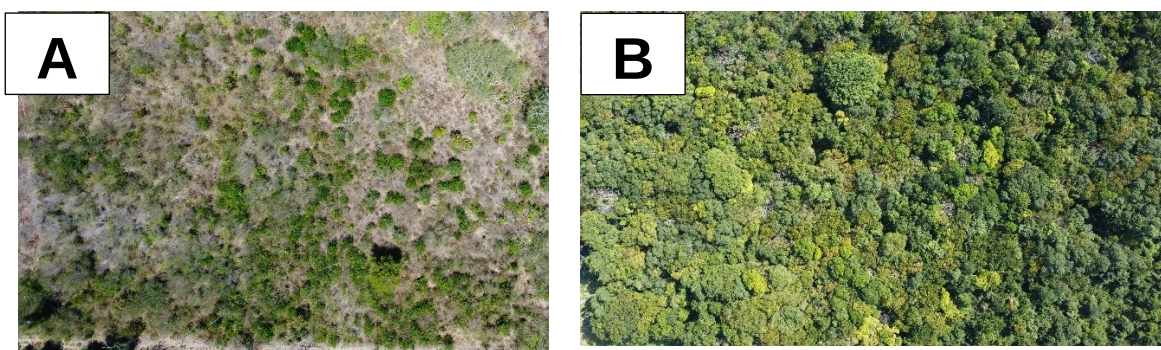


Figura 92. Vista aérea de sitios clasificados como (A) Recrecimiento y (B) Sitio de control.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Por lo tanto, la severidad del incendio tiene una influencia notable en las clases diamétricas de la vegetación afectada por diferentes grados de severidad de incendios.

Para validar las diferencias entre las clases diamétricas y la severidad se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, por ser datos no paramétricos. De acuerdo con los datos, el valor de p para la prueba de Kruskal-Wallis es 0.008215. Este valor es menor que el nivel de significancia comúnmente utilizado de 0.05, lo que indica que hay diferencias significativas entre las medianas de las muestras y su clase diamétrica de los individuos registrados y la severidad.

Para saber en qué clases diamétricas y la severidad están las diferencias significativas se aplicó la prueba post-hoc de Dunn (**Tabla 28**). Se encontraron diferencias significativas entre las medianas de los grupos “<2” y “7-11.9” ($p = 0.003797$) y “12->42” ($p = 0.002666$) que corresponden a la clase de severidad alta, moderada y baja respecto a los sitios de control y recrecimiento, respectivamente.

Estos resultados indican que hay una relación entre el diámetro de los árboles y la severidad del fuego, ya que los sitios con mayor severidad presentan árboles más pequeños o inexistentes, mientras que los sitios con menor recrecimiento a sitios de control presentan árboles más grandes o abundantes. Por lo tanto, se puede inferir que la severidad afecta negativamente el crecimiento y la supervivencia de los árboles en las selvas del área en estudio.

Tabla 28. Prueba post-hoc de Dunn de los valores de p sin corrección de las clases diamétricas.

	<2	2-6.9	7-11.9	12->42
<2		0.1013	0.003797	0.002666
2-6.9	0.1013		0.2091	0.1721
7-11.9	0.003797	0.2091		0.913
12->42	0.002666	0.1721	0.913	

Nota: Las casillas amarillas indican los valores en donde se obtuvo una diferencia significativa de las clases diamétricas.

Estos resultados sugieren que la severidad del incendio forestal puede tener un impacto en la distribución de diámetros de árboles en un sitio. A medida que

aumenta la severidad del incendio, parece haber una disminución en la cantidad de árboles en las clases diamétricas más grandes y un aumento en la cantidad de árboles en las clases diamétricas más pequeñas. De acuerdo con la propuesta de clases de severidad de Jenks, se muestra que una severidad alta tiene una ausencia de especies con diámetros mayores a <2 cm. La categoría de severidad moderada tiene una dominancia en las clases diamétricas de <2 y 2-6.9, pero principalmente las especies un diámetro menor <2 . La clase con severidad baja predomina las clases diamétricas <2 y 2-6.9, en el que predominan los individuos con diámetros entre 2-6.9. En el caso de las clases diamétricas “ <2 ”, “2-6.9” y “7-11.9” ahí se encuentran los sitios control y las áreas consideradas como recrecimiento. Sin embargo, únicamente en los sitios de control y recrecimiento están las clases diamétricas de los individuos más grandes “7-11.9” y “12->42”.

Según Morgan et al. (2014), en ciertos casos, la severidad de los incendios forestales puede inferirse únicamente a partir de la evidencia posterior al evento. Por ejemplo, al analizar las mediciones de diámetro tomadas después del incendio en árboles vivos y muertos en bosques de coníferas (un tipo de vegetación leñosa), se pudo calcular la pérdida del área basal debido al fuego. Otro ejemplo se encuentra en la vegetación del chaparral, donde el diámetro de la rama más pequeña que permanece en los esqueletos de arbustos se ha identificado como un buen indicador de la pérdida total de biomasa causada por el fuego. En áreas de trabajo con alta severidad de incendios, se encontraron individuos con diámetros mayores, lo que demostraba la presencia de una cobertura forestal con diámetros superiores en las diferentes clases de severidad de los sitios de muestreo (**Figura 93**).



Figura 93. Restos de especies arbóreas en áreas consideradas con severidad alta.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante junio de 2022.

Estos hallazgos se relacionan con los resultados de este estudio sobre la medición de las clases diamétricas en la selva. Se encontró que existe una diferencia significativa entre el diámetro y la severidad del fuego en diferentes tipos de sitios por la pérdida del área basal de las especies de selva. Por lo tanto, la propuesta de umbrales de Jenks ha permitido clasificar la severidad del fuego en la selva del área en estudio, basándose en los cambios observados en el diámetro de los árboles para los cuatro umbrales de severidad propuestos.

IV.8.6 Análisis de las clases de altura

De acuerdo con las clases de altura (**Figura 94**), la severidad alta estuvo presente únicamente en la clase de altura “<2 m”. Esto debido al uso de estas áreas para actividades agropecuarias en la mayoría de los sitios de muestreo. Sin embargo,

también hubo sitios donde había ausencia de actividades agropecuarias y la vegetación presente no alcanzó una altura superior a los 2 m. En esta misma clase se registraron especies con severidad moderada, baja, así como sitios de recrecimiento y de control que son resultado de la sucesión y reclutamiento de nuevos individuos debido a un factor de perturbación como los incendios.

La clase de altura de “2-4.9 m” registro mayormente a individuos en sitios con severidad moderada, lo que quiere decir que se quemó una parte significativa de la vegetación, pero es improbable que haya destruido completamente el ecosistema, permitiendo encontrar individuos con alturas entre los “<2”, “2-4.9 m” y “5-13.9 m” para la severidad moderada.

La clase de severidad considerada como baja presentó individuos en las clases de altura que van de “<2 m”, “2-4.9 m” y “5-13.9 m”. Lo que significa que el fuego causó daños mínimos, a diferencia de una severidad alta o moderada. Lo que permitió registrar una variación mayor de individuos con diferentes clases de altura, pero teniendo una dominancia en la clase de altura “2-4.9 m”.

En el caso de los sitios considerados con recrecimiento se observó que hubo individuos presentes en todas las clases de altura lo que significa que el efecto del fuego en esta categoría también fue mínimo, pudiendo haber quemado solo la capa superficial de vegetación, dejando intacta la mayoría de la misma. Lo que significa que la severidad del incendio en esta categoría es nula.

En el caso de los sitios control donde no aplica ninguna categoría de severidad, fue evidente que el mayor número de especies presenta alturas mayores de “5-13.9 m” y “14-> 17 m”. Sin embargo, se registró individuos con las demás clases de altura lo que corrobora el crecimiento de nuevos individuos de acuerdo la presencia de germoplasma en estas áreas que en el periodo en estudio no han presentado registro de incendios.

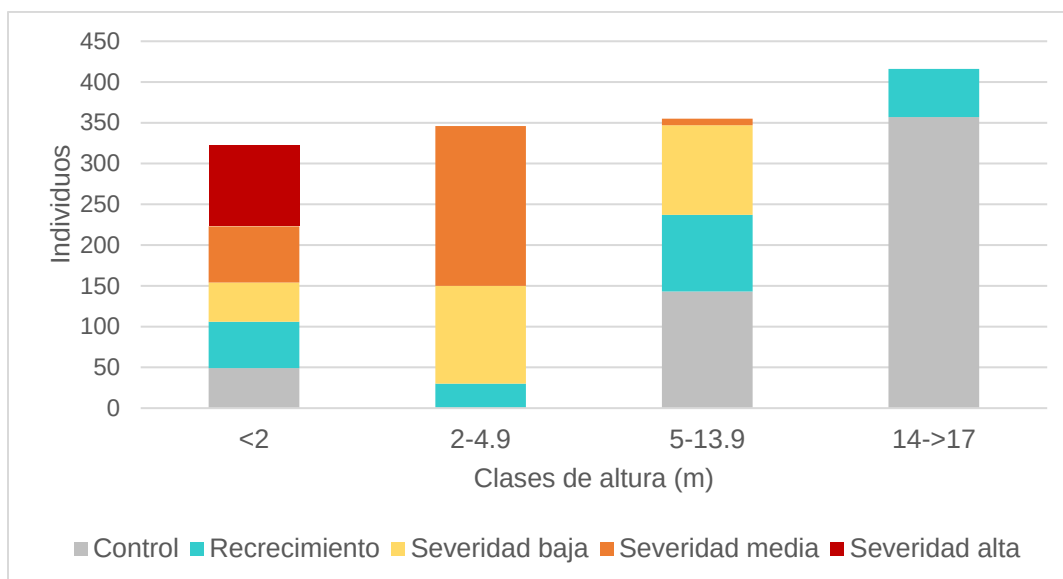


Figura 94. Clases de altura de la selva y su severidad en los sitios de muestreo.

El análisis de la proporción de las clases de altura (**Figura 95**) en relación con la severidad de los incendios revela patrones importantes en la estructura vertical de la vegetación en la selva. En las áreas no afectadas por incendios (control), se observa una predominancia de árboles altos, con una proporción significativa de vegetación en la clase de 14 metros o más, lo que indica un ecosistema estable con una estructura vertical bien desarrollada.

En áreas de recrecimiento, donde la vegetación está en proceso de recuperación tras una perturbación, la distribución de las clases de altura es más equilibrada. Aunque aún persisten árboles altos, hay una mayor presencia de vegetación más baja, lo que sugiere un proceso de regeneración en marcha.

En áreas afectadas por incendios de baja severidad, la vegetación presenta una estructura relativamente diversa, con una mayor proporción de árboles de altura intermedia (5-13.9 metros). Esto sugiere que los incendios de menor intensidad no han eliminado completamente los árboles más altos, permitiendo que se mantenga cierta estructura vertical en el ecosistema.

Sin embargo, en áreas con incendios de severidad media, se observa una disminución notable en la proporción de árboles altos, con una mayor prevalencia de vegetación en la clase de 5-13.9 metros. Esto indica que los incendios de intensidad media reducen la altura de la vegetación, afectando principalmente a los árboles más altos, mientras que los de altura intermedia sobreviven con mayor frecuencia.

En las áreas más afectadas, donde los incendios han sido de alta severidad, la vegetación está dominada por especies de menor altura (<2 metros), lo que sugiere un impacto severo del fuego. La pérdida de árboles más altos refleja la destrucción de la estructura vertical del bosque, resultando en una regeneración dominada por especies más pequeñas o plántulas.

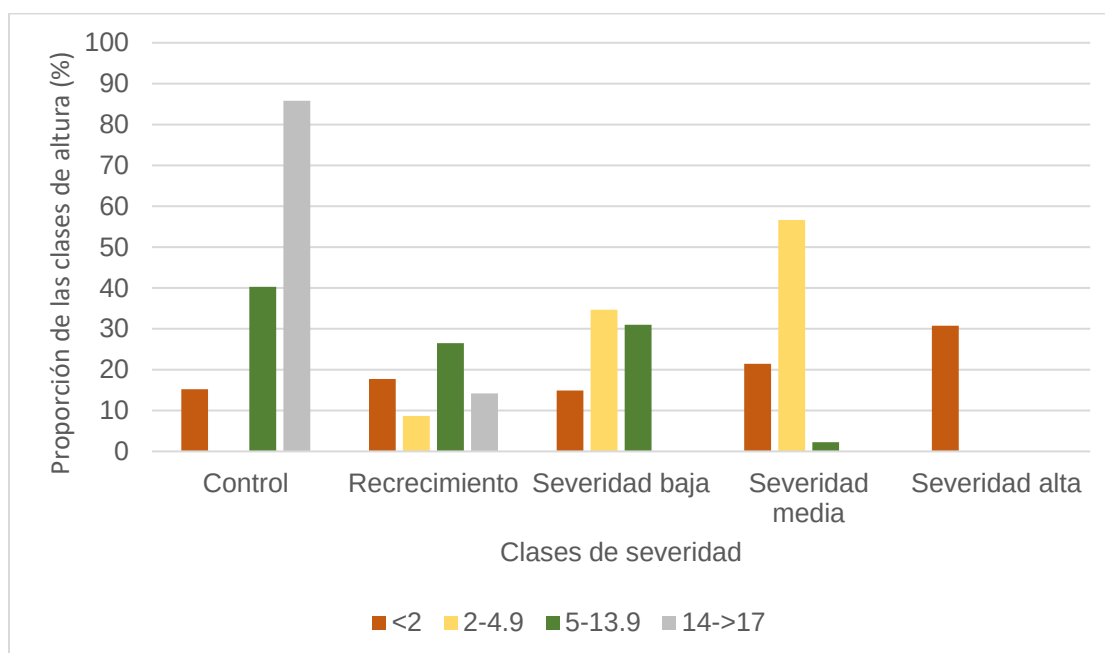


Figura 95. Proporción de clases de altura de la selva y su severidad en los sitios de muestreo.

Al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo una p de 0.6458. Lo que indica que hay una diferencia no significativa entre las medianas de las diferentes clases de altura en los sitios de muestreo.

En resumen, la aplicación del método de ruptura natural de Jenks para establecer umbrales de severidad permitió identificar diferencias significativas en la estructura, abundancia y riqueza de especies vegetales en cada uno de los sitios de muestreo dentro del área de estudio. La variabilidad en los valores de desviación estándar refleja las disparidades en el impacto del fuego, lo que sugiere que existe una diferencia en el número de individuos y la diversidad de especies entre los sitios de control con recrecimiento y baja o moderada severidad, y aquellos afectados por incendios de alta severidad en los años 2019 y 2020.

Los resultados obtenidos sugieren que el índice de Shannon-Wiener permitió evaluar el impacto del fuego en las diferentes clases de severidad propuestas por Jenks. En otras palabras, este índice fue útil para medir la diversidad de especies en los sitios de muestreo con diferentes niveles de severidad. Además, se encontró que la frecuencia de los incendios y el cambio de uso del suelo han afectado la diversidad de especies en el área en estudio.

En cuanto al índice de valor de importancia, se observó la presencia de especies específicas para cada una de las clases de severidad, así como otras que se comparten entre ellas.

Las clases diamétricas y de altura demostraron ser variables clave para identificar diferencias significativas en la vegetación dentro de los distintos umbrales de severidad de los incendios en el área de estudio. El método de ruptura natural de Jenks, aplicado al índice de quema normalizado (dNBR), permitió agrupar de manera efectiva los datos y generar rupturas de clase donde se presentan cambios significativos en la estructura de la vegetación. Este enfoque facilitó la identificación precisa de los umbrales de severidad del incendio, destacando las transiciones críticas en las características estructurales de la selva. Por lo tanto, se concluye que la combinación del dNBR con el método de Jenks fue instrumental para establecer estos umbrales, proporcionando una base sólida para evaluar el impacto del fuego en el ecosistema.

IV.9 Análisis de serie de tiempo de las áreas de selva afectadas por el fuego

El análisis de series de tiempo de las áreas de selva afectadas por el fuego es fundamental para comprender la dinámica de recuperación y los impactos a largo plazo de los incendios en los ecosistemas forestales. Este enfoque permite monitorear los cambios en la cobertura vegetal y la estructura del bosque a lo largo del tiempo, proporcionando una visión detallada de los procesos de regeneración y las posibles alteraciones permanentes en la selva. Utilizando datos satelitales y otras tecnologías de teledetección, se pueden identificar patrones de degradación, recuperación y resiliencia de la vegetación post-incendio.

La **Figura 96** presenta la ubicación espacial de los cambios en las tendencias dentro del área de estudio, destacando principalmente los ejidos como El Lechuga, El Centenario, N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos, N.C.P.A. Justicia Social y Laguna Grande, así como la Zona Federal. Estos lugares han sido objeto de solicitudes de apoyo a CONAFOR de Escárcega y Campeche para colaborar en las labores de extinción de incendios durante el período analizado (2014-2020). Se observa claramente que dentro de este área de estudio, hay una tendencia hacia el pardeamiento y el pardeamiento demorado, fenómenos que posiblemente estén influenciados por actividades antropogénicas de carácter agropecuario.

