



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

COMPLEJO REGIONAL NORTE – SEDE TETELA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL

**EVALUACIÓN DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE
CARGAS DE COMBUSTIBLE EN BOSQUES DE TETELA DE OCAMPO**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIA EN INGENIERÍA AGROFORESTAL**

PRESENTA

STEFFANY DOMÍNGUEZ JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ FILOMENO CONRADO PARRAGUIRRE LEZAMA

TETELA DE OCAMPO, PUEBLA. NOVIEMBRE DE 2023



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**COMPLEJO REGIONAL NORTE – SEDE TETELA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL**

**EVALUACIÓN DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE
CARGAS DE COMBUSTIBLE EN BOSQUES DE TETELA DE OCAMPO**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIA EN INGENIERÍA AGROFORESTAL**

PRESENTA:

STEFFANY DOMÍNGUEZ JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ FILOMENO CONRADO PARRAGUIRRE LEZAMA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. OMAR ROMERO ARENAS

ASESORES:





M.C. ALFREDO BÁEZ SIMÓN

DR. CARLOS ALBERTO CONTRERAS PAREDES

TETELA DE OCAMPO, PUEBLA. NOVIEMBRE DE 2023

La presente tesis titulada: **Evaluación de riesgo de incendios forestales mediante cargas de combustible en bosques de Tetela de Ocampo**. Realizada por la alumna **Steffany Domínguez Juárez**, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

**LINCENCIADA EN INGENIERÍA AGROFORESTAL
COMPLEJO REGIONAL NORTE – SEDE TETELA**

Consejo particular integrado por:	Firma
Director: Dr. José Filomeno Conrado Parraguirre Lezama	 _____
Co-Director: Dr. Omar Romero Arenas	 _____
Asesor: Dr. Carlos Alberto Contreras Paredes	 _____
Asesor: M.C. Alfredo Báez Simón	 _____

Tetela de Ocampo, Puebla, noviembre de 2023

El presente trabajo forma parte del cuerpo académico: **BUAP – CA – 348 – Biotecnología para la Agroalimentación y Agroecología**; y del Grupo de Investigación 22010 **Manejo Sostenible de Recursos Biológicos y Educación**.

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud a la Benemérita Universidad Autónoma De Puebla, por formar parte del cambio en mi vida. Por toda la experiencia adquirida en sus instalaciones, por las oportunidades y vivencias posibles al formar parte de ella. Por todas las personas maravillosas que logré conocer durante mi formación académica. Por todo el conocimiento, habilidades y aptitudes aprendidas.

Mis agradecimientos sinceros por la confianza del Dr. José Filomeno Conrado Parraguirre Lezama para ser director de esta tesis, por su tiempo, paciencia, orientación y enseñanzas; al Dr. Omar Romero Arenas por su asesoría, apoyo y conocimiento compartido; al Mtro. Alfredo Báez Simón por su disposición, colaboración y asistencia; y al Dr. Carlos Alberto Contreras Paredes por sus revisiones y apoyo.

Gratitud profunda a todos y cada uno de los profesores que me guiaron y acompañaron a lo largo de la carrera universitaria, en especial al Dr. Ignacio Vázquez Martínez por su amistad y al Mtro. Benjamín Barrios Díaz por su confianza en mí.

Agradezco a todos aquellos que contribuyeron de cierta manera a la elaboración de esta tesis en especial a Hipólito Hidalgo Manzano por su ayuda crucial en el trabajo de campo y su amistad, a Aurora por habernos hecho coincidir y por apoyarme siempre.

Este logro no habría sido posible sin el apoyo, reconocimiento y palabras de aliento de María Teresa Juárez Reyes, mi madre, quien nunca ha permitido que me rinda y me ha recalado de lo que soy capaz. Agradezco profundamente todo su amor, su ejemplo de fortaleza, dedicación al estudio y superación ante las adversidades.

Agradecimiento a mi abuelita Sara Reyes Espinoza quien siempre me ha motivado y bendecido en el transcurso de la carrera y de mi vida. Por todos sus consejos y su amor.

A Josecito por motivarme, escucharme y siempre reafirmarme que soy capaz de lograr lo que sea que me proponga, por ayudarme cada que lo necesité, por su amor incondicional y por la alegría que le dio a este proceso y a mi vida.

A Maritza, Lupita y Lizbeth por su amistad, por las risas y acompañamiento durante el proceso de elaboración de este trabajo y a lo largo de estos años universitarios. A mi compañero Emma, por alentarme con las palabras precisas que llevo siempre presentes.

DEDICATORIA

Para mi amada madre, Tere, la razón de mi existencia. Todo es y será siempre por y para ti. Te amo.

A mis abuelitos, Sarita y Juanito, un ejemplo de amor y superación.

A mis hermanos, Paco y Tere, todo es posible.

Con cariño a Sofí, por ser luz en mi vida.

Con todo mi amor a Ángel de Jesús; aún faltan algunos años para que pueda leer esto por su cuenta, pero quiero que sepa que llegó a mi vida a inspirarme y motivarme. Te dedico éste y todos mis logros.

En especial a mi querido Mario (†), siempre conmigo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1. Incendios forestales.....	5
4.1.2. Tipos de incendios forestales	6
4.2. Incendios en México	6
4.2.1. Incendios en el Estado de Puebla.....	8
4.2.2. Incendios en Tetela de Ocampo.....	9
4.3. Evaluación de riesgos	10
4.4. Manejo del fuego y sus componentes	10
4.5. El triángulo del fuego.....	12
4.6. Ecología y Cultura del fuego	13
4.7. Prevención.....	13
4.7.1. Actividades preventivas	14
4.8. Brigadas contra incendios	15
4.8.1. Normas de combate de incendios según el Grupo Nacional Coordinador de Incendios Forestales (NWCG, por sus siglas en inglés), (2018).....	15

4.9. Combustibles forestales	16
4.9.1. Propiedades extrínsecas de los combustibles forestales	16
4.9.2. Clasificación de los combustibles	17
4.9.3. Evaluación de los combustibles forestales.....	18
4.10. Sistemas de Información Geográfica	18
4.11. Teledetección	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS	22
5.1. Descripción del área de estudio	22
5.2. Metodología	23
5.2.1. Asignación de conglomerados	23
5.2.2. Diseño del conglomerado de muestreo	25
5.2.3. Instalación del sitio de muestreo de combustible	25
5.2.4. Intersecciones planares	28
5.2.5. Formato de toma de datos	31
5.2.6. Evaluación de combustibles finos.....	31
5.2.7. Procesamiento de combustibles	33
5.3. Análisis de datos	34
5.3.1. Material leñoso caído.....	34
5.3.2. Determinación de la pendiente	35
5.3.3. Hojarasca y capa de fermentación	35
5.3.4. Carga total de combustibles forestales	36
5.3.5. Análisis estadístico	37
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
Carga de combustibles Forestales	38