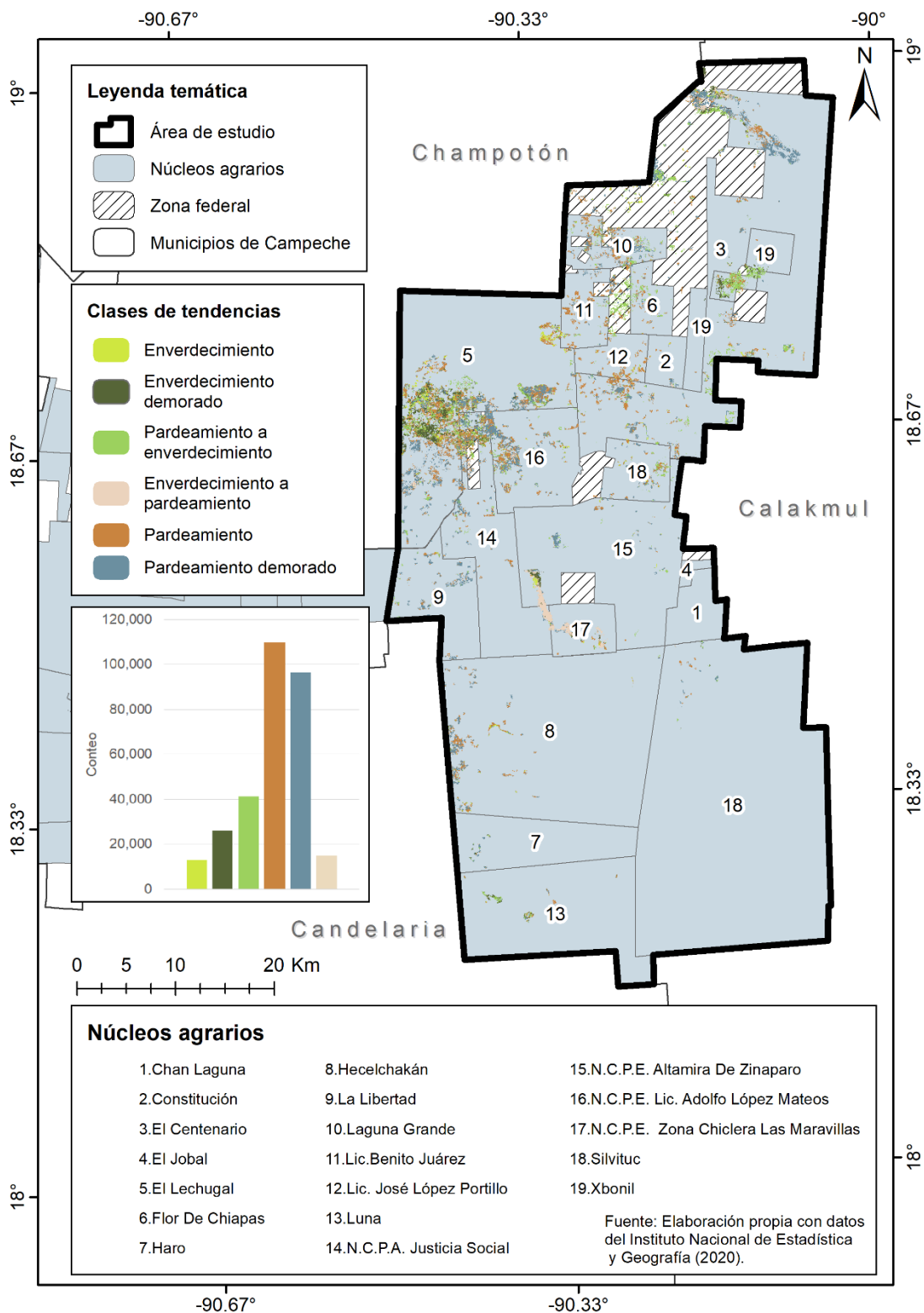


Figura 96. Distribución espacial de los tipos de tendencias de la actividad de la vegetación en las áreas afectadas por incendios.

En la **Figura 97**, se muestra un ejemplo del comportamiento de los píxeles correspondientes a las seis clases de cambios identificadas por De Jong et al. (2013) en el ejido El Centenario. Estos píxeles fueron verificados utilizando una imagen de alta resolución de Planet Labs PBC (2023). En la representación visual, se observa que los cambios en las tendencias de los valores de NDVI de los incendios identificados en áreas de vegetación de selva en el año 2019, coinciden espacialmente con las actividades agropecuarias adyacentes a dicha vegetación.

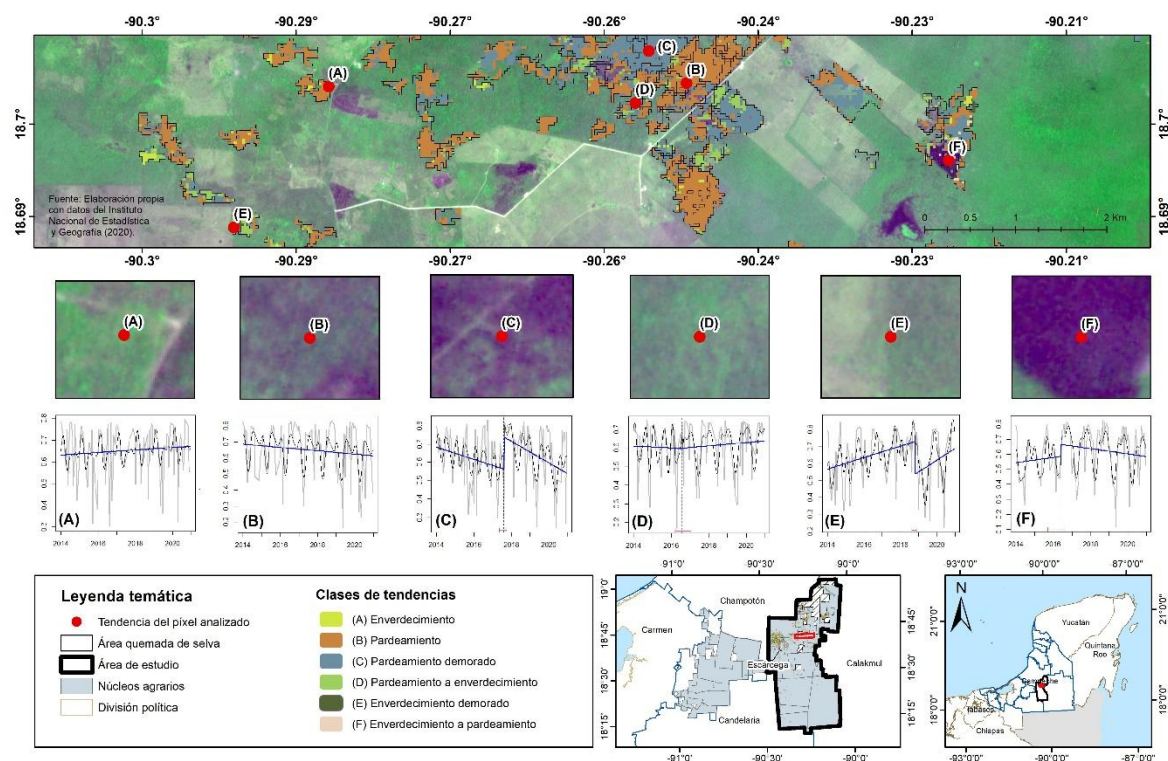


Figura 97. Ejemplos de tipos de tendencias identificados en el ejido el Centenario en el año 2019.

El enverdecimiento (A), puede ser el resultado de incendios que afectan áreas densamente cubiertas por vegetación de selva, teniendo un impacto limitado en los valores del NDVI a corto plazo. Además, estos incidentes de incendios fueron eventos únicos durante el período estudiado.

Durante los recorridos de campo realizados entre 2022 y 2024 en el área de estudio, con el apoyo de un VANT, se observaron escapes de fuego, los cuales consumieron

parte de las especies de selva. Sin embargo, se evidenció una recuperación en la vegetación de selva, con el resurgimiento de plántulas, especies herbáceas y arbustivas (**Figura 98**).

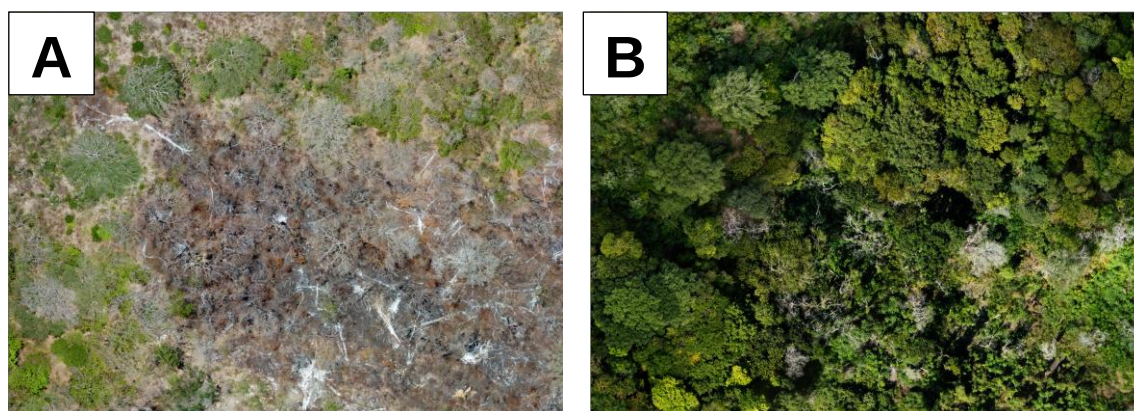


Figura 98. (A) Escape de fuego en mayo de 2023 y recuperación de la vegetación de selva en enero de 2024 (B).

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

En cuanto al pardeamiento (B), estos eventos pueden impactar gradualmente la salud del ecosistema de selva, evidenciándose en una disminución progresiva de los valores del NDVI. Esta reducción en el NDVI sugiere una disminución en la densidad y vitalidad de la vegetación en las zonas afectadas (**Figura 99**).

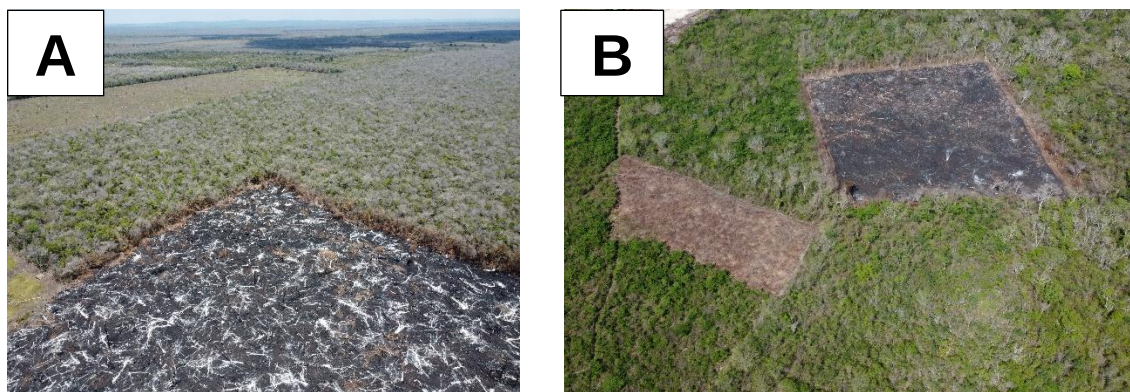


Figura 99. En la imagen (A) y (B) se muestra el cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en la que se utilizó el fuego para remover la vegetación de selva.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

Por otro lado, el fenómeno del pardeamiento demorado (C) se evidencia cuando la selva es utilizada temporalmente para cultivos y luego abandonada para su recuperación natural. Esta práctica, conocida como roza, tumba y quema, permite aprovechar la fertilidad del suelo en ciclos, alternando entre diferentes cultivos. Esta tendencia ha sido observada tanto durante el período de estudio (2014-2020) como en etapas posteriores, y se ha corroborado con el respaldo de un VANT en las labores de monitoreo (**Figura 100**).

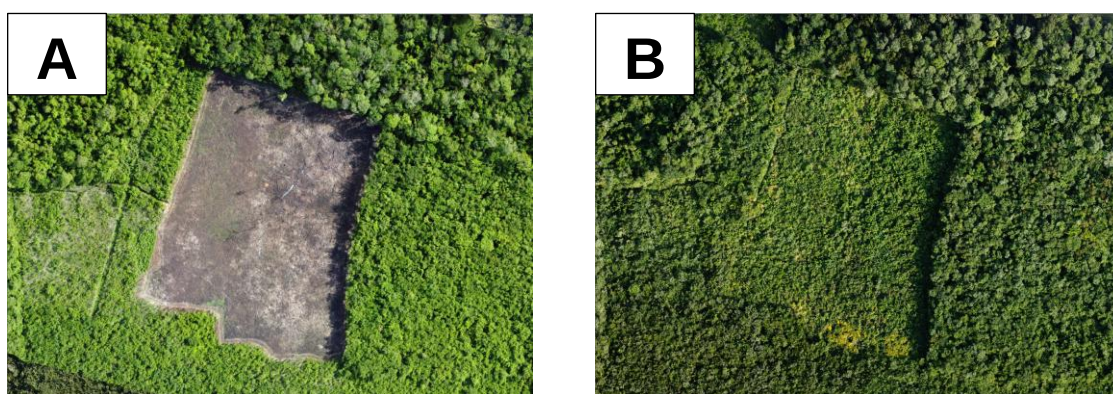


Figura 100. En la imagen (A) se muestra el cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias en 2022; en la imagen (B) se muestra la revegetación del área en 2024 en el ejido El Centenario.

En contraste, en áreas donde la vegetación de selva ha sido afectada por incendios que resultaron en la pérdida de cobertura arbórea, el fenómeno del pardeamiento a

enverdecimiento (D) muestra una rápida recuperación de los valores del NDVI. Esto se atribuye probablemente al crecimiento de especies herbáceas o arbustivas que surgen después del incendio. En la **Figura 101** se muestra un área dividida por un camino de terracería. En el lado izquierdo, se perdió la cobertura arbórea, compuesta principalmente por árboles de Cantemo (*Albizia niopoides*), debido a un escape de fuego en 2020. Según la fotografía tomada en 2024, el área está en una fase de recuperación (reverdecimiento), dominada por vegetación herbácea y arbustiva. Este cambio refleja la transición de una tendencia de pardeamiento (incendio) a enverdecimiento (recuperación).



Figura 101. Transformación de cubierta arbórea a vegetación herbácea tras pérdida por incendio en 2020.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante enero de 2024.

En el caso del enverdecimiento demorado (E), estos sitios parecen experimentar una recuperación más lenta de la cobertura vegetal. Las observaciones de campo sugieren que esto podría deberse a su uso agrícola, en particular para el cultivo de milpa. En estos terrenos, se realizan quemas anuales para limpiar el área, y el cultivo se rota hacia otras zonas de la selva, con la posibilidad de utilizar la misma área durante dos años consecutivos antes de abandonarla para permitir su recuperación. Por otro lado, en áreas donde la selva ha sido eliminada mediante incendios para dar lugar a actividades agropecuarias que muestran una tendencia de enverdecimiento a pardeamiento (F), siempre se observará una disminución en los valores del NDVI después del cambio de uso del suelo, ya que estas áreas son continuamente utilizadas para el pastoreo de ganado o para cultivos (**Figura 102**).



Figura 102. Actividades agropecuarias en el área en estudio.

Fotografías tomadas en el ejido El Centenario durante mayo de 2023.

La **Tabla 29** ofrece una visión general de las tendencias de cambio observadas en el área de estudio. Como se puede apreciar, la mayoría de los píxeles exhiben una tendencia hacia el pardeamiento (36%) y el pardeamiento demorado (33%). Estos resultados sugieren que los incendios registrados durante el período de estudio

(2014-2020) han ocasionado una significativa disminución en la tendencia positiva de los valores del NDVI en la vegetación de selva de la región estudiada.

No obstante, es relevante destacar las categorías de pardeamiento a enverdecimiento (14%) y enverdecimiento demorado (9%). Estos hallazgos podrían sugerir una posible recuperación de la vegetación de la selva, probablemente impulsada por especies vegetales resistentes al fuego. Estas especies, adaptadas a condiciones de incendios recurrentes, podrían estar desempeñando un papel crucial en la restauración y regeneración de la flora nativa. Durante las observaciones de campo en áreas afectadas por incendios, se identificó la presencia de especies como *Bursera simaruba*, *Metopium brownei*, *Acacia cornigera* y *Lysiloma latisiliquum*. Los muestreos de vegetación en estas áreas han proporcionado datos importantes, los cuales se presentan en esta investigación. Además, es importante considerar que estos cambios también pueden ser el resultado de eventos de fuego aislados, que no han tenido un impacto significativo en la vegetación de selva circundante.

Tabla 29. Tendencia de los cambios en la región oriental del municipio de Escárcega.

Inciso	Tendencias del NDVI	Cambios	Porcentaje
A	Enverdecimiento	12,736	4
B	Pardeamiento	109,790	36
C	Pardeamiento demorado	100,364	33
D	Pardeamiento a enverdecimiento	41,345	14
E	Enverdecimiento demorado	26,078	9
F	Enverdecimiento a pardeamiento	14,803	5
Total		305,116	100

Los resultados obtenidos sugieren que la mayor parte de los cambios en la actividad vegetal en la región oriental del municipio de Escárcega se asocian principalmente con procesos de pardeamiento o pardeamiento demorado. Esta tendencia podría indicar una posible disminución en la salud y densidad de la vegetación en la zona, atribuible a los efectos de los incendios. Sin embargo, también se observan

transiciones de pardeamiento a enverdecimiento y enverdecimiento demorado, lo que sugiere una potencial recuperación en ciertas áreas.

Esto subraya la idea de que, independientemente de las características específicas del incendio, estos pueden tener tanto impactos negativos como positivos en la vegetación del área estudiada. Es evidente que los incendios forestales han dejado una marca significativa en la salud y densidad de la vegetación en estas zonas. Tras un incendio forestal, es común observar una reducción en el NDVI debido a la pérdida de vegetación; sin embargo, con el paso del tiempo, la vegetación puede regenerarse y el NDVI recuperarse, mostrando nuevamente signos de vitalidad.

IV.9.1 Tendencias anuales

El análisis anual de las tendencias muestra una fluctuación en los distintos procesos de enverdecimiento y pardeamiento a lo largo de los años, con picos importantes en 2016, 2019 y 2020. Estos picos coinciden con un mayor conteo en los procesos de pardeamiento y enverdecimiento a pardeamiento, lo que sugiere que en esos años hubo incendios más severos o de mayor frecuencia, afectando de forma significativa la vegetación de la selva. Aunque hay señales de recuperación vegetal (enverdecimiento), en algunos años como 2019 predominan las pérdidas de vegetación (pardeamiento), lo que indica que los incendios han tenido un impacto importante en la cobertura vegetal (**Figura 103**). Es evidente que el año 2019 destaca mostrando el valor más alto de pardeamiento, lo que puede sugerir un evento o eventos significativos de incendios que causó una degradación considerable de la vegetación.