Combustible leñoso por condición: quemado y no quemado	41
Capa de hojarasca (HO)	43
Capa de Fermentación.....	44
Caracterización de combustibles dentro de las zonas de muestreo.....	45
Mapas de los conglomerados	49
VII. CONCLUSIONES	57
VIII. BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	65
Anexo 1. Incendios forestales ocurridos en Tetela de Ocampo del 2020 al 2022	65
Anexo 2. Formato de registro de la clave del conglomerado, coordenadas y datos generales.	66
Anexo 3. Formato de registro para la medición de continuidad de combustibles (material leñoso caído).	66
Anexo 4. Formato de registro de combustibles finos: hojarasca y capa de fermentación.	67
Anexo 5. Formato de registro de combustibles vivos.	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Incendios forestales en Puebla en la última década: número de incendios y hectáreas de superficie afectada. Fuentes: SEMARNAT (2022) y CONAFOR (2022).	8
Cuadro 2. Tiempo de retardo para combustibles muertos.....	17
Cuadro 3. Distancia utilizada para cuantificar las intersecciones de combustible por su tiempo de retardo.....	29
Cuadro 4. Carga de combustibles presentes en el área de estudio de acuerdo con su tiempo de retardo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Histórico Incendios Forestales en México 1970-2022. Entidades federativas más afectadas en superficie y ocurrencia de incendios. Fuente: SNIF, CONAFOR, 2022.	7
Figura 2. Histórico de Incendios Forestales en el Estado de Puebla 1970-2022. Cantidad de incendios: 17, 835. Superficie quemada: 263, 690 ha. Fuente: SNIF, CONAFOR, 2022.	9
Figura 3. Elementos que componen el triángulo del fuego: oxígeno, calor y combustible. CONAFOR 2010.	13
Figura 4. Ubicación de los seis conglomerados elegidos para muestreo en las comunidades de Benito Juárez y San Nicolás, Tetela de Ocampo, Puebla.	24
Figura 5. Diseño del conglomerado. Trazo del círculo de muestreo (color azul) con tres sitios dentro de él.	25
Figura 6. GPS para la toma de coordenadas del centro de cada conglomerado.	26
Figura 7. Diseño de muestreo de los conglomerados donde se agrupan tres sitios de investigación. Fuente: Xelhuanzi et al., 2011.	27
Figura 8. Cuadro para el muestreo de combustibles ligeros (hojarasca y capa de fermentación).	27
Figura 9. Calibrador para el conteo de combustibles de acuerdo con el tiempo de retardo. Elaboración propia.	28
Figura 10. (Izquierda) Conteo de combustibles con calibrador de combustibles.	30
Figura 11. (Derecha) Conteo de ramas de un árbol caído que interceptan por encima de la cuerda a una altura no mayor a los 2 m.	30
Figura 12. Las piezas son contadas únicamente cuando no se encuentra en la capa de fermentación (Brown, 1974).	30
Figura 13. Troza interceptada en la final. La línea debe atravesar el eje central (Brown, 1974).	31
Figura 14. Material para las muestras de la capa orgánica del suelo: cuadro de madera de 30x30 cm, flexómetro y pala de jardinería.	32

Figura 15. Muestreo de combustibles ligeros. a) Delimitación del área de muestreo de combustibles ligeros; b) Colecta de muestra de hojarasca y capa de fermentación en bolsas plásticas.	32
Figura 16. Procesamiento de combustibles en el laboratorio. a) Separación y pesado de hojarasca y capa de fermentación; b) Rotulado y perforación de bolsas de estraza; c) Estufa de secado; d) Precalentamiento de la estufa para una temperatura óptima; e) Muestras en la estufa de secado; f) Registro de peso seco de las muestras.	33
Figura 17. Carga total de combustibles leñosos en cada conglomerado.	39
Figura 18. Carga total de combustibles leñosos en cada conglomerado.	40
Figura 19. Carga total de capa de fermentación en cada conglomerado.	40
Figura 20. Carga promedio de combustibles por tiempo de retardo en conglomerados quemados y no quemados.	41
Figura 21. Porcentaje de combustible leñoso disponible por su tiempo de retardo en los conglomerados siniestrados.	42
Figura 22. Porcentaje de combustible leñoso disponible por su tiempo de retardo en los conglomerados no quemados.	42
Figura 23. Carga promedio por condición para la capa de hojarasca en las áreas de muestreo.	44
Figura 24. Carga promedio por condición para la capa de hojarasca en las áreas de muestreo.	44
Figura 25. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 1 área quemada, en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.	45
Figura 26. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 2 área no quemada, en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.	46
Figura 27. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 3 área quemada, en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.	47

Figura 28. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 4 área no quemada, en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.	47
Figura 29. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 5 área quemada, en San Nicolás Sección Tercera, Tetela de Ocampo.	48
Figura 30. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 6 área no quemada, en Cruz Verde, San Nicolás, Tetela de Ocampo.	48
Figura 31. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 1 AQ en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.	49
Figura 32. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 2 NQ en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.	50
Figura 33. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 3 AQ en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.	51
Figura 34. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 4 NQ en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.	52
Figura 35. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 5 AQ en San Nicolás Sección Tercera, Tetela de Ocampo.	53
Figura 36. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 6 NQ en Cruz Verde, San Nicolás, Tetela de Ocampo.	54
Figura 37. Mapa de Riesgo de Incendios Forestales por distribución de combustible forestal.	56

EVALUACIÓN DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE CARGAS DE COMBUSTIBLE EN BOSQUES DE TETELA DE OCAMPO

RESUMEN

La aparición, frecuencia e intensidad de los incendios forestales están estrechamente relacionadas con las condiciones climáticas, topomorfológicas, las características de la vegetación y las acciones humanas. Aunque la prevención es esencial, los métodos tradicionales no son suficientes, lo que resalta la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección como herramientas modernas, rápidas y económicas. La gestión del material combustible es fundamental para desarrollar paisajes resistentes al fuego, restaurar hábitats, mejorar pastos y aprovechar recursos forestales. En el municipio de Tetela de Ocampo se han presentado 10 incendios forestales en los últimos tres años y cada año siguen teniendo incidencia debido a actividades agropecuarias, vandalismo y negligencia. Por tal motivo, el objetivo de este estudio ha sido analizar los principales puntos rojos en tres comunidades del municipio para evaluar el impacto del material combustible en la incidencia de incendios, utilizando los SIG y la Teledetección. Para ellos, se aplicó la metodología de intersecciones planares en seis sitios, estimando la carga de combustibles en megagramos por hectárea para comparar áreas siniestradas y no quemadas en los últimos cinco años. Los datos obtenidos fueron procesados con el Software SPSS para comparar las medias y determinar las diferencias estadísticas entre conglomerados. Los resultados revelan que el conglomerado 4 (no quemado), ubicado en San Nicolás sección cuarta, es el de mayor acumulación combustible leñoso con 95.66 Mg*ha^{-1} . Y de manera general, la carga media de combustibles en áreas no quemadas fue mayor que en áreas quemadas, debido al impacto que tienen los incendios en la cantidad de residuos y material combustible. Además, los conglomerados más alejados de la población presentan mayor acumulación de combustibles. Estos conglomerados han sido siniestrados en el pasado y frecuentemente vuelven a experimentar incendios, lo que evidencia la necesidad de un plan de manejo integral por parte del municipio.