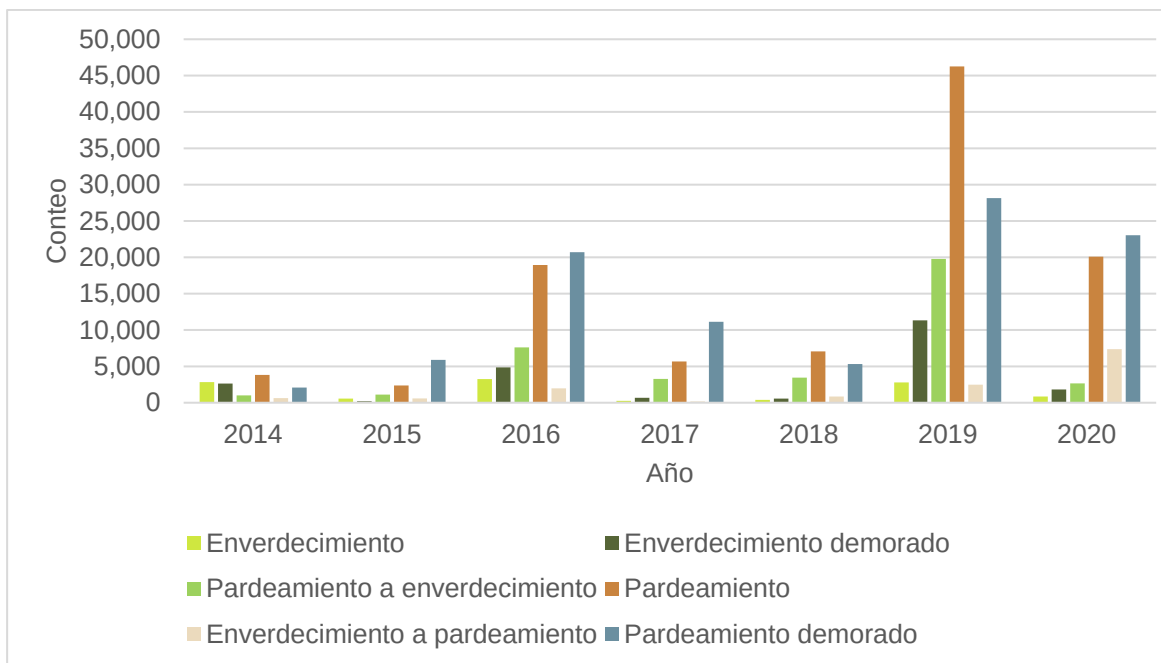


Figura 103. Tendencias del NDVI en selva para periodo de estudio.

Tomando como ejemplo el año 2019 (**Figura 104**), se identificaron tres áreas quemadas que mostraron diferentes tendencias en la vegetación de la selva, determinadas por la naturaleza del incendio.

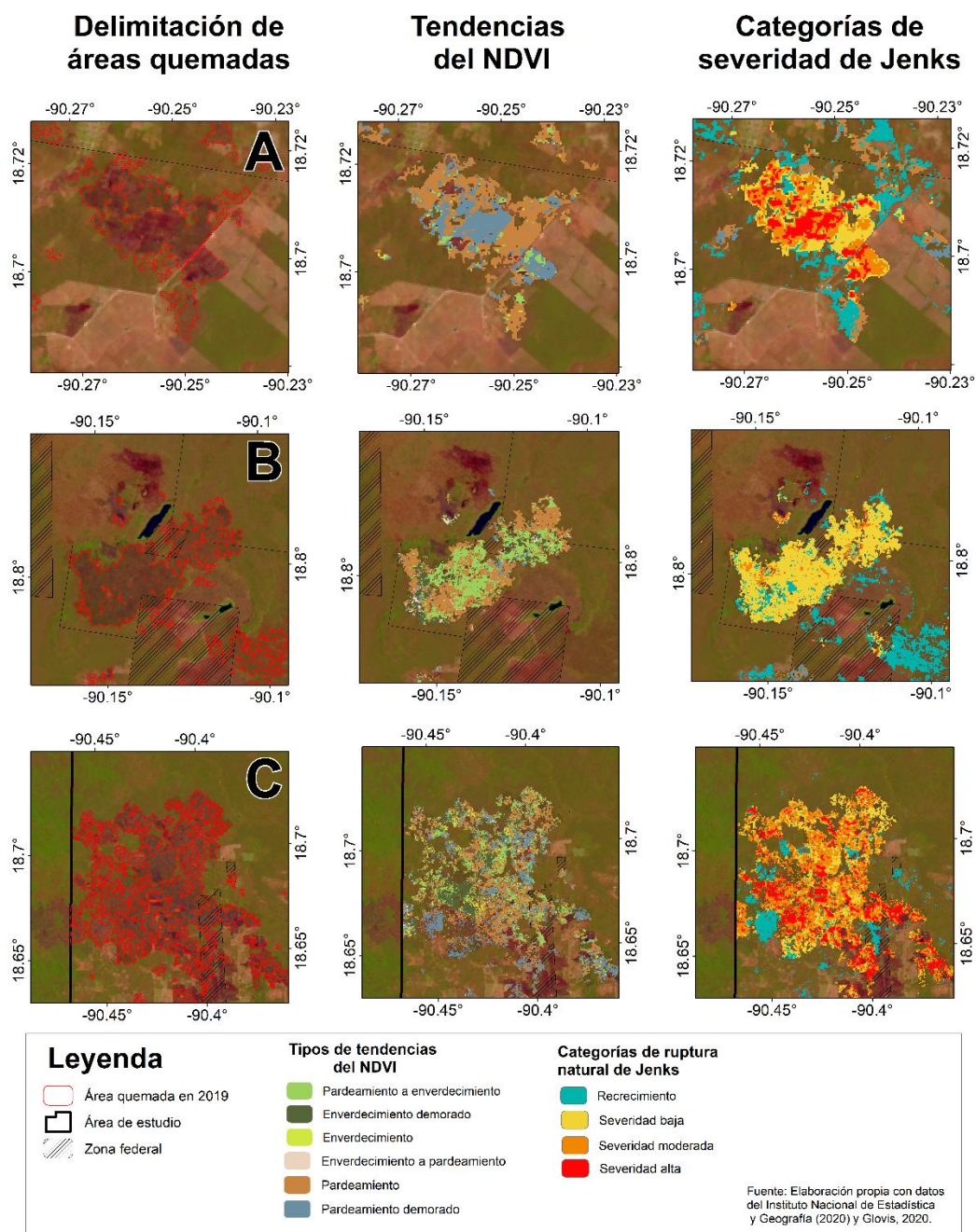


Figura 104. Ejemplos de las tendencias del NDVI en selva para el año 2019 A (cambio de uso de suelo); B (quema por cacería) y C (escape de fuego).

En el sitio A, se observó un cambio de uso de suelo hacia actividades agropecuarias. En esta zona, las tendencias del NDVI mostraron un predominio del pardeamiento, lo que indica una pérdida significativa de vegetación. Este resultado es consistente con el análisis de severidad, en el que la mayor parte de las áreas

aparece en rojo, lo que señala una severidad alta. Esto es coherente con el cambio de uso de suelo, ya que los incendios intencionales para desmonte suelen ser de alta severidad, como también se pudo corroborar durante el trabajo de campo.

Por otro lado, en el sitio B, el incendio fue provocado por actividades de cacería, donde el fuego afectó el área de manera más dispersa. El análisis de las tendencias del NDVI muestra un predominio de zonas con enverdecimiento, lo que indica que gran parte de la vegetación está en proceso de recuperación, probablemente incentivada por la regeneración de vegetación que atrae a las presas. En cuanto al análisis de severidad, predominan las áreas con severidad baja (amarillo) junto con algunas zonas de recrecimiento (azul). Esto sugiere que el incendio, asociado con la caza, fue de baja intensidad, permitiendo una recuperación más rápida de la vegetación.

En el sitio C, se registró un escape de fuego que afectó una extensión mayor y más heterogénea del terreno, lo que corresponde a un incendio no controlado. El análisis de tendencias del NDVI muestra una combinación de pardeamiento y enverdecimiento demorado, lo que indica que, en algunas áreas, la recuperación de la vegetación está siendo lenta. El análisis de severidad señala una severidad moderada (naranja), con áreas de severidad alta en el centro de la zona afectada. Esto sugiere que, aunque el incendio causó daños significativos, su impacto no fue tan severo como en el sitio A.

Durante el periodo 2014-2020, la vegetación de las selvas afectadas por incendios mostró ciclos de degradación y recuperación, con algunos años específicos (2016, 2019 y 2020) donde los efectos de los incendios fueron más severos. Este análisis permite comprender cómo los distintos tipos de eventos de fuego y las actividades humanas influyen en la vegetación de la selva y su capacidad para recuperarse en diferentes áreas.

IV.9.2 *Tendencias por tipos vegetación*

Al analizar la **Figura 105**, podemos observar una gran variabilidad en la cantidad de cambios en cada categoría para cada tipo de vegetación. Por ejemplo, en la selva baja espinosa subperennifolia, se observaron más cambios en las categorías de pardeamiento y pardeamiento demorado que en las categorías de enverdecimiento y enverdecimiento demorado. Esto sugiere que esta selva ha experimentado más cambios negativos que positivos.

Por otro lado, en la selva mediana subperennifolia, se observaron más cambios en las categorías de enverdecimiento y enverdecimiento demorado que en las categorías de pardeamiento y pardeamiento demorado. Esto sugiere que esta selva ha experimentado más cambios positivos que negativos.

En cuanto al análisis por tipo de vegetación, podemos notar que en los cuatro tipos de vegetación existe una tendencia dominante hacia el decaimiento de los valores del NDVI, siendo el pardeamiento y el pardeamiento demorado las tendencias más comunes. Es importante mencionar que, según el INEGI, en la vegetación primaria se ha observado un incremento importante del decaimiento de la tendencia del NDVI. Esto es preocupante ya que indica que los incendios están teniendo un efecto negativo en la vegetación considerada como conservada del área en estudio.

En la vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia no se observa una recuperación en la tendencia del NDVI. En cambio, en la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia se observa una tendencia hacia el pardeamiento a enverdecimiento como clase dominante de recuperación. Esto indica que la severidad del fuego y su recuperación dependen del estrato arbóreo o arbustivo. La recuperación del NDVI estaría determinada por el estado de conservación y los estratos de la selva.

En resumen, los resultados de la tabla muestran una gran variabilidad en la cantidad y el tipo de cambios observados en la vegetación de diferentes tipos de selva. Algunas selvas han experimentado más cambios negativos que positivos, mientras que otras han experimentado más cambios positivos que negativos.

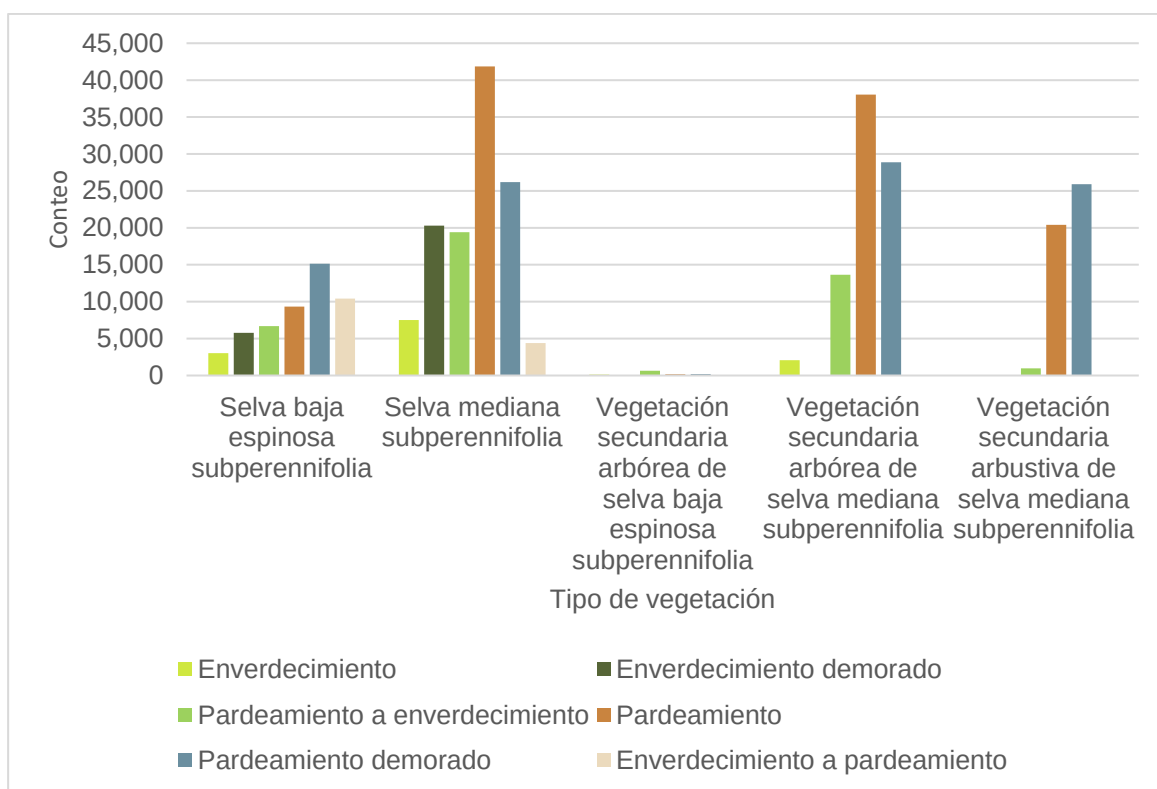


Figura 105. Tendencias de la actividad por tipo de vegetación.

En general, se evidencia una tendencia predominante hacia el deterioro de los valores del NDVI en los cuatro tipos de vegetación analizados, con incrementos notables en los años 2016, 2019 y 2020, donde el pardeamiento y el pardeamiento demorado se presentan como las tendencias más comunes. Este hallazgo, respaldado por datos del INEGI, indica un aumento significativo en el deterioro de la vegetación primaria, lo que sugiere un impacto negativo de los incendios en la vegetación conservada del área de estudio, según el análisis de las tendencias de los valores del NDVI.

Además, se destaca que la recuperación del NDVI está influenciada por el estrato arbóreo o arbustivo. Mientras que en la vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia no se observa una recuperación evidente, en la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia se observa una tendencia hacia el pardeamiento a enverdecimiento como principal clase de recuperación. Esto sugiere una estrecha relación entre la severidad del fuego y su recuperación, que está vinculada al estrato vegetal y al estado de conservación de la selva.

IV.9.1 Tendencias por ejido

Al analizar por núcleo agrario, se constata que todas las áreas de estudio exhiben una marcada presencia de las tendencias de pardeamiento y pardeamiento demorado, lo que sugiere que el uso del fuego y los escapes hacia la selva están teniendo un impacto adverso en los valores del NDVI (ver **Figura 106**). Este patrón revela una posible disminución en la salud y densidad de la vegetación de selva en los ejidos. Tales tendencias negativas podrían indicar que las actividades humanas están ocasionando incendios forestales con fines de aprovechamiento, cambios en el uso del suelo o debido a un manejo inadecuado del fuego durante las quemas, lo que resulta en escapes no deseados. Sobre todo en los ejidos como El Lechugal, El Centenario y N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos.

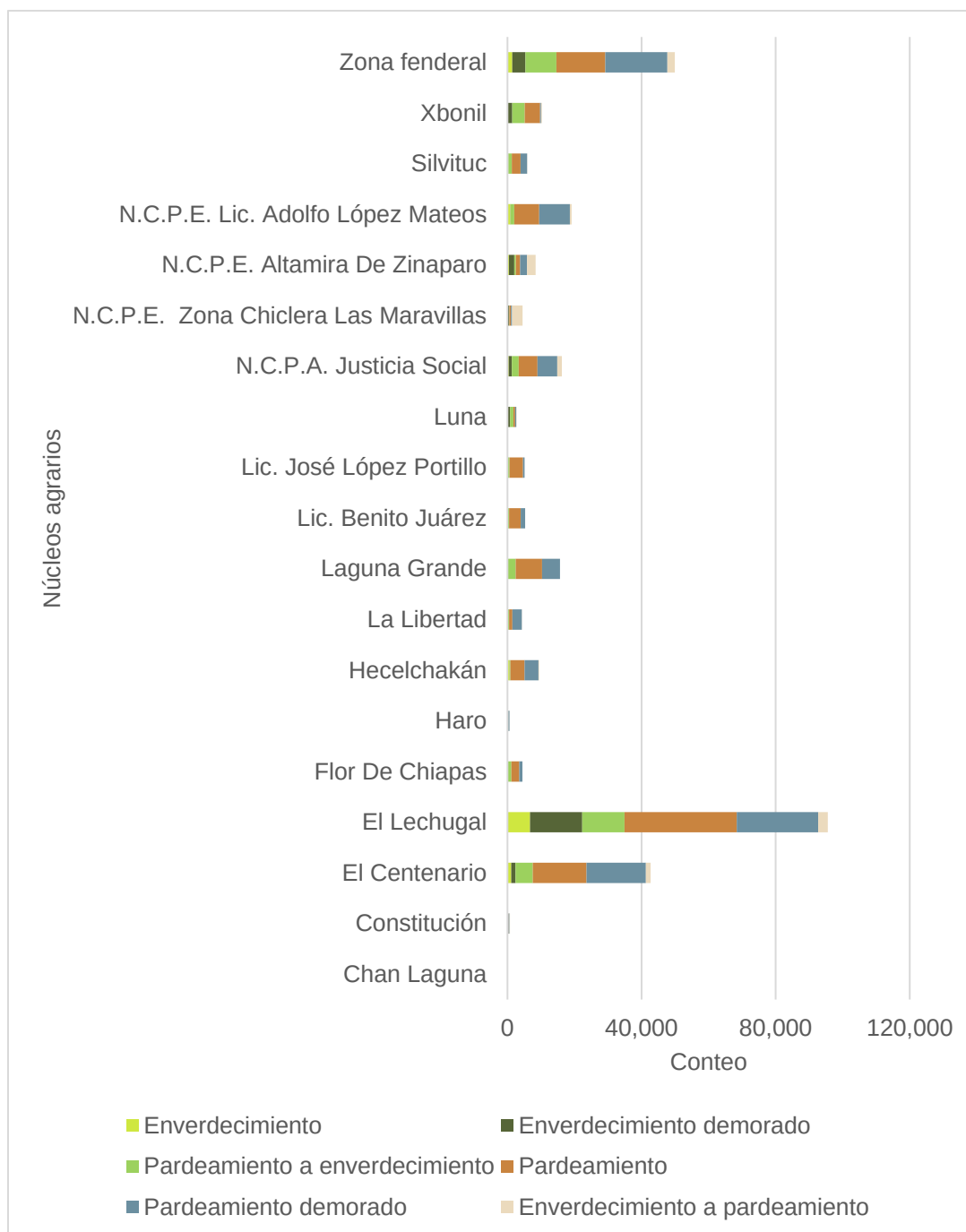


Figura 106. Tendencias de la actividad de la vegetación en las áreas afectadas por incendios de los ejidos.

Durante el recorrido de trabajo de campo en la zona federal dentro del área de estudio, se observó que las tendencias identificadas como pardeamiento y pardeamiento demorado se relacionan directamente con el uso del fuego para

establecer asentamientos humanos, como se evidencia en la **Figura 107**. Esta conclusión se sustenta en el análisis de imágenes satelitales y en las observaciones realizadas durante el trabajo de campo. Durante este proceso, se pudo constatar la utilización del fuego por parte de los habitantes provenientes de Chiapas, específicamente en la localidad de Licenciado Andrés Manuel López Obrador, que fue una de las áreas observadas durante las actividades de campo.

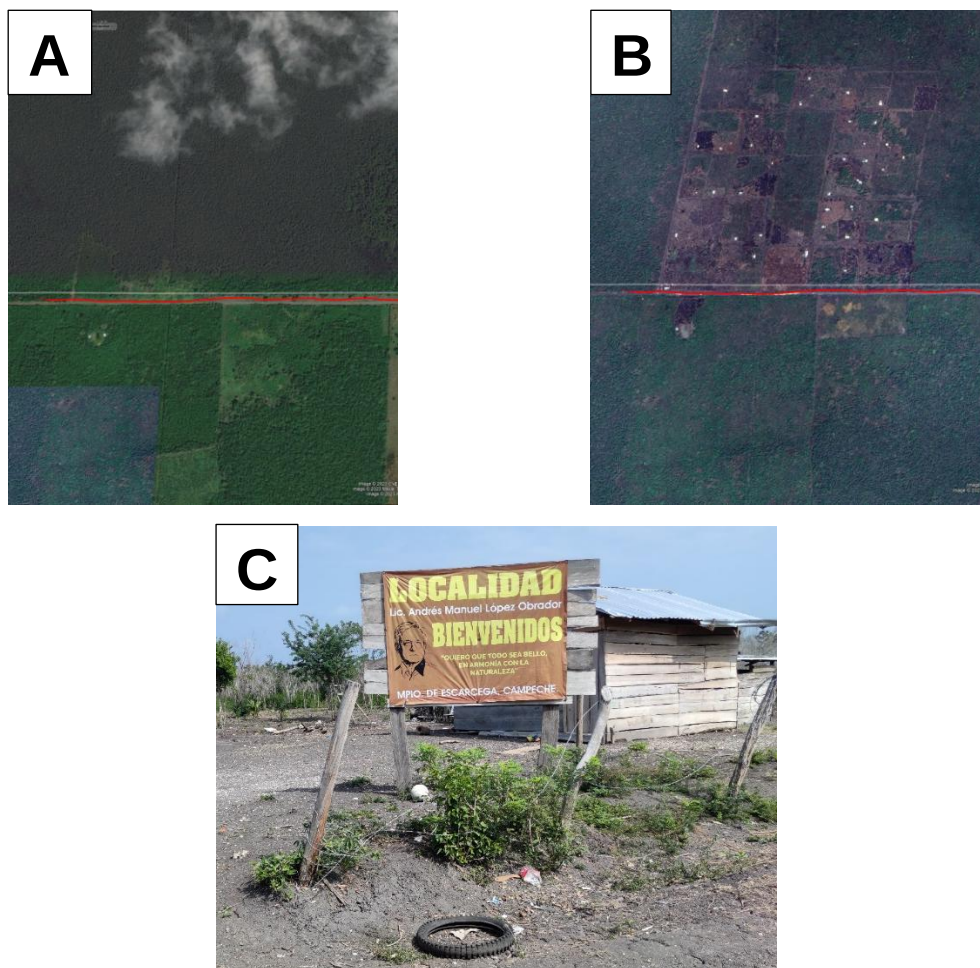


Figura 107. En la imagen (A) se muestra la cobertura forestal de selva de la zona federal en 2015. En la imagen (B) se muestra la cobertura forestal con quemas por el establecimiento de la localidad Lic. Andrés Manuel López Obrador (C) en 2023.

CAPÍTULO V DISCUSIÓN

V.1 Valoración de la influencia de la severidad de los incendios

Las entrevistas con autoridades gubernamentales y no gubernamentales proporcionaron una visión integral del manejo del fuego en Campeche y en Escárcega. Las autoridades entrevistadas, todas con distintos niveles de experiencia y responsabilidades en el manejo del fuego, ofrecieron perspectivas cruciales sobre los incendios forestales en la región. Las entrevistas se realizaron de manera virtual a través de Google Meet en mayo de 2022, lo que facilitó la participación de expertos como el Ing. Pánfilo Flores de CONAFOR, la Mtra. Diana López de PRONATURA, y otros importantes actores del manejo del fuego.

Los entrevistados coincidieron en que los incendios en la selva de la Península de Yucatán están principalmente influenciados por la topografía, los combustibles y las condiciones atmosféricas. Particularmente, el fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) juega un papel crucial, ya que las condiciones de La Niña pueden incrementar la severidad de los incendios debido a la acumulación de combustibles post-huracanes. Los municipios de Hopelchén, Calakmul, Escárcega, Champotón y Candelaria en Campeche son prioritarios para la prevención y combate de incendios debido a sus extensas áreas forestales. Los datos históricos muestran un incremento significativo de incendios en años específicos como 2019, vinculado a programas gubernamentales como "Sembrando Vida" y actividades humanas intensificadas por la pandemia. Predominan los incendios superficiales, pero también se reportan incendios subterráneos y de copa. La acumulación de combustibles debido a la escasez de incendios naturales puede resultar en incendios de alta severidad. Los cambios en las condiciones atmosféricas y la intervención humana agravan esta situación.

La caza furtiva y las prácticas agropecuarias inadecuadas son causas significativas de incendios. La falta de medidas preventivas y el uso del fuego para actividades

agrícolas sin control contribuyen a la propagación de incendios. Existe una carencia de monitoreo continuo de las áreas quemadas y seguimiento de su recuperación. Las actividades preventivas incluyen recorridos de extensionismo y reuniones de coordinación, pero la falta de continuidad debido a la rotación de personal en dependencias gubernamentales y no gubernamentales dificulta el manejo efectivo del fuego. Los entrevistados sugieren que la identificación y monitoreo de la severidad de incendios son cruciales para planificar actividades de restauración. El conocimiento tradicional del uso del fuego necesita adaptarse a las condiciones cambiantes del clima. Proponen el uso controlado del fuego para manejar material combustible y evitar incendios catastróficos.

Las entrevistas revelan la necesidad de estrategias integrales y adaptativas para el manejo del fuego en la Península de Yucatán. La colaboración entre actores gubernamentales y no gubernamentales es fundamental para la efectividad de estas estrategias. Además, se subraya la importancia de la formación y retención de personal especializado, así como la implementación de programas de monitoreo y evaluación de la severidad de los incendios.

Las entrevistas a los brigadistas de incendios forestales de Campeche y Escárcega, realizadas los días 6 y 7 de junio de 2022, proporcionan una visión integral de las dinámicas y desafíos en el manejo de incendios en la región. Durante estas entrevistas, se abordaron varios temas relevantes, como la historia de los incendios, la experiencia y el manejo del fuego por parte de los brigadistas, así como las causas y consecuencias de los incendios forestales.

Los brigadistas identificaron a Hopelchén, Candelaria, Escárcega y Calakmul como los municipios con mayor incidencia de incendios, confirmando su participación en la atención de incendios en la región oriental de Escárcega. Detallaron los ejidos específicos donde han intervenido, como Chan Laguna, Constitución y El Lechugal, entre otros. Sin embargo, mencionaron que muchos incendios no se registran oficialmente debido a la intervención de brigadas comunitarias o ejidatarios que

temen sanciones según la NORMA-015-SEMARNAT/SAGARPA-2023. La pandemia de COVID-19 también afectó la coordinación, ya que los ejidatarios evitaron la entrada de brigadistas por miedo al contagio.

Los brigadistas entrevistados tienen en promedio diez años de experiencia, con algunos miembros habiendo trabajado en incendios en estados como Guerrero y Nuevo León, e incluso en Canadá. La diversidad de su experiencia es crucial para manejar la complejidad de los incendios en diferentes tipos de selvas, desde la selva baja hasta la selva alta, donde los incendios son menos comunes, pero más difíciles de controlar debido a la densa vegetación.

Las principales causas de incendios mencionadas fueron la cacería furtiva y el uso del fuego agropecuario. La caza de subsistencia lleva a la quema de áreas para atraer animales, mientras que las prácticas agrícolas no siempre siguen las recomendaciones oficiales, resultando en incendios incontrolados. A pesar de los esfuerzos de concientización y extensión agrícola, los métodos tradicionales y la falta de seguimiento de las normas establecidas continúan siendo un desafío.

Los brigadistas explicaron cómo los incendios afectan la estructura y composición de la selva, reduciendo la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como la producción de miel y plantas medicinales. Los incendios recurrentes impiden la regeneración adecuada de la selva, transformándola en acahual y afectando a especies sensibles como el cedro y la caoba. Además, los incendios pueden dañar el suelo y los nutrientes, exacerbando los efectos negativos en la flora y fauna locales.

Los brigadistas participan en actividades de manejo del fuego y rehabilitación de áreas afectadas, pero mencionaron la necesidad de mayor apoyo y recursos. Programas como "Sembrando Vida" han ayudado a reducir el uso del fuego, pero persisten problemas como la falta de alternativas económicas viables y el impacto de prácticas ilegales, incluyendo las de la comunidad menonita.

Para mejorar la gestión de los incendios forestales, los brigadistas sugieren la concientización de la población, la reforestación con estudios específicos sobre especies adecuadas y el seguimiento de áreas afectadas. También destacaron la necesidad de incentivos económicos para evitar prácticas perjudiciales y promover alternativas sostenibles. La creación de más brigadas permanentes y la mejora en la capacitación y recursos serían pasos esenciales para fortalecer la capacidad de respuesta ante incendios.

En resumen, las entrevistas con los brigadistas de Campeche y Escárcega revelan la complejidad del manejo de incendios en la región, subrayando la necesidad de una gestión integrada que aborde las causas subyacentes, mejore las prácticas de manejo del fuego y fortalezca la capacidad de respuesta a través de recursos adecuados y estrategias comunitarias sostenibles.

La gestión de incendios forestales en la región oriental de Escárcega, Campeche, presenta desafíos complejos que involucran factores sociales, económicos y ecológicos. Las entrevistas semiestructuradas realizadas a actores locales revelan información crucial sobre el uso del fuego, la historia de incendios, su severidad y los beneficios que la selva proporciona a las comunidades locales.

El uso del fuego por parte de los ejidatarios para actividades agropecuarias es una práctica común que ha resultado en la propagación de incendios forestales. Los datos indican una recurrencia significativa de incendios en años específicos, como 2013 y 2015-2019, con eventos catastróficos destacados en 1993, 2011 y 2013. Estos incidentes subrayan la necesidad urgente de mejorar las prácticas de manejo del fuego y adherirse estrictamente a normas como la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2023, que establece directrices para la creación de brechas cortafuego.

Las causas actuales de los incendios se deben principalmente a dos factores. Primero, la cacería furtiva utiliza el fuego para asustar a las presas y atraerlas con

vegetación herbácea, una práctica ilegal que frecuentemente provoca incendios descontrolados. Segundo, las actividades agropecuarias sin la implementación adecuada de brechas cortafuego son otra causa principal de incendios. La falta de coordinación y cumplimiento de normativas entre ejidos vecinos contribuye significativamente a la propagación del fuego.

El impacto del fuego en la selva es profundo y multifacético. Inicialmente, el fuego quema la materia orgánica superficial, pero los incendios recurrentes deterioran gravemente la vegetación, transformando la selva en acahual. Esta recurrencia aumenta la severidad de los incendios futuros, provocando un ciclo de destrucción que podría tardar décadas en revertirse. Los ejidatarios estiman que la recuperación de la selva a su estado original podría llevar entre 50 y 100 años.

La implementación de brechas cortafuego y el uso de calendarios de quemas son, sin duda, medidas preventivas importantes para reducir la incidencia de incendios forestales. No obstante, el éxito de estas estrategias está estrechamente ligado a la capacidad de adaptación a las condiciones climáticas locales. En el caso del calendario de quemas, un problema recurrente es que las condiciones climáticas favorables para las quemas no siempre coinciden con las fechas estipuladas por las regulaciones. La variabilidad climática, como la fluctuación en la velocidad del viento, la humedad relativa y las precipitaciones, puede hacer que los periodos permitidos para realizar quemas sean inapropiados o insuficientes (Monzón-Alvarado et al., 2014). Esto lleva a que muchos agricultores opten por realizar quemas en fechas no autorizadas, en horarios fuera de lo establecido, o sin seguir las recomendaciones de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2023.

Por otro lado, el programa gubernamental "Sembrando Vida" no prohíbe explícitamente a los participantes el uso del fuego, pero sí fomenta que lo reduzcan o sigan estrictamente las recomendaciones de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2023. Esta orientación ha demostrado ser eficaz en la disminución de incendios. Sin embargo, las condiciones climáticas adversas, como

sequías prolongadas y fuertes vientos, a menudo superan las medidas preventivas, lo que subraya la necesidad de desarrollar estrategias más robustas y adaptativas que consideren estos factores extremos (Pagan et al., 2021).

La selva proporciona una variedad de beneficios a los ejidatarios, incluyendo la producción de miel, el aprovechamiento de plantas medicinales y maderables, la cacería para autoconsumo y la producción de carbón vegetal. Además, ejidos como Silvituc y El Centenario se benefician de la pesca y la acuicultura. Sin embargo, los incendios forestales impactan negativamente en estos beneficios. La producción de miel disminuye debido a la pérdida de vegetación en floración y la quema de colonias de abejas. La deforestación y la pérdida de especies arbóreas también afectan la disponibilidad de plantas medicinales y maderables, mientras que la fauna se reduce, perjudicando la cacería y la producción de carbón.

Los incendios también afectan negativamente los recursos hidrológicos, reduciendo la disponibilidad de agua y alterando los patrones de precipitación. Los ejidatarios dependen de la agricultura de temporal, que se ve gravemente afectada por la escasez de lluvias y el desfase de las temporadas de lluvias. Estas condiciones afectan directamente el modo de vida de las comunidades, que dependen de las precipitaciones para la producción de sus cultivos.

Para mejorar la gestión de incendios, es esencial fortalecer el cumplimiento de normativas y aumentar la educación y concienciación sobre prácticas responsables de uso del fuego. Programas como "Sembrando Vida" han demostrado ser efectivos y su expansión podría beneficiar a más comunidades. Además, la coordinación entre ejidos y la implementación de medidas adaptativas para enfrentar condiciones climáticas adversas son cruciales para reducir la frecuencia y severidad de los incendios.

La selva es un recurso invaluable, no solo por su biodiversidad, sino también por su importancia para el turismo y la cultura local. Sus paisajes cautivan a visitantes

nacionales y extranjeros, generando una importante actividad económica a través del ecoturismo, las experiencias culturales y el turismo arqueológico. Sin embargo, los incendios forestales a gran escala, como señalan Monzón-Alvarado et al. (2012), representan una grave amenaza para estos ecosistemas, convirtiendo vastas áreas en tierras de cultivo o como se observó en campo recientemente en asentamientos irregulares. La conservación de la selva, por tanto, es una cuestión que trasciende lo ambiental, involucrando aspectos económicos y culturales. Para abordar esta problemática de manera efectiva, resulta fundamental integrar datos de sensores remotos con el trabajo de campo social, obteniendo así una visión holística que permita diseñar estrategias de conservación más eficientes

V.2 Caracterización de las áreas quemadas

La coincidencia entre los puntos de calor detectados por VIIRS y la superficie quemada fue de 36.4%. Este resultado se debe principalmente a la disponibilidad de imágenes generadas por el satélite Landsat 8, cuya resolución temporal es de 16 días. Además, la resolución espacial también influye, ya que el píxel del sensor VIIRS es mayor que el de Landsat 8. No obstante, los porcentajes más altos de coincidencia de áreas quemadas se registraron en los años 2016, 2019 y 2020, lo que indica que, a mayor superficie quemada, mayor es la coincidencia de puntos de calor. Aun así, los puntos de calor obtenidos de FIRMS han proporcionado un apoyo significativo para la detección y validación de las áreas quemadas. Esto ha permitido confirmar que son una alternativa confiable para conocer la distribución espacial y temporal de los incendios en la región oriental de Escárcega, Campeche.

Por otra parte, es importante mencionar que las fechas de los puntos de calor coinciden con el calendario de quemas del área de estudio. Este aspecto es relevante porque, al conocer las fechas en que se realizan las quemas que pueden provocar incendios, se pueden proponer o reforzar medidas de mitigación en las áreas identificadas como más propensas a incendios en esta investigación.

El uso de los índices BAI y NBR ha demostrado ser eficiente en la delimitación de superficies quemadas, especialmente en regiones tropicales, como mencionaron Manzo-Delgado y López-García (2020). Según los resultados de validación de las imágenes Sentinel-2, su confiabilidad es aceptable, con un valor Kappa promedio de 88.75%, un error de omisión de 1.67% y un error de comisión de 12.86%, similar a lo reportado por Anaya y Chuvieco (2012). Los errores de omisión se atribuyen al desfase de 10 días entre la adquisición de las imágenes Sentinel-2 y Landsat 8 OLI.

Además, Anaya & Chuvieco, (2012) mencionan que uno de los principales retos para validar áreas quemadas es conseguir la mayor coherencia temporal posible entre la fecha de las imágenes de referencia de alta resolución y el producto a validar. Los resultados presentados demuestran que los índices BAI y NBR tuvieron una representación aceptable en la delimitación de áreas quemadas superficiales en vegetación de selva.

En la mayoría de las áreas utilizadas para la validación, el BAI resultó ser más eficaz en la identificación de las áreas de selva afectadas por el fuego. La diferencia en la delimitación de las áreas quemadas entre los índices BAI y NBR puede deberse a varios factores, principalmente al uso de las bandas específicas de cada índice: BAI utiliza la banda roja, mientras que NBR emplea la banda infrarroja de onda corta de Landsat 8. Estos factores, junto con el tiempo de adquisición de las imágenes, influyen en la capacidad de cada índice para delimitar las áreas quemadas (Flores-Rodríguez et al., 2021; Manzo-Delgado y López-García, 2013; Montorio Llovería et al., 2014). Además, la severidad y el tipo de vegetación también juegan un papel importante.