Palabras clave: Incendios forestales, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Teledetección, gestión del fuego, combustibles forestales, prevención de incendios.

FOREST FIRE RISK ASSESSMENT BY MEANS OF FUEL LOADS IN FORESTS OF TETELA DE OCAMPO

ABSTRACT

The occurrence, frequency, and intensity of forest fires are closely related to climatic and topomorphological conditions, vegetation characteristics, and human actions. While prevention is essential, traditional methods are insufficient, highlighting the importance of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing as modern, fast, and cost-effective tools. Fuel management is crucial for developing fire-resistant landscapes, restoring habitats, improving pastures, and utilizing forest resources. In the municipality of Tetela de Ocampo, there have been 10 forest fires in the past three years, primarily due to agricultural activities, vandalism, and negligence. This study aims to analyze critical areas in three communities within the municipality to assess the impact of fuel loads on fire incidence, using GIS and Remote Sensing. The planar intersections methodology was applied in six sites to estimate fuel loads in megagrams per hectare, comparing burned and unburned areas over the past five years. Data were processed using SPSS software to compare means and determine statistical differences between clusters. Results show that Cluster 4 (unburned) in San Nicolás fourth section has the highest woody fuel accumulation at $95.66 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Generally, fuel loads in unburned areas were higher than in burned areas due to the impact of fires on the amount of residues and combustible material. Additionally, clusters farther from the population showed higher fuel accumulation. These clusters have been affected by fires in the past and frequently experience fires, underscoring the need for an integrated management plan by the municipality.

Keywords: Forest fires, Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing, fire management, forest fuels, fire prevention.

I. INTRODUCCIÓN

La Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han transformado en instrumentos imprescindibles para la planificación y gestión territorial a diversas escalas (Martin *et al.*, 2007). La Teledetección es de gran utilidad para atender emergencias debido al acceso rápido, preciso y de bajo costo a zonas que, de otro modo, serían casi inaccesibles (Garay, 2020). Actualmente, estas herramientas son las más utilizadas debido a que pueden aplicarse para la creación de información previa, durante y posterior a los incendios forestales.

La aparición, frecuencia e intensidad de los incendios forestales están directamente asociadas con las condiciones climáticas y topomorfológicas, las características de la vegetación y acciones antropogénicas. Los incendios tienen como consecuencia pérdidas forestales de manera inmediata y pérdidas económicas, ecológicas y sociales a largo plazo (Faleh *et al.*, 2012).

La prevención es la única manera efectiva de combatir a los incendios, sin embargo, esta no es suficiente con los métodos tradicionales, de ahí la importancia que toman los SIG y la Teledetección como un medio moderno, rápido, y económico.

Para reducir el riesgo de incendios, es fundamental aplicar medidas para prevenir las igniciones antrópicas, emplear de manera eficaz los recursos extinción, disminuir la susceptibilidad al fuego en la zona (Alcasena *et al.*, 2019). Específicamente, es la gestión del material combustible (claras, quemas, desbroces) la medida clave en términos de desarrollar paisajes resistentes al fuego se refiere, además de contribuir a la restauración de hábitats, mejora de pastos y aprovechamientos forestales (Lasanta *et al.*, 2018).

En México el fuego es utilizado en actividades agropecuarias, motivo por el cual se define el término de incendio forestal (Cruz, 2018), definido como un fuego fuera de control, que se expande libremente afectando a bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas (CONAFOR, 2012). En los últimos tres años, de acuerdo con los registros de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)-Zacatlán, el municipio de Tetela de Ocampo se ha visto afectado por 10

incendios forestales, de los cuales, las causas han sido por actividades agropecuarias, vandalismo y negligencia.

Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es analizar los principales puntos rojos en el municipio para evaluar el impacto que tiene la existencia de material combustible en la zona con la incidencia de incendios forestales.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar las zonas de riesgo de incendios forestales en las comunidades de Benito Juárez y San Nicolás en Tetela de Ocampo, Puebla, a través de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección para identificar las zonas más vulnerables y elaborar un mapa de riesgo que ayude a la prevención y planificación del combate.

2.2. Objetivos específicos

Identificar a través de imágenes vía satélite las diferentes condiciones y la cantidad de material combustible disponible en las comunidades de Benito Juárez y San Nicolás, Tetela de Ocampo.

Evaluar los combustibles disponibles utilizando la metodología de intersecciones planares y calcular la carga de combustibles en toneladas por hectárea de las distintas categorías por su tiempo de retardo: 1, 10, 100 y 1,000 horas.

Relacionar las características del material combustible con el riesgo de incendios, de acuerdo con la ubicación de los incendios forestales ocurridos en Tetela de Ocampo en los últimos 3 años.

III. HIPÓTESIS

El material combustible forestal disponible afecta directamente a la probabilidad de ocurrencia de incendios en las comunidades de Tetela de Ocampo.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Incendios forestales

Los bosques son imprescindibles para la vida en nuestro planeta; purifican el aire capturando el dióxido de carbono y liberando oxígeno, equilibran el clima al regular la humedad y la temperatura, brindan refugio y alimento a muchos seres vivos y son fuente de materia prima para muchas actividades humanas. La degradación de suelos, la deforestación, la tala inmoderada, las quemadas no controladas relacionadas a la ganadería, la agricultura y el desarrollo urbano son factores que amenazan a los procesos vitales de las zonas forestales (CONAFOR, 2010).

El fuego, según las condiciones en las que se suscite puede actuar como una herramienta de manejo o un factor que contribuya al deterioro ambiental, (Jardel *et al.*, 2009). Cuando es utilizado de manera irresponsable o es producto de alguna negligencia puede producirse un incendio forestal con devastadoras consecuencias para la naturaleza y pone en peligro la salud y seguridad de los individuos (CONAFOR, 2010). Además, el fuego inadecuado contribuye a la degradación de los bosques, a la deforestación, y provoca la pérdida de medios de subsistencia, de la infraestructura y la biodiversidad (CONAFOR, 2020). Un incendio forestal es un fuego sin control desarrollado en un espacio abierto que se extiende de manera violenta afectando la superficie del sitio (Arnaldos, *et al.*, 2004).

La CONAFOR, 2010 define como incendio forestal al fuego que se propaga sin control, afectando bosques, selvas o la vegetación de las zonas áridas y semiáridas. Actualmente los humanos somos la principal fuente de incendios forestales, sobrepasando las fuentes naturales. Además, el cambio climático junto con las variaciones en los ciclos de lluvia y sequía afecta la dinámica del fuego. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1985 a 2019 la temperatura promedio ha experimentado un incremento a lo largo de los años mientras que la precipitación sigue un patrón dentro de la media, lo que provoca mayor sequedad y disponibilidad de material combustible, y con ello una mayor dificultad de control de los incendios (CONAFOR, 2020).

4.1.2. Tipos de incendios forestales

Arnaldos, *et al.*, 2004, estipulan que los incendios se clasifican de acuerdo con el combustible que los alimentan y el estrato involucrado conforme al tipo de vegetación, éstos son:

Incendio subterráneo: el fuego se propaga bajo el suelo, consume la materia orgánica acumulada y las raíces pudiendo llegar a alcanzar afloramientos rocosos (CONAFOR, 2010). Por lo general, arden sin llama y se detectan por la emisión de humo. Esta combustión aun siendo lenta, por la escasez de oxígeno, puede ocasionar daños considerables por su capacidad de mantenerse activa durante días o incluso semanas. El consumo de combustible es elevado, repercutiendo en todos los estratos de la vegetación causando lesiones notables (Arnaldos, *et al.*, 2004).

Incendio superficial: la propagación del fuego es de manera horizontal sobre la superficie del terreno y puede llegar a una altura de hasta metro y medio. Se consume combustibles vivos y muertos como ramas, arbustos, pastizales, hojarasca, troncos caídos y matorrales (CONAFOR, 2010). El comportamiento de un incendio de superficie está en función del tipo de vegetación involucrada (Arnaldos, *et al.*, 2004).

Incendio de copa o aéreos: estos incendios son típicos de los bosques de coníferas y conllevan a la combustión de las copas de los árboles (Arnaldos, *et al.*, 2004). Las llamas comienzan a nivel del suelo y se propagan de forma vertical mediante la vegetación dispuesta que sirve de combustible para escalar hasta la copa de los árboles. El hecho de que el fuego consuma toda la vegetación los vuelve los más destructivos y, por lo tanto, los más difíciles de controlar (CONAFOR, 2010).

4.2. Incendios en México

Los incendios forestales tienen la capacidad de desatarse en cualquier momento, pero en México hay dos períodos de mayor frecuencia, que coinciden con la época de sequía más intensa en todo el país. El primero abarca de enero a junio y afecta a las regiones centro, norte, noreste, sur y sureste del territorio nacional. El segundo periodo, de mayo a septiembre para la zona noroeste del país (CONAFOR, 2010).

Durante el periodo comprendido entre 1970 y 2022, se tiene registrado un promedio anual de 7,071 incendios, abarcando una extensión media de 279,810 hectáreas dañadas (Figura 1).

Dentro de este periodo, se destacan los años más críticos en términos de superficie quemada: 1998 con 849,632 hectáreas, 2011 con 956,405 hectáreas y, el año pasado, 2022 con un total de 735,206 hectáreas afectadas. Chiapas y Jalisco emergen como los estados más afectados en cuanto a superficie quemada, mientras que la Ciudad de México, el Estado de México, y Michoacán sobresalen por ser los que presentan una mayor ocurrencia de incendios forestales (CONAFOR, 2022).



Figura 1. *Histórico Incendios Forestales en México 1970-2022. Entidades federativas más afectadas en superficie y ocurrencia de incendios. Fuente: SNIF, CONAFOR, 2022.*

De acuerdo con los datos del Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF), aproximadamente el 32% de los incendios forestales se originan como resultado de actividades ilícitas, mientras que un 27% tiene su causa en actividades agrícolas. Además, el 97% de los incendios registrados en México son de tipo superficial, y en su mayoría, provocan un impacto mínimo. Es importante resaltar que la superficie afectada por estos

incendios forestales se encuentra principalmente en ecosistemas dependientes del fuego (CONAFOR, 2022).

4.2.1. Incendios en el Estado de Puebla

Según los datos recabados por la SEMARNAT (2022), en la última década se han registrado 4,003 incendios en el Estado de Puebla, ocasionando daños a una superficie total de 86676.51 ha (CONAFOR, 2022) (Cuadro 1).

Esto posiciona a la entidad poblana entre los diez estados con mayor ocurrencia de incendios anuales dentro del país según los registros de Perspectiva Meteorológica para Incendios Forestales (CONAGUA, 2022).

***Cuadro 1.** Incendios forestales en Puebla en la última década: número de incendios y hectáreas de superficie afectada. Fuentes: SEMARNAT (2022) y CONAFOR (2022).*

Año	No. de incendios	Superficie afectada (ha)
2012	402	3,459.77
2013	511	9,047.2
2014	335	3,744.56
2015	156	2,117.9
2016	456	9,174.09
2017	519	10,786.51
2018	371	5,296.73
2019	353	18,727.19
2020	268	10,634.2
2021	313	8,002.36
2022	319	5,686
Total	4,003	86,676.51

En el registro histórico de la CONAFOR, en el periodo de 1970 a 2022, han acontecido en el Estado de Puebla un total de 17,835 incendios forestales, los cuales han dañado una superficie

aproximada de 263,690 ha. En la figura 2, podemos apreciar que los años más críticos para la entidad han sido 1983, 1998 y 2019 (CONAFOR, 2022).