Por estas razones, se decidió trabajar con ambos índices, que han demostrado tener una buena respuesta en la identificación de áreas quemadas en la selva según la bibliografía (Flores-Rodríguez et al., 2021).

El análisis de los incendios revela un incremento en las áreas quemadas, pasando de 926.75 hectáreas en 2013 a 5,120.16 hectáreas en 2016, y alcanzando 11,027.91 hectáreas en 2019, siendo estos los años con mayor superficie afectada. La tendencia ascendente de la superficie quemada en las selvas del sureste del México, según Manzo-Delgado & López-García, 2020 y Pagan et al., (2021), tiene un origen multifactorial donde se combina la presencia de fenómenos meteorológicos, el uso del fuego por parte de los agricultores y la falta de atención de las dependencias gubernamentales.

En relación con la distribución por tipos de vegetación, la mayoría de las áreas quemadas están en la selva mediana subperennifolia (SMQ) y sus variantes arbóreas (VSA/SMQ) y arbustivas (VSa/SMQ), representando el 82.19% de la superficie total afectada y la que predomina en la mayoría en los ejidos. Esto sugiere que las selvas han estado sometidas a constantes presiones antrópicas relacionadas con el uso tradicional del fuego sin precaución, lo cual ha generado incendios, como lo menciona Pagan et al., (2021). Asimismo, se confirma que las áreas con vegetación secundaria son más propensas a registrar incendios por la presencia de herbáceas y la acumulación de biomasa tras la perturbación, su proximidad a áreas agrícolas o cambio de uso de suelo forestal destinadas a actividades agropecuarias de acuerdo a lo reportado por Zamora-Crescencio et al., (2017).

Los ejidos El Lechugal y El Centenario, con extensas áreas de selva (25,814 ha y 32,067 ha) y terrenos agropecuarios (1,876 ha y 3,081 ha), registraron la mayor cantidad de área quemada durante el período de estudio. Esta situación podría indicar: intensa actividad agropecuaria dependiente del uso del fuego con técnicas deficientes para evitar que se propague a la selva, incumplimiento o desconocimiento de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2023 y posible relación con prácticas de cacería furtiva de acuerdo con Pérez Rodríguez et al., (2018). En contraste, el ejido Silvituc, y su estatus como Área Natural Protegida, que restringe el uso del fuego en la parte sur del área en estudio. Esto subraya la importancia de

la supervisión, como se ilustra en el análisis de la distribución de áreas quemadas por ejidos. Se observa que algunos ejidos han experimentado incendios a lo largo de todo el período de estudio, mientras que otros han sido afectados cuatro veces, dos veces o ninguna. La información presentada resulta crucial, ya que sirve como un indicador valioso para evaluar la incidencia de incendios en los ejidos. Esta evaluación permite identificar aquellos ejidos que demandan una mayor atención en términos de prevención y combate de incendios en la selva (Rodríguez Trejo, 2014). Además, parece que hay una tendencia de aumento en los incendios en 2019 y 2020 en todos los ejidos, independientemente de la población o la superficie de selva. Esto podría sugerir que otros factores, como cambios en las políticas de manejo del fuego o condiciones climáticas, podrían estar influyendo en esta tendencia (Pagan et al., 2021).

El análisis de las áreas quemadas en la región oriental de Escárcega, Campeche, revela una compleja interacción de factores naturales y antrópicos que inciden en la frecuencia y severidad de los incendios forestales. La combinación de datos de teledetección y trabajo de campo ha permitido identificar patrones espaciales y temporales en la distribución de los incendios, así como evaluar la efectividad de diferentes índices para delimitar las áreas afectadas (Monzón-Alvarado et al., 2012).

V.3 Distribución espacial y temporal de la severidad

La variación del índice espectral delta NBR (Normalized Burn Ratio) se relaciona estrechamente con la severidad de los incendios en las áreas de selva. El delta NBR es un indicador clave utilizado para medir el impacto de los incendios en la vegetación, ya que cuantifica los cambios en la reflectancia antes y después del incendio (Manzo Delgado & López García, 2013).

El análisis anual de la severidad muestra incrementos significativos en los años 2015, 2016, 2019 y 2020, lo cual puede estar reflejado en los valores del delta NBR. La recurrencia de incendios en las mismas áreas, combinada con la regeneración

de especies herbáceas y arbustivas, sugiere que las áreas con alta severidad presentan un mayor delta NBR, indicando un cambio más pronunciado en la vegetación debido a los incendios (Axel, 2018).

De acuerdo con la clasificación de severidad de incendios propuesta por Flores-Rodríguez et al. (2021), 2019 presentó un incremento notable en incendios de alta severidad, lo que sugiere un daño significativo a las selvas tropicales. Esta situación, según Pagan et al. (2021), podría atribuirse a la combinación de condiciones climáticas extremas y la expansión de programas como 'Sembrando Vida'. Sin embargo, este mismo año también registró la mayor superficie de regeneración forestal, lo que indica que algunos incendios, especialmente aquellos superficiales y en áreas de selva previamente no afectadas, podrían haber estimulado el rebrote de vegetación.

En 2020, predominaron los incendios de severidad moderada, afectando una mayor superficie. No obstante, se observó una menor recuperación forestal en comparación con años anteriores. Esta situación es particularmente evidente en áreas quemadas en 2016 y 2019 en el análisis de caracterización de áreas quemadas, lo que sugiere que la recurrencia de incendios está dificultando la regeneración de la selva (Montorio Llovería et al., 2014).

En general, todos los tipos selva presentaron diferentes niveles de severidad de incendios, pero la severidad moderada fue la clase dominante. Esto es preocupante debido a la importante biodiversidad que resguarda el ecosistema y su relación con los servicios ecosistémicos (Cochrane, 2009). La categoría de recrecimiento está presente en la vegetación SBQ, VSA/SBQ, VSA/SMQ y VSa/SMQ, lo que sugiere que varias especies presentan adaptaciones al fuego, cuya verificación requiere trabajo de campo (Keeley, 2009).

La severidad moderada resultó ser la clase dominante en la mayoría de los tipos de vegetación, causando un daño moderado que quema una parte significativa de la

vegetación sin llegar a destruir completamente el ecosistema de la selva presente en el área de estudio. Este nivel de daño podría estar afectando la biodiversidad y su relación con los servicios ambientales (Cochrane, 2009). La categoría de recuperación observada en la vegetación SBQ, VSA/SBQ, VSA/SMQ y VSa/SMQ sugiere que varias especies, como *Metopium brownei*, *Bursera simaruba* y *Brosimum alicastrum*, presentan adaptaciones al fuego. Estas especies son primarias, es decir, son de las primeras en colonizar un área después de una perturbación, como incendios, y están catalogadas con una alta tolerancia a la sequía y al fuego. Esta capacidad les permite sobrevivir en condiciones adversas y facilitar el establecimiento de otras especies (Fernández et al., 2020; Hernández-Rodríguez et al., 2021; Keeley, 2009).

La alta severidad se observó principalmente en la selva mediana subperennifolia (SMQ), con 1,687.03 unidades, seguida por la vegetación secundaria arbórea de SMQ con 1,317.27 unidades y la vegetación secundaria arbustiva SMQ con 1,151.18 unidades. La dominancia de esta clase se atribuye a que es el tipo de vegetación más representado en el área de estudio, pero también podría ser el más susceptible a los incendios. Esta susceptibilidad podría ser consecuencia, en gran medida, de la actividad antropogénica que se desarrolla en las zonas colindantes (Pagan et al., 2021; Rodríguez-Trejo et al., 2011).

La variación del índice espectral delta NBR se correlaciona con la severidad de los incendios en las áreas de selva. Un delta NBR más alto generalmente indica una mayor severidad y un cambio más significativo en la vegetación, mientras que un delta NBR moderado puede indicar áreas con regeneración parcial o severidad moderada de los incendios.

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa en la distribución del área quemada entre los distintos núcleos agrarios y la zona federal. La predominancia del recrecimiento en muchas áreas sugiere una capacidad de regeneración natural de la vegetación, lo cual es positivo desde una perspectiva

ecológica. Sin embargo, la recurrencia de incendios en las mismas áreas, especialmente en la zona federal y en núcleos como El Lechugal y Laguna Grande, indica una alta vulnerabilidad y la posible insuficiencia de las medidas de prevención y control de incendios.

La severidad de los incendios varía considerablemente entre los núcleos. La predominancia de la severidad baja y moderada en varios núcleos, como N.C.P.E. Zona Chiclera Las Maravillas y Lic. José López Portillo, sugiere que, aunque los incendios son frecuentes, no siempre resultan en daños severos. No obstante, núcleos como El Lechugal presentan altos niveles de severidad moderada, lo que puede tener implicaciones significativas para la biodiversidad y la estructura del ecosistema local (López García, 2020).

Las diferencias en la severidad y la frecuencia de los incendios entre los núcleos pueden estar influenciadas por diversos factores, incluyendo la variabilidad en la gestión de la tierra en cuanto a las actividades y decisiones que se toman en las prácticas agrícolas y la disponibilidad de recursos para la prevención y combate de incendios. Por ejemplo, la alta incidencia de incendios en la zona federal podría estar relacionada con actividades humanas intensivas o una menor regulación en comparación con otras áreas, así como con el establecimiento de asentamientos irregulares, según lo observado en el trabajo de campo realizado en estas áreas (Rodríguez-Trejo et al., 2011).

V.4 Evaluación del impacto de la severidad

La evaluación de la severidad de los incendios en la vegetación de la selva es esencial para documentar los efectos del fuego y aplicar la clasificación de severidad propuesta por Jenks en la selva mediana subperennifolia y su variante de vegetación secundaria arbórea. La selva, siendo uno de los tipos de vegetación más sensibles a los incendios, requiere un análisis detallado (Rodríguez-Trejo et al., 2019). Estas mediciones son fundamentales para clasificar la severidad de los

incendios en categorías que van desde baja hasta alta (Guillem-Cogollos et al., 2017; Key & Benson, 2006).

El análisis de la riqueza de especies en los sitios de muestreo pone de manifiesto la diversidad y distribución de la vegetación en la selva, subrayando la predominancia de la familia Fabaceae y las diferencias en la densidad de individuos entre los sitios de control y los sitios afectados por incendios. Estos resultados proporcionan información valiosa para evaluar los efectos de los incendios en la biodiversidad y planificar estrategias de conservación y restauración. La ausencia de especies amenazadas o endémicas y la baja incidencia de quemaduras sugieren que, a pesar de la severidad de algunos incendios, las especies nativas predominan y podrían tener una capacidad inherente de recuperación (Flores-Garnica, 2021; Margarita et al., 2011; Negreros-Castillo & Martínez Salazar, 2011).

El análisis de riqueza y abundancia indica que los sitios de control tienen el mayor número de registros de individuos y especies, mientras que los sitios con alta severidad de incendios presentan el menor número de individuos y especies. Esta diferencia significativa en la abundancia y riqueza de individuos entre los sitios de control y los sitios con alta severidad sugiere que los incendios tienen un impacto considerable en la densidad de especies. En términos generales, se observa una disminución de la diversidad en relación con la severidad del incendio, evidenciada por una tendencia decreciente en el índice de Shannon-Wiener a medida que aumenta la severidad del incendio.

Además, es importante resaltar que la variabilidad en la riqueza y abundancia observada en las diferentes clases de severidad, incluyendo los sitios con recrecimiento o severidad, puede deberse al tipo de vegetación presente en cada sitio. Los resultados sugieren que el índice de Shannon-Wiener es una herramienta útil para evaluar el impacto del fuego en diferentes clases de severidad clasificadas por el método de Jenks. La frecuencia de quemas y su uso para cambio de uso de suelo afectan negativamente la diversidad de especies, destacando la importancia

de gestionar la conservación de los ecosistemas de selvas para preservar su biodiversidad. Sin embargo, también se observó en campo que la riqueza de especies puede estar influenciada por las actividades antropogénicas en el área de estudio. Las personas practican la tala selectiva de especies arbóreas que benefician sus actividades agropecuarias, como aquellas que pueden ser utilizadas como postes para cercas, proporcionar sombra para el ganado o tener algún valor maderable. Al mismo tiempo, eliminan las especies que no consideran útiles.

El análisis de los datos obtenidos revela cómo las prácticas agropecuarias y la severidad de los incendios influyen significativamente en la composición de la vegetación de la selva mediana subperennifolia. En áreas con alta severidad de incendios, la familia Poaceae predomina debido al cambio de uso de suelo hacia actividades agropecuarias, donde estas gramíneas sirven como fuente principal de alimento para el ganado. Esta prevalencia de Poaceae y el impacto de la quema descontrolada subrayan la necesidad de manejar adecuadamente las prácticas de quema para proteger la integridad de la selva. La práctica común de quema de terrenos agropecuarios durante las temporadas de incendios, aunque destinada a mantener las áreas limítrofes, frecuentemente resulta en escapes de fuego que comprometen la selva.

La severidad del incendio influye directamente en la composición de las especies vegetales. En áreas con alta severidad que no están destinadas a actividades agropecuarias, la familia Convolvulaceae, especialmente el género *Ipomoea*, es dominante debido a la pérdida de cobertura forestal arbórea y arbustiva. Este hallazgo indica que la recuperación de la vegetación en estas áreas es lenta y que las especies de menor porte y más adaptadas a condiciones perturbadas tienden a prevalecer (Alcántar-Mejía et al., 2012). En contraste, en áreas de severidad moderada, la familia Anacardiaceae se destaca por su papel ecológico crucial. Esta familia no solo proporciona alimento y refugio para la fauna local, incluyendo especies frugívoras y herbívoras, sino que también facilita la dispersión de semillas y la regeneración natural de la selva. Sin embargo, los incendios pueden afectar

negativamente la regeneración de las poblaciones de Anacardiaceae, poniendo en riesgo su capacidad de contribuir al equilibrio del ecosistema (Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 1999).

En áreas de baja severidad, la familia Fabaceae juega un papel fundamental en la recuperación post-fuego debido a su capacidad de fijar nitrógeno, lo que ayuda a restaurar la fertilidad del suelo y facilita el crecimiento de otras plantas. La dominancia de Fabaceae en estas áreas sugiere que su capacidad de mejorar las condiciones del suelo es crucial para la regeneración del ecosistema tras un incendio (Negreros-Castillo & Martínez Salazar, 2011). Además, en los sitios de recrecimiento, se observó la prominencia de las familias Anacardiaceae y Moraceae, destacando su importancia tanto económica como ecológica. Moraceae, en particular, es vital para la fauna frugívora debido a sus frutos, y su madera tiene un valor económico considerable (Ibarra-Manríquez et al., 2012).

Los sitios de control, que no fueron afectados por incendios, muestran una alta dominancia de las familias Moraceae, Fabaceae y Burseraceae. Estas familias son cruciales para la biodiversidad y el equilibrio del ecosistema, proporcionando alimento y refugio a una gran variedad de fauna (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Ramírez et al., 2021). Sin embargo, la susceptibilidad de Burseraceae al fuego, debido a sus cortezas delgadas, destaca la necesidad de implementar medidas de conservación específicas para estas especies. En general, los resultados sugieren que la gestión adecuada de las áreas afectadas por incendios es esencial para preservar la biodiversidad y asegurar la resiliencia de los ecosistemas de selva mediana subperennifolia.

Los resultados del análisis del Índice de Valor de Importancia (IVI) a nivel de especies revelan patrones claros de dominancia y adaptación en función de la severidad del incendio en la vegetación de selva mediana subperennifolia y su variante secundaria arbórea.

En áreas de alta severidad afectadas por el cambio de uso del suelo hacia actividades agropecuarias, se observó una predominancia significativa de especies herbáceas como *Brachiaria fasciculata* y *Asclepias curassavica*. Estas especies herbáceas estacionales desempeñan un papel crucial en las prácticas silvopastoriles locales al servir como forraje para el ganado y, en el caso de *Brachiaria fasciculata*, por su capacidad de regeneración post-incendio y su habilidad para mejorar la fertilidad del suelo. Sin embargo, su presencia también aumenta el riesgo de propagación de incendios hacia áreas forestales no perturbadas.

El género *Ipomoea*, conocido por su capacidad de colonizar ambientes perturbados, fue notablemente abundante en áreas de alta severidad que no colindan con actividades agropecuarias. Esta especie se adaptó rápidamente a las condiciones post-incendio, cubriendo áreas previamente dominadas por vegetación arbórea y arbustiva. Este fenómeno destaca la resiliencia de *Ipomoea* frente a perturbaciones severas del hábitat (Alcántar-Mejía et al., 2012).

En áreas con severidad moderada y baja, las especies arbóreas *Metopium brownei* y *Lysiloma latisiliquum* emergieron como dominantes. *Metopium brownei*, conocido localmente como chechén prieto, es crucial para la regeneración temprana de las selvas tras incendios o perturbaciones naturales. Su capacidad para colonizar áreas abiertas y estabilizar el suelo lo convierte en una especie pionera en la restauración de ecosistemas perturbados (Leirana-Alcocer et al., 2009) . Por otro lado, *Lysiloma latisiliquum*, o tzalam, es una especie de amplia distribución que se adapta bien a diferentes condiciones de selva, desde alta a baja subperennifolia, y juega un papel importante en la economía local debido a su madera de alta calidad y múltiples usos (Negreros-Castillo & Martínez Salazar, 2011).

En áreas de recrecimiento, las especies como *Brosimum alicastrum* y *Bursera simaruba* fueron prominentes. *Brosimum alicastrum*, conocido como ramón, es fundamental para la recuperación de la diversidad vegetal y la estabilidad del suelo.

Su presencia en áreas recuperadas indica una fase avanzada de restauración ecológica. *Bursera simaruba*, por otro lado, es conocida por su tolerancia al fuego y su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo mediante la fijación de nitrógeno atmosférico (Fernández et al., 2020).

El análisis de las clases diamétricas en las áreas afectadas por diferentes grados de severidad de incendios revela patrones significativos que indican cómo el fuego influye en la estructura y composición de la vegetación en las selvas mediana subperennifolia y sus variantes secundarias arbóreas.

En primer lugar, se observa una clara tendencia hacia la reducción del tamaño diamétrico de los árboles conforme aumenta la severidad del incendio. En las áreas con alta severidad, la mayoría de las especies registradas presentan diámetros menores a 2 cm. Este fenómeno se explica por la capacidad del fuego de eliminar árboles más grandes y la tendencia de las actividades antropogénicas, como el cambio de uso del suelo para la agricultura o la ganadería, de emplear el fuego para limpiar terrenos y fomentar el crecimiento de pasto. Es notable que en áreas de alta severidad no utilizadas para actividades agropecuarias, el género *Ipomea* ha colonizado rápidamente, aprovechando las condiciones perturbadas para su desarrollo.

En contraste, en áreas con severidad moderada y baja, los árboles presentan diámetros principalmente en las categorías menores a 2 cm y entre 2 y 6.9 cm. Estas clases reflejan un proceso de regeneración donde árboles jóvenes y de menor tamaño comienzan a dominar después del paso del fuego. Este patrón indica una fase temprana de recuperación del bosque y una adaptación de las especies a las nuevas condiciones ambientales creadas por el incendio.

Los sitios de recrecimiento y los sitios de control muestran una mayor variabilidad en las clases diamétricas, que van desde menos de 2 cm hasta 12-16.9 cm. Es en los sitios de control donde se encuentran los árboles con los diámetros más

grandes, alcanzando incluso más de 42 cm de diámetro. Específicamente, especies como *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba* y *Ficus maxima* destacan por su presencia en estas clases diamétricas mayores, indicando su capacidad para resistir el fuego y su importancia en la estructura y función del ecosistema (Estrada & Coates-Estrada, 2003; Reyes Díaz Gallegos et al., 2001; Zamora-Crescencio et al., 2017).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis indican diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las clases diamétricas de los diferentes niveles de severidad del incendio. Esto confirma que la severidad del incendio afecta de manera significativa la distribución de diámetros de los árboles en las selvas estudiadas.

La relación inversa entre la severidad del incendio y el tamaño diamétrico de los árboles sugiere un impacto negativo del fuego en la estructura y la dinámica de la vegetación. Las áreas con alta severidad muestran una ausencia de árboles grandes y una predominancia de individuos jóvenes y pequeños, lo que podría afectar la capacidad del bosque para recuperarse completamente. Por otro lado, los sitios de control y recrecimiento exhiben una mayor diversidad diamétrica, indicando una recuperación más avanzada y una estructura más resiliente.

El estudio también examinó las clases de altura de la vegetación en áreas afectadas por distintos niveles de severidad de incendios en selvas mediana subperennifolia y variantes secundarias arbóreas. Se encontró que la severidad alta de los incendios estuvo asociada principalmente con alturas de vegetación menores a 2 metros, resultado tanto de actividades agropecuarias que utilizan el fuego para el pastoreo y cultivo, como de áreas no destinadas a tales actividades, pero afectadas por incendios severos. En contraste, las clases de severidad moderada y baja mostraron una diversidad de alturas vegetales que indican una regeneración post-incendio.

Los sitios de recrecimiento y control exhibieron una distribución más variada en las clases de altura, con presencia en todas las categorías, reflejando una menor afectación por el fuego y una mayor estabilidad en la estructura de la vegetación. Las pruebas estadísticas (Kruskal-Wallis y prueba post-hoc de Dunn) confirmaron diferencias significativas entre las medianas de las clases de altura, destacando particularmente las disparidades entre las clases de severidad alta, moderada y baja con las de recrecimiento y control. Esto sugiere un patrón claro donde la severidad del incendio afecta la estructura vertical de la vegetación.

Los resultados indican que, a medida que aumenta la altura de la vegetación, la severidad del incendio disminuye en los sitios estudiados. Las áreas con vegetación de mayor altura fueron menos afectadas por el fuego, lo que sugiere que la vegetación madura posee una mayor resiliencia frente a los eventos de incendios.

La aplicación del método de ruptura natural de Jenks para establecer umbrales de severidad permitió identificar y categorizar de manera precisa las diferencias en la estructura y abundancia de especies vegetales entre sitios afectados por diferentes intensidades de incendio. Estos hallazgos destacan la relevancia de implementar estrategias de manejo del fuego y regular actividades humanas para conservar la diversidad biológica y la funcionalidad de los ecosistemas forestales en la región estudiada.

La severidad de los incendios ha modificado significativamente la estructura y composición de la selva maya en la región oriental de Escárcega. En áreas de alta severidad, se observó la dominancia de especies adaptadas al fuego, mientras que en áreas menos afectadas predomina una mayor diversidad, incluyendo especies arbóreas de mayor tamaño y resistencia al fuego.

Los resultados, respaldados por observaciones de campo mediante RPAS, revelan que la relación entre la severidad del fuego y la recuperación de la selva es más compleja de lo que inicialmente se esperaba. Las imágenes de alta resolución

obtenidas durante los vuelos permitieron identificar diferencias marcadas en la cobertura forestal según las clases de severidad. En las áreas de alta severidad, se constató que los incendios estuvieron asociados principalmente con el cambio de uso de suelo forestal a agropecuario, un fenómeno recurrente observado durante las visitas de campo. En contraste, los incendios de severidad intermedia a baja se originaron principalmente por escapes de fuego vinculados a actividades agropecuarias o cacería ilegal.

La integración de tecnologías como los RPAS y las imágenes satelitales proporciona un análisis más integral del comportamiento de la severidad de los incendios en la selva. Las imágenes satelitales ofrecen una perspectiva amplia del área afectada, identificando patrones generales de severidad y delimitando áreas prioritarias para el estudio. Por su parte, los RPAS complementan esta información al capturar detalles específicos a nivel local, como cambios estructurales en la vegetación y variaciones en la composición de especies. Esta combinación de escalas y resoluciones resulta fundamental para interpretar de manera más precisa la severidad de los incendios. Al integrar ambas herramientas, se logra un análisis más robusto que valida los datos de severidad y permite identificar patrones clave para entender cómo los incendios afectan la estructura y composición de la vegetación en la selva.

V.5 Análisis de serie de tiempo de áreas quemadas

Los incendios forestales son fenómenos complejos que impactan de manera diversa en la vegetación a lo largo del tiempo. En una serie temporal de vegetación de selva post-incendio, el comportamiento del NDVI puede variar dependiendo de varios factores, como la severidad del incendio, el tipo de vegetación afectada, las condiciones climáticas posteriores al incendio y las intervenciones humanas para la recuperación (De Jong et al., 2013).

Los resultados obtenidos indican que el pardeamiento de la selva a causa de los incendios, ya sea inmediato o retardado, es la tendencia predominante en la región oriental de Escárcega. Esto sugiere una disminución en la salud y densidad de la vegetación, reflejando el daño causado por el fuego. Esta situación es preocupante, ya que podría estar señalando una degradación del ecosistema y una posible pérdida de biodiversidad (Estrada, 2003; Guerra Martínez et al., 2020). Sin embargo, se observan tendencias hacia el enverdecimiento en los años 2016 y 2019, particularmente en áreas con severidad moderada a alta, lo que indica un proceso de revegetación. Lo que indica que algunas áreas tienen la capacidad de recuperarse después de los incendios, lo que podría ser un signo de resiliencia ecológica y adaptabilidad (Díaz-Delgado, 2003; Guerra Martínez et al., 2020; Hartung et al., 2021; Verbesselt et al., 2016). Este fenómeno resalta la importancia de los procesos naturales de sucesión ecológica y regeneración que ocurren tras los disturbios causados por el fuego (Guerra Martínez et al., 2020; Verbesselt et al., 2016)

Es crucial reconocer que los incendios pueden tener impactos tanto negativos como positivos. A corto plazo, es evidente que causan daño al reducir el NDVI y afectar negativamente la cobertura vegetal. No obstante, a largo plazo, pueden actuar como catalizadores para la renovación y el crecimiento vegetal, contribuyendo así a la diversidad y dinamismo del ecosistema (Hartung et al., 2021).

En el análisis anual, los años 2016, 2019 y 2020 se destacan por presentar las tendencias más negativas. Esto coincide con el análisis de severidad realizado, que muestra un aumento en la superficie de selva afectada por incendios durante esos años, así como un incremento en la severidad moderada y alta de los mismos. No obstante, también se observó el enverdecimiento de ciertos píxeles, lo cual coincide con áreas identificadas en el estudio de severidad como zonas de recrecimiento de la vegetación. Esto sugiere que los incendios no alcanzaron una severidad que hubiera impedido la recuperación de la selva. Este análisis anual resalta la importancia de monitorear continuamente las tendencias del NDVI en el área en

estudio para comprender mejor los impactos a largo plazo de los incendios en la selva y desarrollar estrategias de manejo que promuevan la resiliencia y recuperación del ecosistema (Guerra Martínez et al., 2020).

En la selva baja espinosa subperennifolia, la prevalencia de pardeamiento indica que los incendios han tenido un impacto negativo más significativo, lo que podría estar relacionado con la menor resiliencia de este tipo de vegetación o con la severidad de los incendios en esa área. Por otro lado, la selva mediana subperennifolia muestra una tendencia más positiva, con predominio del enverdecimiento, lo que sugiere una mayor capacidad de recuperación o condiciones menos severas durante los incendios (Hartung et al., 2021).

El análisis por tipo de vegetación revela una tendencia general hacia el deterioro del NDVI, especialmente en la vegetación primaria, lo que es alarmante ya que indica un impacto negativo sostenido en áreas consideradas conservadas. Esto podría tener implicaciones graves para la biodiversidad y la estabilidad ecológica del área. La diferencia en la recuperación entre la vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva mediana subperennifolia destaca cómo el estrato vegetal influye en la resiliencia post-incendio. Mientras que la vegetación arbustiva parece no recuperarse tan claramente, la arbórea muestra signos de recuperación, lo que sugiere que las estrategias de manejo y conservación deben ser adaptadas según el tipo y estrato de vegetación.

La presencia marcada de tendencias de pardeamiento y pardeamiento demorado en los ejidos sugiere que el uso del fuego, ya sea intencional para la preparación de tierras agrícolas o accidental por escapes de quemas controladas, está afectando negativamente la vegetación de selva. El patrón observado en ejidos como El Lechugal, El Centenario y N.C.P.E. Lic. Adolfo López Mateos indica que las prácticas actuales de manejo del fuego podrían no ser sostenibles y están contribuyendo a la degradación del ecosistema. Esto es preocupante ya que no solo

afecta la densidad y salud de la vegetación sino también puede tener consecuencias a largo plazo en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que provee la selva.

Las observaciones de campo y el análisis de imágenes satelitales confirman que el pardeamiento está directamente relacionado con el establecimiento de asentamientos humanos y el uso del fuego como herramienta para realizar cambio de uso de suelo como en el ejido El Centenario, El Lechugal y en asentamientos irregulares como la localidad de Licenciado Andrés Manuel López Obrador ubicada en la Zona Federal.

Espectralmente, el NDVI aprovecha la diferencia entre las bandas del infrarrojo cercano (donde la vegetación sana refleja más luz) y el rojo (donde la vegetación sana absorbe más luz). Inmediatamente después de un incendio, es común observar una disminución en los valores del NDVI debido a la pérdida de vegetación y al oscurecimiento de la superficie por las cenizas. Con el tiempo, si las condiciones son favorables y no hay intervenciones negativas adicionales, se puede observar un incremento gradual en los valores del NDVI a medida que la vegetación comienza a recuperarse y regenerarse. En algunos casos, si el fuego fue muy severo o si el suelo ha sido erosionado o alterado significativamente, la recuperación puede ser más lenta o incluso estancarse, lo que se reflejaría en un estancamiento o incluso una disminución adicional en los valores del NDVI. Es importante monitorear el NDVI a lo largo del tiempo para entender cómo se recupera la vegetación y para identificar áreas que puedan necesitar intervención para su restauración.

CAPÍTULO VI CONCLUSIÓN

La región oriental del municipio de Escárcega, Campeche, se caracteriza por su vegetación de selva bien conservada, según reportes del INEGI (2018). Sin embargo, entre 2013 y 2020, esta área ha sido gravemente afectada por incendios. Por ello, el objetivo general de esta investigación fue analizar los impactos de los

incendios ocurridos durante este período en la selva de la región, utilizando datos satelitales y la participación de actores sociales. Esto permitió evaluar la distribución de las áreas quemadas, la severidad de los incendios y determinar si las áreas afectadas presentan procesos de recuperación o degradación. Este análisis es crucial, ya que los incendios representan una amenaza directa para estos ecosistemas, afectando la seguridad alimentaria, el empleo y el patrimonio cultural de las comunidades locales, así como de los visitantes que dependen de los servicios ambientales que estas selvas ofrecen.

Se utilizaron imágenes satelitales e índices espectrales, como el BAI y NBR, para identificar incendios y caracterizar los cambios en las áreas afectadas. Estas herramientas fueron clave para la delimitación de áreas quemadas, mostrando una confiabilidad aceptable, con un índice Kappa de 88.75%. Las actividades de campo y las entrevistas con actores gubernamentales y locales complementaron el análisis, proporcionando una comprensión más profunda de los impactos de los incendios en la selva y las comunidades.

Los resultados indican que la severidad de los incendios está estrechamente relacionada con prácticas agropecuarias inadecuadas y la caza furtiva, identificadas como causas significativas de la vulnerabilidad de la selva ante incendios. La falta de monitoreo continuo y la rotación de personal en las dependencias complican la implementación efectiva de medidas preventivas y de restauración. Asimismo, la adaptación del conocimiento tradicional sobre el uso del fuego a las condiciones climáticas cambiantes y la promoción de métodos controlados son esenciales para mitigar los impactos negativos en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Desde la perspectiva de los brigadistas, quienes enfrentan directamente los desafíos operativos en la gestión de incendios, se resalta la importancia crítica de la colaboración comunitaria y la necesidad de recursos adecuados para mejorar la capacidad de respuesta. La pandemia de COVID-19 exacerbó las dificultades

logísticas, evidenciando la necesidad de estrategias flexibles y adaptativas en el manejo de emergencias ambientales.

Las entrevistas con actores locales subrayan la interdependencia entre el bienestar humano y la conservación ambiental. Las comunidades ejidales dependen de la selva para obtener múltiples recursos, incluyendo alimentos, medicinas tradicionales y actividades económicas como la apicultura y el turismo. Los incendios representan una amenaza directa a estos recursos, afectando la seguridad alimentaria, el empleo y el patrimonio cultural de las comunidades locales.

En resumen, la gestión integral y colaborativa de los incendios forestales requiere políticas públicas robustas, educación ambiental continua y el compromiso activo de todos los actores involucrados. La implementación efectiva de medidas preventivas, la innovación en prácticas agrícolas sostenibles y la conservación de la biodiversidad son fundamentales para asegurar la resiliencia de estos ecosistemas frente a los desafíos ambientales y sociales emergentes.

Los análisis realizados muestran un incremento significativo en las áreas quemadas durante el período de estudio, atribuible a fenómenos meteorológicos, prácticas agrícolas y falta de atención gubernamental. La mayoría de las áreas afectadas se encuentran en la selva mediana subperennifolia, con ejidos como El Lechugal y El Centenario registrando las mayores superficies quemadas. Esto destaca la necesidad urgente de mejorar las técnicas de manejo del fuego y la supervisión, como lo demuestra la menor incidencia de incendios en el ejido Silvituc, donde se ubica el Área Natural Protegida Balam-Kú.

El análisis de la severidad de los incendios reveló variaciones significativas en la estructura de la vegetación. En áreas de alta severidad, predominan especies como *Brachiaria fasciculata*, reflejando un cambio de uso del suelo hacia actividades agropecuarias. Mientras tanto, en áreas de severidad moderada, la regeneración de especies arbóreas como *Metopium brownei* y *Lysiloma latisiliquum* subraya la

importancia de implementar estrategias de manejo que consideren el tipo de vegetación y la severidad del incendio. El uso de RPAS demostró ser una herramienta para la evaluación de la severidad de los incendios en la selva, al proporcionar imágenes de alta resolución que complementan los datos satelitales y las observaciones de campo.

Finalmente, el análisis de la serie temporal del NDVI muestra una tendencia hacia el pardeamiento en gran parte de la región, lo que sugiere una disminución en la salud y densidad de la vegetación. Sin embargo, la presencia de tendencias hacia el enverdecimiento en algunas áreas sugiere que la resiliencia ecológica es posible bajo ciertas condiciones. Este fenómeno resalta la importancia de los procesos naturales de sucesión ecológica y la necesidad de monitorear continuamente el estado de la vegetación para implementar estrategias de recuperación adecuadas.

En conclusión, la variabilidad en la distribución del área quemada y la resiliencia observada en algunas zonas reflejan las complejas dinámicas del fuego en la región. A pesar de los desafíos, la regeneración natural de la vegetación en varias áreas afectadas resalta el potencial de recuperación de la selva. No obstante, es crucial implementar estrategias integradas y adaptativas para proteger estos ecosistemas tropicales y mitigar los impactos del fuego mediante una gestión más efectiva y sostenible.