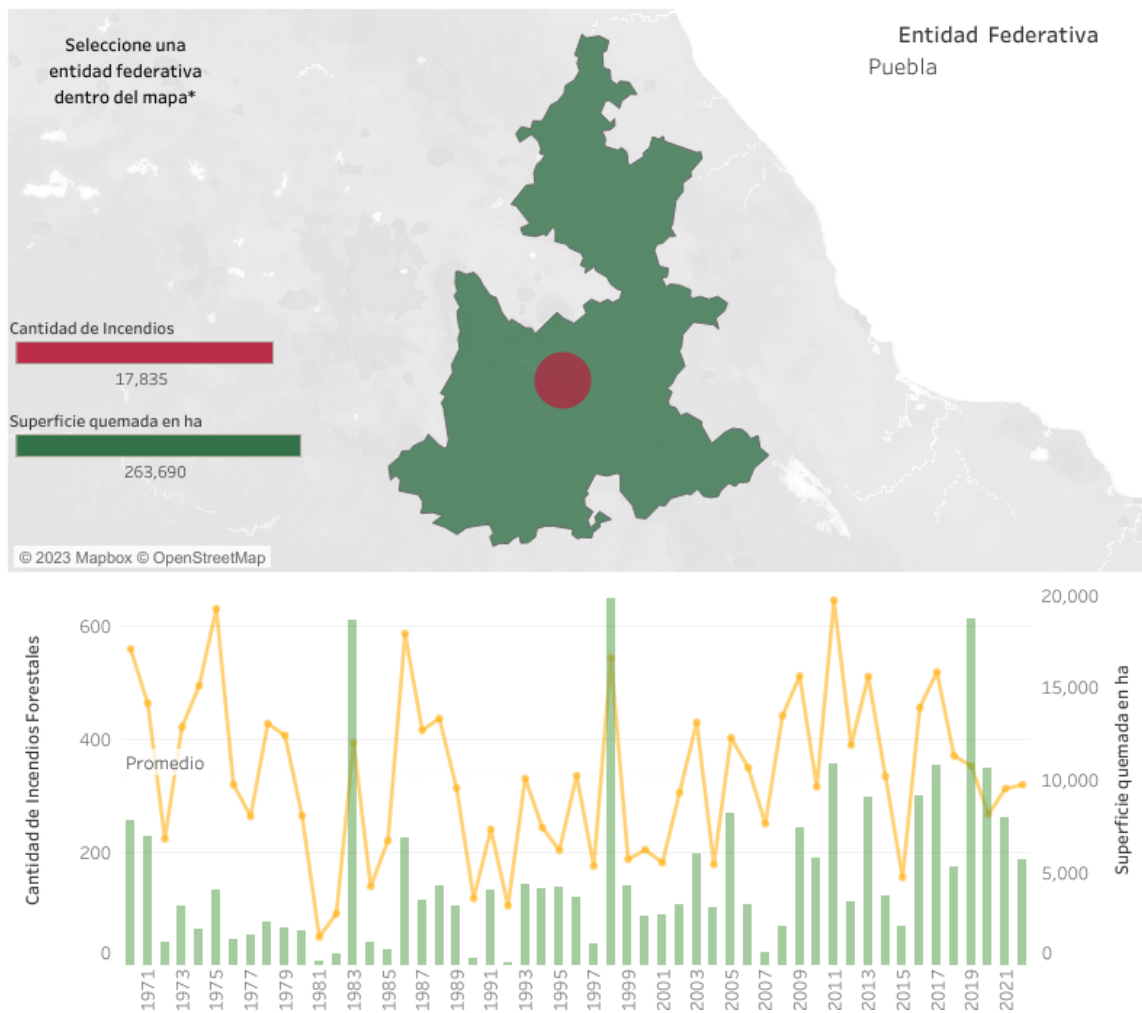


Figura 2. Histórico de Incendios Forestales en el Estado de Puebla 1970-2022. Cantidad de incendios: 17, 835. Superficie quemada: 263, 690 ha. Fuente: SNIF, CONAFOR, 2022.

4.2.2. Incendios en Tetela de Ocampo

El SNIF, tiene registrado que el municipio de Tetela de Ocampo se vio afectado en 2022 por seis incendios forestales. La mayoría tuvieron presencia en el mes de abril, con un total de superficie dañada de 447 hectáreas. La vegetación afectada fueron bosques de pino-encino y bosques de pino, todos los incendios fueron de tipo superficial.

La CONAFOR con sede en Zacatlán registró que en los últimos tres años (del 2020 al 2022) se suscitaron 14 incendios, todos de tipo superficial afectando un total de 1,571.9 hectáreas. En este periodo, el incendio de mayor extensión ocurrió en abril de 2021 dejando un área siniestrada de 936 hectáreas.

4.3. Evaluación de riesgos

En la evaluación de riesgos es preciso distinguir entre peligro y riesgo de incendio forestal ya que, a pesar de ser dos términos que parecieran referirse a lo mismo, sus definiciones son muy distintas; el primero se refiere al potencial que tiene la vegetación para quemarse de manera descontrolada, causando daños tanto al ambiente como a los seres humanos, mientras que el riesgo de incendio forestal es la evaluación de la probabilidad de que ocurran daños y extinción potencial, proporcionando una base para estrategias de prevención y combate (Arnaldos, *et al.*, 2004).

Según Arnaldos, *et al.*, 2004, valorar con antelación la probabilidad de inicio y forma de propagación de un incendio forestal es esencial para la gestión efectiva. Está anticipación facilita la distribución adecuada de recursos de prevención para evitar incendios forestales, permite la movilización oportuna de los equipos de combate evitando la propagación del fuego y posibilita la concentración de esfuerzos de prevención y combate en áreas de mayor riesgo.

Los métodos de predicción de riesgo usan los datos meteorológicos y de humedad del combustible principalmente, además introducen otros parámetros para mejorar su fiabilidad como: la acumulación de agua en el suelo, periodicidad de ocurrencia, entre otros (Arnaldos, *et al.*, 2004). A lo largo de esta evaluación, se busca optimizar la respuesta a estos eventos, minimizando su impacto y protegiendo tanto a la naturaleza como a las comunidades que dependen de estos ecosistemas.

4.4. Manejo del fuego y sus componentes

El manejo del fuego es un método que se utiliza para enfrentar desafíos y cuestiones relacionadas con incendios, tanto los intencionales como los accidentales, en entornos naturales y sistemas socioeconómicos, mediante la evaluación y balance de riesgos asociados al fuego, además de reconocer su función beneficiosa (Myers, 2004).

En México es apremiante el fortalecimiento de las capacidades, educación y divulgación con relación al manejo del fuego. Para esto se debe considerar al gobierno, organizaciones no gubernamentales, a los medios de comunicación y a la población en general, en aspectos de: efectos del fuego, modelos ecológicos conceptuales, regímenes, ecología y ejecución de quemas prescritas, monitoreo y evaluación; que, sumado a herramientas como mapas de clasificación de áreas de incendios y estudios dendrocronológicos, entre otros, permitan una atención integral a la problemática (Nájera, 2006).

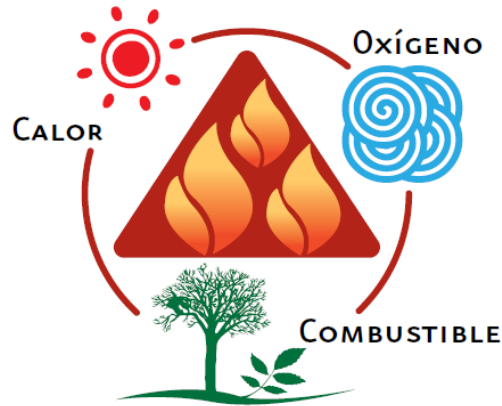
Myers (2004) planteó como los principales ocho componentes de un plan estratégico de manejo integral del fuego, los siguientes:

1. Diagnóstico: considera las características de la reserva o región y sus alrededores que determinan el ambiente del fuego; involucra aspectos físicos, bióticos, características de los materiales combustibles, patrones de incendios según el ecosistema o tipo de vegetación, y consideraciones socioeconómicas y culturales de la población local, así como el historial de incendios de la zona, principalmente.
2. Justificación: implica entre otros aspectos, el establecer las bases ecológicas para expandir recursos y tomar los riesgos en manejar el fuego en una determinada área. La extensión y detalle dependen de la complejidad del sitio o área. Considera que los modelos ecológicos conceptuales son generalmente útiles en resumir la información. Decidir por cada ecosistema o tipo de vegetación, si es mantenido por el fuego o sensible.
3. Metas de manejo: Contempla el proteger al público y a la propiedad, a los recursos culturales, elementos de biodiversidad sensibles al incendio, hábitat y ecosistemas, cuencas hidrográficas, recursos forestales y de fauna, rehabilitación y, evitar la invasión de especies exóticas, entre otros.
4. Zonificación del área: incluye principalmente, zonas de riesgos (causas de los incendios naturales o humanas), peligros (tipo de combustibles, topografía y condiciones climáticas), valores (recursos naturales o humanos, importantes de proteger) y de ocurrencia de incendios (registro histórico de incendios), así como la clasificación de áreas por unidades de control, de quemas y el calendario de quemas.