CAPÍTULO VII REFERENCIAS

- Alcántar-Mejía, J., Carranza-González, E., Cuevas-García, G., & Cuevas-García, E. (2012). Distribución geográfica y ecológica de *Ipomoea* (Convolvulaceae) en el estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 731–741. <https://doi.org/10.7550/rmb.25370>
- Anaya, J. A., & Chuvieco, E. (2012). Accuracy Assessment of Burned Area Products in the Orinoco Basin. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(1), 53–60. https://gofcgold.umd.edu/sites/default/files/2020-01/anaya_chuvieco_pers_2012.pdf
- Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez Y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledeteccion*, 2017(49 Special Issue), 49–61. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>
- Ariza Pastrana, A. (2017). *Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección* [Programa de doctorado en cartografía, SIG y Teledetección]. Universidad de Alcalá.
- Armenteras, D., González, T. M., Ríos, O. V., Elizalde, M. C. M., & Oliveras, I. (2020). Fire in the ecosystems of northern south america: Advances in the ecology of tropical fires in Colombia, Ecuador and Peru. *Caldasia*, 42(1), 1–16. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>
- Arriaga, L., Aguilar, V., & Alcocer, J. (2002). *Regiones Hidrológicas Prioritarias*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rhpri4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, 84–85, 8–15. www.isiknowledge.com
- Beraldi-Campesi, H. (2014). La vida temprana en la Tierra y los primeros ecosistemas terrestres. *Boletín de la sociedad geológica Mexicana*, 66(1), 65–83. <http://www.ecologicalprocesses.com/series/BSC>
- Bright, B. C., Hudak, A. T., Kennedy, R. E., Braaten, J. D., & Henareh Khalyani, A. (2019). Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series

- analysis in three western North American forest types. *Fire Ecology*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>
- Carbajal-Domínguez, A. (2024). Aplicaciones y regulaciones de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS). *Dignos y humanos*, 7, 12–21. https://www.rcastellanos.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DignosyHumanos/dh_numero7_sept2024_b.pdf
- Cash, D. W., Neil Adger, W., Berkes, F., Garden, P., Lebel, L., Olsson, P., Pritchard, L., & Young, O. (2006). *Scale and Cross-Scale Dynamics: Governance and Information in a Multilevel World* (Vol. 11, Número 2). and Society. <https://about.jstor.org/terms>
- CBD. (2010). *Perspectiva mundial sobre la diversidad biológica*. <https://www.cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-es.pdf>
- Ceballos, G., Martínez, L., García, A., Espinoza, E., Bezaury, J., & Dirzo, R. (2010). *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del Pacífico de México*. Fondo de Cultura Económica, CONABIO.
- CEMECHAMP. (2011). *Programa Preventivo Contra Incendios Forestales y Agropecuarios 2011*.
- CENECAM. (2013). *Plan Estatal de Contingencia para Incendios Forestales y Agropecuarios 2013*.
- Chang-Martínez, L. A. (2017). *Modelación histórico-espacial de cambio de cobertura/ uso de suelo: Calakmul*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chuvieco, E., & Kasischke, E. S. (2007). Remote sensing information for fire management and fire effects assessment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G1), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2006JG000230>
- Chuvieco Salinero, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. En *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)* (Vol. 103, Número 1).
- Cochrane, M. A. (2009). *Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics* (1a ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2023). *Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Balam Kú*. <https://www.conanp.gob.mx/pdf/separata/EPJ-RB-BalamKu.pdf>

- CONABIO. (2004). *Regiones Terrestres Prioritarias*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2014). *Población indígena por localidad, 2010*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONABIO. (2015). *Cobertura del Suelo de México a 30 metros, 2015*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2020). *Puntos de calor detectados con imágenes de satélite*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. . <http://incendios.conabio.gob.mx/>
- CONABIO. (2022). *Portal de Geoinformación*. Portal De Geoinformación 2023 y Sistema Nacional De Información Sobre Biodiversidad (SNIB). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAFOR. (2021). *Adaptación de ecosistemas al fuego*. Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR). https://idefor.cnf.gob.mx/layers/geonode%3Aadaptacion_de_ecosistemas
- Cruz Espíndola, M. Á., Rodríguez Trejo, D. A., Villanueva Morales, A., & Santillán Pérez, J. (2017). Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 139–163. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i41.29>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). *Precipitación anual en México (1910-2009)*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/preanu13gw.html>
- De Jong, R., Verbesselt, J., Zeileis, A., & Schaepman, M. E. (2013). Shifts in global vegetation activity trends. *Remote Sensing*, 5(3), 1117–1133. <https://doi.org/10.3390/rs5031117>
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jimenez, J. C., Sobrino, J. A., Soria, G., & Moreno, J. (2018). Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 51, 47–60. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>
- Díaz-Delgado, R. (2003). Efecto de la recurrencia de los incendios sobre la resiliencia postincendio de las comunidades vegetales de Cataluña a partir de

- imágenes de satélite. *Ecosistemas*, 3.
<http://www.aeet.org/ecosistemas/033/investigacion2.htm>
- DJI. (2021, mayo 13). *Manual de usuario DJI Mini 2*.
https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mini_2/20210222/DJI_Mini_2_User_Manual_ES.pdf
- DOF. (2020). *Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*.
- DOF. (2024). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS.pdf>
- EOS Data Analytics. (2024). *Bandas Landsat 8: Combinaciones y usos en imágenes*. <https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/>.
- Estrada, A., & Coates-Estrada, R. (2003). *Las selvas tropicales húmedas de México. Recurso poderoso, pero vulnerable*. La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. <https://fce.com.co/producto/las-selvas-tropicales-humedas-de-mexico-recurso-poderoso-pero-vulnerable/>
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo*.
- FAO, & PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. En *El estado de los bosques del mundo 2020*. FAO and UNEP.
<https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Fernández, A. S., Pérez, C. G., Ortega, J. B., Pech, Z. G. H., Castillo, J. E., & Saavedra, A. L. (2020). Brosimum Alicastrum Swartz as an alternative for the productive reconversion of agrosilvopastoral areas in Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61).
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.722>
- Ferro-Díaz, J. (2015). Manual revisado de métodos útiles en el muestreo y análisis de la vegetación. *ECOVIDA*, 5(2076), 139–186.
- FIRMS. (2022). *Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. FIRMS is part of NASA's Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS.
<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
- Flores-Garnica, J. G. (2021). Retrospective and perspectives of forest fire research at INIFAP. En *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* (pp. 91–117). National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2021). Comparative analysis of spectral indices to locate and size levels of severity of forest fires. *Investigaciones Geograficas*, 106.
<https://doi.org/10.14350/rig.60396>

- FMCN, CONAFOR, USAID, & USFS. (2018). *Manual para muestrear la vegetación en bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas*. BIOCOMUNI-Monitoreo Comunitario de la Biodiversidad, una guía para núcleos agrarios, Comisión Nacional Forestal-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. www.gob.mx/conaforwww.usfs.gov
- García, E., & CONABIO. (2001). *Climas, (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000*. México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Gentry, A. H. (1992). Tropical Forest Biodiversity: Distributional Patterns and Their Conservational Significance. *Oikos*, 63(1), 19–28. <https://doi.org/10.2307/3545512>
- GloVis. (2021). *USGS Global Visualization Viewer (GloVis)*. U.S. Geological Survey (USGS). <https://glovis.usgs.gov/>
- Gobierno Municipal de Escárcega. (2018). *Plan de Desarrollo Municipal Escárcega 2018-2021*.
- Gómez-Sánchez, E., de las Heras, J., Lucas-Borja, M., & Moya, D. (2017). Ajuste de metodologías para evaluar severidad de quemado en zonas semiáridas (SE peninsular): Incendio donceles 2012. *Revista de Teledeteccion*, 2017(49 Special Issue), 103–113. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7121>
- Guerra Martínez, F., García Romero, A., & Martínez Morales, M. A. (2020). Evaluación de la resiliencia ecológica de los bosques tropicales secos: una aproximación multiescalar. *Madera y Bosques*, 26(3), 1–19. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631983>
- Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Miralles, V., & Espinós-Morató, H. (2017). Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledeteccion*, 2017(49 Special Issue), 63–77. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117>
- Gutiérrez Martínez, G., Orozco Hernández, M. E., Ordóñez Díaz, J. A. B., & Camacho Sanabria, J. M. (2014). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 92–107. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n29/v6n29a7.pdf>
- Hammer, D. A. T., Ryan, P. D., Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. En *Palaeontologia Electronica* (Vol. 4, Número 1). http://palaeo-electronica.orghttp://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

- Hammer, D., & Wildavsky, A. (1990). La entrevista semi-estructurada de final abierto. Aproximación a una guía operativa. *Historia, antropología y fuentes orales*, 23–61. <https://doi.org/10.2307/27753290>
- Hartung, M., Carreño-Rocabado, G., Peña-Claros, M., & van der Sande, M. T. (2021). Tropical Dry Forest Resilience to Fire Depends on Fire Frequency and Climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.755104>
- Hernández-Rodríguez, Z. G., Castro-Moreno, M., González-Esquinca, A. R., & De-La-cruz-chacón, I. (2021). Phenology of *Bursera simaruba* and *Bursera tomentosa* at a tropical dry forest of Chiapas, Mexico. *Madera y Bosques*, 27(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732246>
- Hirschberger, P. (2016). 2017 STUDY FORESTS ABLAZE Causes and effects of global forest fires. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Study-Forests-Ablaze.pdf>
- Ibarra-Manríquez, G., Cornejo-Tenorio, G., González-Castañeda, N., Piedra-Malagón, E. M., & Luna, A. (2012). El género *Ficus* L. (Moraceae) en México. *Botanical Sciences*, 90(4), 389–452. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982012000400004
- INEGI. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica Escala 1:50,000 Edición 2.0*. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250, 000 : serie V*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825294038>
- INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- INEGI. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INIFAP, & CONABIO. (2008). *Edafología*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

IPCC. (2022). *Intergovernmental Panel on Climate Change Mitigation of Climate Change*.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J., & Baret, F. (2000). Developments in the “validation” of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21(17), 3383–3390. <https://doi.org/10.1080/014311600750020000>

Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>

Keeley, J. E., Brennan, T., & Pfaff, A. H. (2008). Fire severity and ecosystem responses following crown fires in California shrublands. *Ecological Applications*, 18(6), 1530–1546. <http://frap.cdf.ca.gov/socal03/tables/fuels.html>

Kelly, L. T., Fletcher, M.-S., Menor, I. O., Pellegrini, A. F. A., Plumanns-Pouton, E. S., Pons, P., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. J. S. (2024). *Understanding Fire Regimes for a Better Anthropocene*. 21, 20. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120220>

Key, C. h., & Benson, N. (2006). *Landscape Assessment: (LA) Sampling and Analysis Methods*. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164/rmrs_gtr164_13_land_assess.pdf

Leirana-Alcocer, J. L., Hernández-Betancourt, S., Salinas-Peba, L., & Guerrero-González, L. (2009). Cambios en la estructura y composición de la vegetación relacionados con los años de abandono de tierras agropecuarias en la selva baja caducifolia espinosa de la Reserva de Dzilam, Yucatán. *Polibotánica*, 27, 53–70. <https://www.encb.ipn.mx/assets/files/encb/docs/polibotanica/revistas/pb27/dzil.pdf>

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. En *International Journal of Wildland Fire* (Vol. 15, Número 3, pp. 319–345). <https://doi.org/10.1071/WF05097>

López García, A. R. (2020). Estudio de la severidad y regeneración de la vegetación por el incendio de 2012 en el Bosque La Primavera (México)

- mediante imágenes LANDSAT 7. *Revista Cartográfica*, 101, 35–50.
<https://doi.org/10.35424/rcarto.i101.420>
- Manzo Delgado, L., & López García, J. (2013). Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *GeoFocus*, 2(13), 66–83.
<https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/288>
- Manzo-Delgado, L. L., & López-García, J. (2020). Spatial and temporal analyses of burned areas 1998, 2003 and 2015 in montes azules biosphere reserve, Chiapas, Mexico. *Bosque*, 41(1), 11–24. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011>
- Manzo-Delgado, L., Sánchez-Colón, S., & Álvarez, R. (2009). Assessment of seasonal forest fire risk using NOAA-AVHRR: a case study in central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19), 4991–5013.
<https://doi.org/10.1080/01431160902852796>
- Margarita, L., Cardona, F., Norge, R., Deroncé, R., & Cantillo, F. A. (2011). Successional studies on a site antropized in ecotope of semideciduos microphyll forest in Juticí, Santiago de Cuba. En *Foresta Veracruzana* (Vol. 13, Número 1).
- Martínez Domínguez, R., & Rodríguez Trejo, D. A. (2008). Los Incendios Forestales en México y América Central. *El Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global*.
- Martín-Sánchez, J. L. (2016). Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 22(2), 29–40.
<https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1322>
- Meira Cartea, P. Á. (2013). Problemas ambientales globales y educación ambiental. *Integra educativa*, VI(3), 29–64.
- Montorio Llovería, R., Pérez Cabello, F., García Martín, A., Riva Fernández Vlassova, L., & de la Riva Fernández, J. R. J. R. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz* (pp. 427–440). Instituto Pirenaico de Ecología.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4854191>
- Monzón Alvarado, C. (2018). El manejo del fuego en Calakmul, Campeche: incendios forestales, gobernanza y variabilidad local de la precipitación. *CIENCIA ergo sum*, 25(3), e23.1-e23.15.
<https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a1>

- Monzón-Alvarado, C., Cortina-Villar, S., Schmook, B., Flamenco-Sandoval, A., Christman, Z., & Arriola, L. (2012). Land-use decision-making after large-scale forest fires: Analyzing fires as a driver of deforestation in Laguna del Tigre National Park, Guatemala. *Applied Geography*, 35(1–2), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.04.008>
- Monzón-Alvarado, C., Waylen, P., & Keys, E. (2014). Fire management and climate variability: Challenges in designing environmental regulations. *Land Use Policy*, 39, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.03.003>
- Morgan, P., Hardy, C. C., Swetnam, T. W., Rollins, M. G., & Long, D. G. (2001). Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 10(3–4), 329–342. <https://doi.org/10.1071/wf01032>
- Morgan, P., Keane, R. E., Dillon, G. K., Jain, T. B., Hudak, A. T., Karau, E. C., Sikkink, P. G., Holden, Z. A., & Strand, E. K. (2014). Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 23(8), 1045–1060. <https://doi.org/10.1071/WF13058>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Editorial El País. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACL893.pdf
- Negreros-Castillo, P., & Martínez Salazar, I. (2011). Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. En una selva de Quintana Roo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(5), 15–28. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000300003
- Nemmaoui, A., García-Lorca, A. M., Aguilar, F. J., & Aguilar, M. A. (2013). Series temporales de vegetación para un modelo forestal destruido: El caso de Tadla Azilal (Marruecos). *Agrociencia*, 47(3), 267–280.
- Nigh, R., & Diemont, S. A. W. (2013). The Maya milpa: Fire and the legacy of living soil. En *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 11, Número SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1890/120344>
- NOAA. (2020). *El Niño / Southern Oscillation (ENSO)*. Climate Prediction Center, National Weather Service (NOAA). <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>
- NOAA. (2021). *Central Pacific Hurricane Center (CPHC)*. US Dept of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, Central Pacific Hurricane Center. <https://www.nhc.noaa.gov/>

- Oddi, F. J. (2018). Fire Regime. En *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1–12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_73-1
- Ojeda-Bustamante, W., González-Sánchez, A., Mauricio-Pérez, A., & Flores-Velázquez, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 157–166. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-10>
- Pagan, A., Rogan, J., Schmook, B., Christman, Z., & Sangermano, F. (2021). Understanding agricultural fire dynamics in the southern Yucatán Peninsular Region using the MODIS (C6) active fire product. *Remote Sensing Letters*, 12(7), 715–726. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1931530>
- Pérez Rodríguez, J. C., Guízar Vázquez, F., & Bello Baltazar, E. (2018). Conflicto territorial, ecoturismo y cacería no regulada: el traslape de territorialidades en el Área Natural Protegida de Balam-Kú. *Pasos. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 16(4), 909–925. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2018.16.064>
- Planet Labs PBC. (2023, mayo 2). *Planet*. <https://www.planet.com/>
- PLEC. (2020). *Ley de Desarrollo Forestal Sustentable Para El Estado de Campeche*. <https://legislacion.congresocam.gob.mx/index.php/etiquetas-x-materia/31-ley-de-desarrollo-forestal-sustentable-para-el-estado-de-campeche>
- Poder Legislativo del Estado de Campeche. (2015). *Ley de Uso de Fuego en Terrenos Agropecuarios en el Estado de Campeche*.
- POEOGCEC. (2015). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Escárcega, Campeche*.
- PRONATURA, & Gobierno de Campeche. (2012). *Sistema Estatal de áreas Naturales Protegidas del Estado de Campeche*. <https://conacyt.mx/cibiogem/index.php/anpl/campeche>
- Ramírez, F. C., Castillo, G. A., Flores, Y., Galván, O. F., Riveros, L., & Sáenz, L. H. (2021). Composición, estructura e importancia ecológica de las Moraceae en un bosque residual de Ucayali, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 247–260. <https://doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1801>
- RAN. (2021). *Sistema de Información Geoespacial del Catastro Rural*. Registro Agrario Nacional. <https://sig.ran.gob.mx/sigIntroduccion.php>
- Ressl, R., Lopez, G., Cruz, I., Colditz, R. R., Schmidt, M., Ressler, S., & Jiménez, R. (2009). Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct

- readout data. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1113–1126.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.016>
- Reyes Díaz Gallegos, J., García Gil, G., & Castillo Acosta, O. (2001). Uso del suelo y transformación de selvas en un ejido de la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas*, 1(44), 39–53.
<https://doi.org/10.14350/rig.59134>
- Rodríguez Silva, E. A. (2018). *Evaluación de instrumentos de política pública para la sostenibilidad de la Selva Lacandona, Chiapas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia* (Vol. 1). Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Semarnat, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Conafor, Conanp, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, ANCF, AMPF.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna, J. A., Martínez-Lara, P. J., & Cruz-López, J. D. (2019). *Instructivo de quemas prescritas para el manejo integral del fuego en el municipio de Villaflores y la Reserva de la Biosfera la Sepultura, Chiapas, México*. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, USDA FS, US AIDE, BIOMASA, A. C., Universidad Autónoma Chapingo, Ayuntamiento de Villaflores, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP, Gobierno del Estado de Chiapas, ANCF.
http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/Instructivo_de_quemas.pdf
- Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Cíntora-González, C., Contreras-Aguado, R., & Rosa-Vázquez Alfonso de la. (2011). Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, 45, 593–608. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000500006&nrm=iso
- Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (1999). *Flora del Bajío y de regiones adyacentes - Familia Anacardiaceae*.
<https://libros.inecol.mx/index.php/FB/catalog/book/1999.78>
- Santana, N., de Carvalho Júnior, O., Gomes, R., & Guimarães, R. (2018). Burned-Area Detection in Amazonian Environments Using Standardized Time Series Per Pixel in MODIS Data. *Remote Sensing*, 10(12), 2–27.
<https://doi.org/10.3390/rs10121904>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., Quayle, B., Lorenz, E., & Morelli, F. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, 185, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.032>