5. Operaciones de manejo del fuego: considera la prevención, identificación, movilización, control y la extinción de los incendios; la localización del equipo y personal, de brechas cortafuego, de barreras naturales y la capacitación del personal; asimismo, la atención a contingencias relevantes, el manejo de combustibles, de humo y la planificación de quemas prescritas.
6. Relaciones públicas y con las comunidades vecinas: contempla la difusión, la educación ambiental, programas de capacitación, y de prevención; dentro y fuera del área o región.
7. Administración del programa: incluye la infraestructura, equipamiento, personal, estructura organizada y los asuntos financieros.
8. Evaluación del programa: consiste en monitorear la sostenibilidad de los elementos de la biodiversidad, de los efectos de quemas e incendios, de los combustibles y de los aspectos meteorológicos; la evaluación de la eficacia del programa de prevención y extinción, junto con la adaptación continúa de las prácticas de manejo y la importancia de investigaciones científicas.

4.5. El triángulo del fuego

El calor, el oxígeno y el combustible conforman al triángulo del fuego (Figura 3), estos son los 3 elementos necesarios para que un incendio se produzca. En la atmósfera, el oxígeno existe de manera natural, el calor es generado por la radiación solar que deseca a la vegetación, no obstante, se requiere de una fuente de ignición adicional para detonar la combustión (fogata, colilla de cigarro, cerillo, relámpago, etc.), mientras que la vegetación y sus residuos en el suelo componen el combustible disponible (Hinojosa, 2006). El primer elemento no podemos manejarlo, sin embargo, con medidas de prevención, educación sobre incendios y manejo de los terrenos forestales podemos controlar en cierta medida a los elementos siguientes.



*Figura 3. Elementos que componen el triángulo del fuego: oxígeno, calor y combustible.
CONAFOR 2010.*

4.6. Ecología y Cultura del fuego

Es crucial abordar la cuestión de los incendios en los ecosistemas considerando una perspectiva global del desarrollo rural. Se requiere de la integración de estrategias y acciones dirigidas a mejorar la gestión y el uso de la tierra, así como una corresponsabilidad gubernamental, social y comunitaria en el manejo y la protección contra incendios catastróficos (Frausto, 2004).

4.7. Prevención

Para la prevención de incendios es indispensable ser consciente del uso responsable del fuego, esto implica eliminar cualquier tipo de elemento que sirva como generador de calor (cerillos, colillas de cigarrillos, vidrios, fogatas, etc.). Así como controlar la cantidad de material combustible en la zona, incluyendo cualquier otro material inflamable. La gestión adecuada de estos factores no solo reduce las posibilidades de que se desate un incendio, sino que también contribuye significativamente a la preservación de los bosques y la seguridad de las comunidades locales.

Las estrategias de prevención se complementan con la supresión de incendios como parte del manejo del fuego, para contrarrestar la pérdida de biodiversidad y los daños a los recursos forestales y zonas vegetativas. Para que esto sea eficaz es necesario conocer las condiciones que propician la ocurrencia y permanencia de incendios forestales, así como los elementos que influyen a esto (Flores, *et al.*, 2016).

Lograr la inserción y presencia permanente de brigadas técnicas campesinas, que cumplan con la responsabilidad de prevenir y combatir incendios, así como la llevar a cabo tareas de restauración que fomenten la participación “segura” de las comunidades (Frausto, 2004). Al impulsar estas brigadas, se establece un vínculo estrecho entre el conocimiento local y las prácticas técnicas, creando así un frente sólido que, aunado a la prevención, se convierte así en un pilar fundamental para mitigar los riesgos asociados a los incendios forestales.

4.7.1. Actividades preventivas

- Proyectos de ingeniería orientados a disminuir la acumulación de material combustible o cambiar la disposición continua del mismo, tanto en sentido vertical como horizontal. Estos incluyen la creación de brechas cortafuego, líneas de seguridad, recortes de vegetación, limpieza de vegetación baja, adelgazamiento de densidad arbórea y aplicaciones de quemas prescritas, etc.
- Actividades educativas con el objetivo de revalorar la relevancia de los recursos naturales, y fomentar prácticas de conservación en las áreas forestales: campañas de divulgación, información, capacitación y asistencia técnica para el empleo del fuego tanto en comunidades urbanas como rurales, etc.
- Supervisión legal para garantizar el cumplimiento de las leyes, reglamentos y normativas relacionadas con el uso del fuego en el país. (CONAFOR, 2010).

A causa de la limitación de recursos económicos disponibles para la realización de labores preventivas y a la existencia de metas en conflicto, la optimización espacial se convierte en una herramienta compleja que permite la identificación de una solución equilibrada para múltiples objetivos en las áreas que deben ser tratadas (Vloger *et al.*, 2015). Esto es factible ya que las actividades de tratamiento de material combustible, como la creación de claros, quemas y desbroces, pueden ser combinadas de manera compatible con la restauración de hábitats de gran valor ecológico, la mejora de pastizales y las actividades de aprovechamiento forestal (Lasanta *et al.*, 2018).

La CONAFOR detecta incendios mediante:

Información satelital del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), que obtienen cada 20 minutos (por CONAGUA) y dos veces al día (por CONABIO) imágenes que abarcan el territorio nacional y destacan los puntos de calor que podrían indicar la posibilidad de ocurrencia de un incendio forestal.

Un programa que identifica Puntos de Calor ha sido desarrollado por CONABIO y el Servicio Meteorológico Nacional, empleando en tiempo real técnicas de percepción remota. En la CONABIO la información está organizada por años y, además de los puntos de calor, ofrece acceso a datos tabulares, información georreferenciada en forma de mapas interactivos y sumarios informativos.

Un Sistema de Información Geográfica diseñado por el Servicio Forestal de Canadá genera mapas que evalúan el riesgo meteorológico, además de técnicos especializados del Centro Nacional de Control de Incendios Forestales que analizan la información para elaborar reportes diarios y reportes especiales en casos donde las condiciones de incendio sean consideradas extremas o peligrosas.

4.8. Brigadas contra incendios

Hinojosa en 2006, sugiere que los dueños o poseedores de terrenos forestales pertenezcan a las brigadas para asegurar una mayor presencia de ésta en el bosque y rápida atención ante los reportes, además de que en los tiempos la brigada puede efectuar acciones diferentes a la prevención y combate, como son las limpias, podas y quemas en los predios.

4.8.1. Normas de combate de incendios según el Grupo Nacional Coordinador de Incendios Forestales (NWCG, por sus siglas en inglés), (2018).

1. Manténgase informado o informada sobre las condiciones del tiempo atmosférico y sus pronósticos.
2. Manténgase siempre enterada o enterado del comportamiento del incendio.
3. Base toda acción en el comportamiento actual y futuro del incendio.
4. Identifique rutas de escape y zonas de seguridad y darlas a conocer.
5. Disponga de vigilantes cuando exista la posibilidad de peligro.

6. Manténgase alerta, calmado(a), piense claramente y actúe con decisión.
7. Mantenga constante comunicación con su brigada, jefes y fuerzas adjuntas.
8. Dar instrucciones claras y asegurarse que han sido entendidas.
9. Mantenga el control de la brigada a toda hora.
10. Combata el incendio agresivamente, habiendo provisto primero la seguridad.

4.9. Combustibles forestales

Los combustibles forestales pueden analizarse desde un punto de vista macroscópico (bosque, formas vegetales) o microscópico (tejidos de las plantas: terpenos, resinas, lignina, celulosa, y hemicelulosa). Ambos cuentan con propiedades que afectan el comportamiento del fuego; propiedades extrínsecas, para el primer caso, y propiedades intrínsecas para el segundo (Arnaldos, *et al.*, 2004).

Las propiedades extrínsecas varían según el volumen que se considere, mientras que las propiedades intrínsecas son inherentes al material y no cambian al variar su volumen. De las propiedades extrínsecas más importantes que afectan la intensidad y velocidad de propagación de los incendios son: la carga de combustible, el tamaño y forma del combustible, la compactación y densidad aparente, la disposición del combustible (Arnaldos, *et al.*, 2004).

4.9.1. Propiedades extrínsecas de los combustibles forestales

La cantidad de combustible (medida en base seca) por unidad de superficie se conoce como carga de combustible, que se expresa en t/ha. La caracterización de un combustible independientemente de su estado se puede lograr mediante la extracción de la masa en base seca. La humedad de la vegetación varía según las condiciones ambientales y cambia diariamente y según la estación (Arnaldos, *et al.*, 2004).

La relación superficie/volumen (m^2 / m^3) de los combustibles vegetales, que generalmente se representa con la letra σ , indica su tamaño y forma. Esta relación aumenta con el combustible más pequeño (Arnaldos, *et al.*, 2004).

La compactación es una medida del volumen de aire contenido en el combustible forestal. A menor volumen mayor compactación, lo cual se asocia a una mayor dificultad para la

propagación del fuego. En cambio, en condiciones de compactación baja, el aire puede penetrar fácilmente en el combustible y facilitar la combustión (Arnaldos, *et al.*, 2004).

La compactación se expresa comúnmente en términos de densidad aparente (ρ_b), definida como la masa de materia vegetal dividida por el volumen que ocupa en una distribución específica. Dado que la densidad aparente considera el aire presente, sirve como un indicador significativo de la porosidad del combustible (Arnaldos, *et al.*, 2004).

El comportamiento del incendio está fuertemente influenciado por la disposición del combustible, es decir, cómo se distribuye la vegetación sobre el terreno. La disposición horizontal (ramas y troncos muertos, hojas muertas y desechos) y la disposición vertical (hierba, arbustos y árboles). Un factor importante en la propagación de un incendio es la distribución horizontal de combustibles. El incendio tiene dificultades para propagarse si el combustible está disperso, pero si se distribuye de manera continua y uniforme, su propagación está casi garantizada (Arnaldos, *et al.*, 2004).

4.9.2. Clasificación de los combustibles

Los combustibles pueden ser clasificados de acuerdo con su tiempo de retardo, éste se refiere al intervalo de tiempo que un material vegetal muerto necesita para ganar o perder dos tercios de la diferencia entre su contenido de humedad inicial y su contenido de humedad en equilibrio con el ambiente (Flores, 2010). El diámetro determina el tiempo de retardo de un combustible (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tiempo de retardo para combustibles muertos.

Diámetro de combustibles	Tiempo de retardo
Menor a 0.6cm	1 hora
De 0.6 a 2.5cm	10 horas
De 2.6 a 7.5 cm	100 horas
Mayor a 7.5 cm	1000 horas

4.9.3. Evaluación de los combustibles forestales

Los combustibles son un elemento contundente en el comportamiento del fuego, por lo cual es importante su evaluación dentro del estudio de los incendios forestales. En su evaluación se han seguido dos perspectivas: a) la evaluación directa, a través de inventarios de campo específicos; y b) el desarrollo de estrategias de evaluación indirectas, como lo son las fotoseries (Flores y Benavides, 2006).

Para la planificación adecuada de la prevención y control de los incendios forestales, es fundamental comprender el papel ecológico y el comportamiento del fuego. Este último se ve influenciado por diversos factores, entre los que destacan las condiciones climáticas y, la carga y distribución de los combustibles forestales. En México, los estudios se centran en dos aspectos principales: el análisis de los antecedentes de los incendios forestales, basado en la descripción del régimen histórico de incendios; y la evaluación de combustibles forestales mediante técnicas estandarizadas, como el método de fotoseries. De acuerdo con esto el objetivo es caracterizar los combustibles forestales considerando la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales, así como analizar los resultados obtenidos a partir del desarrollo de fotoseries de combustibles en el área de estudio. Estos proyectos se llevan a cabo en el marco del Programa de Prevención de Incendios y Restauración (PPIRA) (Flores y Benavides, 2006).

4.10. Sistemas de Información Geográfica

Cuando un sistema de información tiene como objetivo específico recopilar datos relacionados con el espacio físico, se le denomina Sistema de Información Geográfico o SIG (SNIF, 2022).

Según la CONABIO, un Punto de Calor se refiere al componente espacial más pequeño de la imagen (píxel) que registra una temperatura significativamente alta. Para las imágenes diurnas, se considera una temperatura mínima de 42°C, mientras que, para las imágenes nocturnas, es de 25°C (Raygoza, 2006).

El Sistema Espacial de Manejo de Incendios (SEMI) recaba datos de combustión y datos topográficos. Su información se agrupa en tres niveles, el primero se refiere a observaciones meteorológicas, el segundo a los índices humedad de los combustibles, y el último a los

índices de comportamiento del fuego. El sistema obtiene 13 mapas con la información de cada uno de los componentes enunciados (Raygoza, 2006).

El Centro Nacional de Control de Incendios Forestales establece áreas en el territorio nacional con diferente peligrosidad para la incidencia de incendios forestales y pronostica un aproximado de su magnitud e intensidad, considerando condiciones meteorológicas imperantes, todo esto mediante la información que produce el SEMI (Raygoza, 2006).

Sastre (2010), define a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como la integración de dispositivos físicos, programas informáticos, información geográfica y recursos humanos, con el propósito de capturar, almacenar, gestionar, analizar, modelar y representar de manera completa y diversa la información geográficamente referenciada.