- SEMABICCE. (2022, junio 1). *Atentas las brigadas de combatientes de incendios forestales*. SEMABICE. <https://www.semabicce.campeche.gob.mx/prensa-cats/facebook/page/4/>
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde edición 2015*.
- SEMARNAT, & CONAFOR. (2019). *Programa de Manejo del Fuego 2020-2024*.
- SEMARNAT, & SAGARPA. (2007). *NORMA Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007*.
- SMN. (2020, mayo 23). *Normales climatológicas por estado*. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=camp>
- SMN. (2021). *Archivos shapefiles del Monitor de Sequía en México (MSM) generados en el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN)*. Monitor de sequía de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- SNIGF. (2020, diciembre 1). *Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal*. <https://snigf.cnf.gob.mx/>
- Sturges, H. A. (1926). The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Tecuapetla-Gómez, I., Carbajal-Domínguez, A., & Montesinos-Chica, V. (2022). Clasificación de tendencias de NDVI en la península de Yucatán, México, de 2014 a 2020. *Investigaciones Geográficas*, 109. <https://doi.org/10.14350/rig.60629>
- Tecuapetla-Gómez, I., Villamil-Cortez, G., & Cruz-López, M. I. (2021). Statistical Estimate of Burned Areas in La Primavera (Mexico) from 2003 to 2016 Using Time Series of Landsat-7 Images. *Investigaciones Geograficas*, 106. <https://doi.org/10.14350/rig.60418>
- The Nature Conservancy. (2004a). *El fuego, los Ecosistemas y la Gente: Una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación*.
- The Nature Conservancy. (2004b). *El Fuego, los ecosistemas y la gente. Una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación*. <http://nature.org/fire>
- Thomas, S. C., & Baltzer, J. L. (2002). Tropical Forests. En *Encyclopedia of Life Sciences*. Wiley. <https://doi.org/10.1038/npg.els.0003179>

- Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change. En *Science* (Vol. 349, Número 6250, pp. 814–818). American Association for the Advancement of Science.
<https://doi.org/10.1126/science.aac6759>
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Zeileis, A., & Culvenor, D. (2010). Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2970–2980.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.003>
- Verbesselt, J., Umlauf, N., Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Herold, M., Zeileis, A., & Scheffer, M. (2016). Remotely sensed resilience of tropical forests. *Nature Climate Change*, 6(11), 1028–1031.
<https://doi.org/10.1038/nclimate3108>
- Viana-Soto, A., Aguado, I., & Martínez, S. (2017). Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). *Environments*, 4(4), 2–17.
<https://doi.org/10.3390/environments4040090>
- Villers Ruiz, L., & López Blanco, J. (2004). *Incendios forestales en México* (Primera). <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2021/09/Incendios-forestales.pdf>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- Withey, K., Berenguer, E., Palmeira, A. F., Espírito-Santo, F. D. B., Lennox, G. D., Silva, C. V. J., Aragão, L. E. O. C., Ferreira, J., França, F., Malhi, Y., Rossi, L. C., & Barlow, J. (2018). Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760).
<https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0312>
- Zamora-crescencio, P., Del Rosario Domínguez-carrasco, M., Villegas, P., Gutiérrez-báez, C., Ariel Manzanero-acevedo, L., José Ortega-haas, J., Hernández-mundo, S., Celedonia Puc-garrido, E., & Rosalía Puch-chávez, Y. (2011). Composición Florística y Estructura de la vegetación secundaria en el norte del estado de Campeche, México. *Bol.Soc.Bot.Méx*, 89, 27–35.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/bsbm/n89/n89a3.pdf>
- Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., & Carlos Barrientos-Medina, R. (2017). Estructura y composición florística de la selva mediana subperennifolia en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, 43, 67–86.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62150424003>

Zarco–Espinosa, V., Valdez–Hernández, J., Ángeles–Pérez, G., & Castillo–Acosta, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 1(26), 1–17.

CAPÍTULO VIII ANEXOS

VIII.1 Entrevistas semiestructuradas

VIII.1.1 Entrevista semiestructurada aplicada de manera general a ejidatarios, autoridades locales (comisarios ejidales o miembros de los comités de incendios locales)

Introducción

Mi nombre es Alfonso Carbajal soy estudiante de la UNAM, estudio el doctorado en geografía.

Investigó sobre la historia de incendios que me permitan analizar los efectos de la severidad del fuego en la vegetación de selva y su aprovechamiento en la región oriental del municipio de Escárcega, Campeche para los años 2013-2020.

Realizó entrevistas a autoridades locales, comisarios ejidales, municipales, miembros del consejo de vigilancia o presidentes de los comités de incendios del oriente de Escárcega.

Sus respuestas son confidenciales, no se usará su nombre en ningún reporte.

No hay respuestas buenas ni malas.

¿Puedo grabar la conversación?

Su participación es voluntaria

1. Historia de incendios

1.1 ¿Pertenece a una población indígena? Si/No ¿Cuál?

1.2 ¿Dónde nació?

1.3 ¿Qué edad tiene? Sexo H____ M____

1.4 ¿Cuánto tiempo tiene viviendo en Escárcega?

1.5 ¿Actualmente en el ejido son beneficiarios de programas gubernamentales como PROGRAN, PSA y Sembrando Vida? Si/No ¿Cuál?

1.6 ¿En qué año se constituyó el ejido?

1.7 ¿Cuántos ejidatarios son?

1.8 ¿En este ejido realizan quemas agropecuarias para cultivo o ganadería? Si/No
¿Tiene un número aproximado?

1.9 ¿Preparan sus milpas mediante roza, tumba y quema?

1.10 ¿Cuántas veces se realizan quemas en un mes o en un año?

- 1.11 ¿En qué mes o meses se realizan las quemas?
- 1.12 ¿Es común en la comunidad o en la zona que el fuego se escape y queme el monte (selva)? Si/No ¿Por qué?
- 1.13 ¿Qué situaciones o características originan que se escape el fuego?
- 1.14 ¿Recuerdan un año o años en el que se quemó mucha superficie de monte (selva)?
- 1.15 ¿En los años 2013 a 2020 recuerda un año en el que se haya quemado mucha superficie de monte (selva) en el ejido?
- 1.16 ¿Cuándo fue el último incendio que usted recuerda?

2. Severidad de incendios

En esta parte de las entrevistas realizaré y mostraré un mapa impreso del ejido o llevaré una tableta que permita identificar a los ejidatarios áreas quemadas dentro de sus ejidos apoyándome de las imágenes de satélite y los resultados de los índices de quema.

- 2.1 ¿Ha recorrido las áreas de monte (selva) afectadas por el fuego? Si/No ¿Por qué?
- 2.2 ¿Son todos los incendios en el monte (selva) iguales? Si/No ¿Por qué?
- 2.3 ¿Puede identificar diferentes tipos de incendios? Si/No ¿Cómo?
- 2.4 ¿Qué factor influye en la severidad o gravedad de un incendio en el monte (selva)?
- 2.5 ¿Identifica zonas del año 2013 a 2020 donde los incendios hayan sido muy fuertes (severos o graves)? Si/No ¿Dónde? (Mostrar mapa)
- 2.6 ¿Considera que las áreas quemadas de monte (selva) por el incendio fueron severamente o gravemente afectadas? Si/No ¿Por qué? (Esta pregunta se relaciona con la información del mapa)
- 2.7 ¿Conoce áreas de selva que se han quemado más de una vez? (Mostrar mapa)
- 2.8 Si responde que sí a la pregunta anterior, ¿Qué diferencia hay entre áreas de selva (tipo de árboles, tamaño o presencia de nueva vegetación o alguna otra característica) que se han quemado una vez o más de dos veces?
- 2.9 ¿Qué factor influye en la severidad o gravedad de un incendio en el monte (selva)?
- 2.10 ¿Considera que los incendios son más severos o graves que antes? Si/No ¿Por qué?

2.11 ¿Cuánto tiempo calcula que necesita el monte (selva) para recuperarse de un incendio? ¿Ese tiempo varía si el incendio es grave o si es repetidamente? ¿Por qué?

3. Cuidado y beneficios de la selva en el ejido (Beneficios de la selva)

3.1 ¿Cuáles son las actividades productivas del ejido?

3.2 ¿Dentro del ejido realizan actividades de cuidado y conservación del monte (selva)?

3.3 ¿El ejido se beneficia o aprovecha algún recurso del monte (selva)? Si/No ¿Cuál o cuáles?

Tabla 1. Beneficios del monte (selva)				
	Beneficio del monte (selva)	Mes o meses de aprovechamiento	¿Es afectado o beneficiado por incendios?	¿Cómo o por qué es afectado?
1				
2				
3				
4				
5				

3.4 De todos los beneficios de la selva (monte) que mencionó en la pregunta anterior. ¿Cuál es el más importante para el ejido? Y ¿Por qué?

3.5 ¿Considera que ese beneficio o recurso se ha visto afectado por los incendios? Si o No ¿Por qué?

3.6 ¿Cree que la severidad o gravedad de los incendios en el monte (selva) tiene que ver con cuánto se afectan los recursos o beneficios de la selva? Si/No ¿Por qué?

3.7 ¿Considera que los incendios que se escapan al monte (selva) benefician o perjudican los servicios o recursos de la selva que aprovechan en el ejido? Si/No ¿Por qué?

3.8 ¿Cree que los beneficios y recursos que ofrece el monte (selva) en el ejido se puedan agotar en algún momento por los incendios? Si/No ¿Por qué?

3.9 ¿Participaría el ejido en programas que ayuden a cuidar, proteger y restaurar la selva (monte) afectada por incendios? Si/No ¿Por qué?

Tabla 2. Valor de los beneficios que obtiene de la selva (estas preguntas se aplicarán únicamente a población local, autoridades locales y combatientes de incendios)

	Alimentos (Plantas, frutos, raíces, miel, animales entre otros)	Combustibles (Leña para cocinar)	Medicinas (Plantas medicinales o animales medicinales)	Artesanías (Plantas ornamentales o productos para construir artesanías variadas)	Madera (Para construir puentes, casas, muebles, pilotes entre otros)	Agua (Infiltración y provisión)	Ecoturismo (Recorridos recreativos, senderismo en selva, visita de cenotes y prácticas de campo o educativas)	Actividades de conservación y restauración de la selva (Programas gubernamentales relacionados con actividades relacionadas al cuidado de la selva)
1 ¿Qué importancia tienen para usted? A) Ninguna B) Baja C) Media D) Alta								
2 ¿Aumenta o disminuye después de un incendio? A) Aumenta B) Disminuye C) Ni aumenta y tampoco disminuye								
4 ¿Se recupera después de un incendio?								

A) Si B) No C) No se								
5 ¿Qué tanto influye la severidad de los incendios en la recuperación de este beneficio o servicio ambiental? A) No influye B) Poco C) Medianamente D) Mucho								
6 ¿Cuánto tiempo tiene que pasar después de un incendio para que se recupere? A) Un año B) Dos años C) Más de dos años								

VIII.1.2 Entrevista considera a los brigadistas o combatientes contra incendios:

1. Historia de incendios

- 1.1 ¿Pertenece a una población indígena? Si/No ¿Cuál?
- 1.2 ¿Dónde nació?
- 1.3 ¿Qué edad tiene? Sexo H____ M____
- 1.4 ¿Cuánto tiempo tiene viviendo en Escárcega?
- 1.5 ¿Cuántos años tiene combatiendo incendios?
- 1.6 ¿Combate incendios sólo en Campeche? Si/No ¿Dónde más?
- 1.7 ¿Cuál es el municipio de Campeche donde más ha combatido incendios?
- 1.8 ¿Cuál es el nombre o número de su brigada? ¿Cuál institución apoya a su brigada?
- 1.9 ¿En qué ejidos ha realizado actividades de combate contra incendios?
- 1.10 ¿Cuál es el ejido en el que ha realizado más acciones de combate contra incendios?
- 1.11 En un año ¿Cuántos incendios llega a combatir?
- 1.12 ¿En qué mes o meses se realizan los combates contra incendios?
- 1.13 ¿Los incendios que combate son originados por quemas agropecuarias? Si/No ¿Por qué?
- 1.14 ¿En qué tipos de vegetación es común combatir incendios?
- 1.15 ¿Cuál es el principal tipo de vegetación que se quema?
- 1.16 ¿Recuerdan un año o años en el que se quemó mucha superficie de monte (selva)? Si/No ¿En qué ejido?
- 1.17 ¿En los años 2013 a 2020 recuerda un año en el que se haya quemado mucha superficie de monte (selva)? Si/No ¿En qué ejido? (Mostrar mapa con los resultados de las áreas quemadas)

2. Severidad de los incendios

- 2.1 ¿Qué tipo o tipos de selva hay en Escárcega?
- 2.2 ¿Cuál es el tipo de selva que se ha visto más afectada por el fuego? ¿Por qué? (Ejemplo tipos de plantas o condiciones atmosféricas como la sequía)
- 2.3 ¿Qué tipo de incendios son los que se dan en la selva?

a) Incendio superficial b) Incendio subterráneo c) Incendio de copa o aéreos d) Mixto

2.4 ¿Qué ocasiona que los incendios sean superficiales, subterráneos, de copa o aéreos?

2.5 ¿Qué estratos de la selva se ven más afectados por los incendios?

a) Herbáceo b) Arbustivo c) Arbóreo

2.6 ¿Qué especies arbóreas y arbustivas son las más afectadas por el fuego?

2.7 ¿Puede identificar zonas donde los incendios hayan sido muy fuertes (severos o graves)?
Sí/No ¿Cómo?

2.8 ¿Considera que las áreas quemadas de monte (selva) por incendios son severamente o gravemente afectadas? ¿Por qué?

2.9 ¿Conoce ejidos con áreas de selva que se han quemado más de una vez? Sí/No
¿Cuáles? (Mostrar mapa)

2.10 ¿Qué diferencia hay entre áreas de selva que se han quemado una vez o más de dos veces?

2.11 ¿Qué factor influye en la severidad o gravedad de un incendio en el monte (selva)?

2.12 ¿Considera que los incendios son más severos o graves que antes? Sí/No ¿Por qué?

2.13 ¿Cuánto tiempo calcula que el monte (selva) puede recuperarse de un incendio severo o grave? ¿Por qué?

2.14 ¿De qué depende la recuperación del monte (selva)? ¿Por qué?

3. Beneficios de la selva

3.1 ¿Usted se beneficia o aprovecha algún recurso del monte (selva)? Sí o No ¿Cuál?

3.2 ¿Considera que ese beneficio o recurso se ha visto afectado por los incendios? Sí o No
¿Por qué?

3.3 ¿Cree que la severidad o gravedad de los incendios en el monte (selva) tiene que ver con cuánto se afectan los recursos o beneficios de la selva? Sí/No ¿Por qué?

3.4 ¿Considera que los incendios que se escapan al monte (selva) benefician o perjudican los servicios o recursos de la selva? Sí/No ¿Por qué?

3.5 ¿Cree que los beneficios y recursos que ofrece el monte (selva) se puedan agotar en algún momento por los incendios? Sí/No ¿Por qué?

3.6 ¿Todos los beneficios de la selva (monte) son importantes? o ¿Hay unos más importantes que otros?

3.7 ¿Qué actividades cree que son las que más benefician la recuperación de la selva afectada por incendios?

VIII.1.3 Entrevista a funcionarios y organizaciones no gubernamentales

1. Historia de incendios

1.1 ¿Cuánto tiempo tienes trabajando con el tema del manejo del fuego?

1.2 ¿Cuáles son las actividades que desarrollan en el manejo del fuego?

1. Prevención
2. Control y combate

1.3 ¿Cuentan con mecanismos para darle seguimiento a los programas de prevención, control y combate de contingencias ambientales causadas por incendios forestales? ¿De qué tratan?

1.4 ¿Qué actividades cree que son las que más benefician la recuperación de la selva afectada por incendios?

1.5 ¿Cuánto tiempo calcula que necesita la selva para recuperarse de un incendio?

1.6 ¿Maneja algún registro o historial a nivel estado, municipio o ejido de quemas agropecuarias?

1.7 ¿Tiene conocimiento de cuál es el principal estado municipio con más incendios forestales? Si/No ¿Cuál?

1.13 ¿Recuerdan un año o años en el que se quemó mucha superficie de selva? Si/No ¿En que donde?

1.14 ¿En los años 2013 a 2020 recuerda un año en el que se haya quemado mucha superficie de selva? Si/No ¿En dónde?

1.15 ¿Creen que el número y magnitud de incendios está aumentando? Si/No ¿Por qué?

1.16 ¿Qué factores pudieran estar incidiendo en la ocurrencia de incendios? Años más secos o aumento de población u otros.

1.17 ¿Cuáles son las principales causas de los incendios forestales en Campeche?

a) Accidentales____ b) Negligencias____ c) Intencionales____ d) Naturales____ e) Cambio de uso de suelo____ f) Temporada de quemas_____

2. Severidad de los incendios

2.1 ¿Considera que sea importante estudiar el efecto que tiene el fuego en la vegetación de selva? Si/No ¿Por qué?

2.2 ¿Cuál es el tipo de selva que se ha visto más afectada por el fuego? ¿Por qué?

2.3 ¿Son todos los incendios en la selva iguales? Si/No ¿Por qué?

2.4 ¿Qué tipo de incendios son los que se dan en la selva?

a) Incendio superficial b) Incendio subterráneo c) Incendio de copa o aéreos d) mixto

2.5 ¿Qué estratos de la selva se ven más afectados por los incendios?

a) herbáceo b) arbustivo c) arbóreo d) Mixtos _____

2.6 ¿Creen que es importante medir la severidad o gravedad de un incendio forestal? Si/No
¿Por qué?

2.7 ¿Considera que las áreas quemadas de selva por incendios son severamente o
gravemente afectadas? ¿Por qué?

2.8 ¿Qué factor climático influye en la severidad o gravedad de un incendio en la selva?

2.9 ¿Qué factor antropogénico influye en la severidad o gravedad de un incendio en la selva?

2.10 ¿Considera que los incendios son más severos o graves que antes? Si/No ¿Por qué?

2.11 ¿Tienen algún mecanismo que les permita evaluar la severidad de los incendios en la
vegetación? Si/No ¿Cuál?

2.12 ¿Cuentan con algún programa que permita recuperar o restaurar las áreas forestales
afectadas por el incendio?

3. Beneficios de la selva

3.1 ¿Qué servicios ambientales considera que se estarían afectando por los incendios en la
vegetación de selva?

3.3 ¿Cree que la severidad o gravedad de los incendios en la selva tienen que ver con cuánto
se afectan los recursos o beneficios de la selva? Si/No ¿Por qué?

3.5 ¿Cree que los beneficios y recursos que ofrece la selva se puedan agotar en algún
momento por los incendios? Si/No ¿Por qué?