4.11. Teledetección

La teledetección es una herramienta útil en las actividades relacionadas con el combate de incendios forestales. Permiten detectar de manera oportuna eventos que pudieran corresponder a incendios, su ubicación e información relevante para toma de decisiones de la CONAFOR (Raygoza, 2006).

Los sistemas de teledetección que se utilizan en el Centro Nacional de Incendios Forestales complementan a los sistemas tradicionales de detección de incendios; torres de vigilancia, recorridos de las brigadas, vuelos de aeronaves, y los reportes de la ciudadanía (Raygoza, 2006).

La Teledetección, también conocida como detección o percepción remota, consiste en adquirir información sobre objetos o fenómenos a diversas escalas sin estar en contacto directo. Es la técnica que posibilita obtener imágenes de la superficie de la Tierra utilizando sensores colocados en plataformas espaciales (Chuvienco, 1990).

Actualmente existen varios satélites diseñados para brindar información sobre incendios forestales. Entre los más reconocidos se encuentran: un instrumento de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés), Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS por sus siglas en inglés), presente en las misiones satelitales Terra (1999) y Aqua (2002); el sensor Conjunto de Radiómetros de Imágenes Infrarrojas Visibles (VIIRS por sus siglas en inglés), perteneciente a la NASA que

se encuentra a bordo del satélite Suomi NPP y del NOAA-20; el satélite Landsat-8, que fue lanzado en 2013 por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); y la misión Sentinel-2, desarrollada por la Agencia Espacial Europea dentro del programa Copérnico lanzado en el 2015 (Garay, 2020).

La Teledetección y los SIG son dos tecnologías que han transformado la forma en que percibimos e interpretamos nuestro entorno. Permiten trabajar con combinaciones de bandas multiespectrales, lo que facilita una visualización con gran claridad las zonas afectadas por incendios forestales. Además, mediante composiciones Rojo, Verde y Azul (RGB por sus siglas en inglés) mediante bandas multiespectrales, es posible analizar la extensión y el impacto un incendio, ya sea durante o posterior al suceso (Garay, 2020).

Actualmente, Google Earth Engine (GEE) es considerada una herramienta valiosa en materia de incendios. Esta plataforma web posibilita el acceso a gran cantidad de datos mediante procedimientos específicos para obtener la información deseada. GEE es un servicio de procesamiento geoespacial que emplea la computación en la nube para acceder, compartir e integrar diversos formatos de datos (Garay, 2020).

En México, desde 2006, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha colaborado en conjunto con el Área de Análisis Satelital (SAB) de la NOAA-NESDIS para optimizar la detección de incendios forestales. Esta colaboración se ha centrado en el intercambio de información y técnicas de procesamiento de datos, así como en la transmisión de información sobre puntos de calor detectados por múltiples sensores en tiempo real, incluidos AVHRR, MODIS y el satélite GOES. En la actualidad, expertos del SMN trabajan en estrecha colaboración con especialistas de la NOAA-NESDIS con el objetivo de mejorar los resultados específicos para México. Estos esfuerzos se orientan hacia las necesidades actuales de diversas instituciones, como la CONAFOR y la Coordinación Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, entre otras (SMN, 2022).

El sistema McIDAS en el SMN y el sistema Hazard Mapping System (HMS) utilizan datos satelitales proporcionados por la NASA, NOAA y la Universidad de Wisconsin para detectar incendios forestales en México, América Central y el Caribe. Estos datos incluyen información de los satélites NOAA15, 18, 19 y METOP a través del sensor AVHRR, así como los satélites AQUA y TERRA a través del sensor MODIS de la NASA. Además, se

utilizan los canales infrarrojo reflectivo y visibles de los satélites GOES. Varios organismos, incluida la NASA para MODIS, la NOAA-NESDIS para los satélites NOAA (algoritmo FIMMA) y la Universidad de Wisconsin-CIMSS para los datos de GOES (algoritmo ABBA), han desarrollado algoritmos de procesamiento de datos satelitales para la detección automática de focos de calor relacionados con incendios forestales.

El Servidor de Mapas del SMN, creado por el mismo SMN, y un SIG desarrollado por la NOAA-NESDIS muestran el producto final en línea. El Servicio Meteorológico Nacional de México y otras instituciones nacionales e internacionales están contribuyendo continuamente al enriquecimiento y actualización de estas herramientas mediante la integración de información de diversas capas temáticas. Los mapas producidos son considerados cruciales para la detección y manejo de incendios forestales. Los especialistas del SMN, que trabajan para la Subgerencia de Monitoreo Atmosférico Ambiental, participan activamente en este proceso de supervisión y seguimiento de los incendios forestales que afectan México (SMN, 2022).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Descripción del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el municipio de Tetela de Ocampo, Puebla, ubicado en las coordenadas geográficas entre los paralelos 19°42' y 19°56' de latitud norte; los meridianos 97°39' y 97°55' de longitud oeste, con una altitud que oscila entre los 1,200 a 3,200 m.s.n.m.

El clima es templado húmedo con lluvias abundantes durante el verano (54.28%), templado subhúmedo con lluvias de verano de mayor humedad (27.63%), templado subhúmedo con lluvias de verano de humedad media (13.56%), templado húmedo con lluvias todo el año (3.96%) y semicálido húmedo con lluvias todo el año (0.57%). con un rango de temperatura de 12–20 °C y una precipitación de 600–1600 mm (INEGI, 2010).

El uso del suelo es principalmente agrícola (38.51%) y urbano (0.65%). El bosque representa el 56.68% de la vegetación, mientras que el pastizal representa el 4.16%. Sus sistemas de topofomas incluyen sierras volcánicas de laderas escarpadas (2.02%) y sierras altas escarpadas (97.98%) (INEGI, 2010).

Geología: roca ígnea intrusiva: tonalita (1.67%), ígnea extruiva; toba ácida (17.67%) andesita (3.46%) y basalto (1.86%). Sedimentaria: caliza (54.72%), caliza–lutita (9.41%), limolitaarenisca (7.75%) y lutita (2.15%) Suelo: aluvial (0.66%) (INEGI, 2010).

Edafología: se encuentran un 81.38% de suelo tipo luvisol, 9.5% de andosol, 4.87% phaeozem, 3.06% de cambisol y 0.54% de arenosol (INEGI, 2010).

Hidrografía: el municipio es atravesado por varios ríos y arroyos, siendo el más destacado el río Apulco. Corrientes de agua perennes: Cuautolanico, Cuxateno, Raxicoya, Xaltatempa y Zitlacuautla; corrientes de agua intermitentes: Papaloteno (INEGI, 2010).

Tetela de Ocampo tiene una población de 27, 216 habitantes, de los cuales 5,612 habitan en la zona centro, y el resto se encuentra en las distintas localidades habitantes (INEGI, 2020).

5.2. Metodología

La metodología aplicada para la presente investigación permite la caracterización de sitios que han sufrido incendios forestales, de tal manera que sea posible captar la biodiversidad que propicia el inicio y la propagación de estos, la toma de datos se basa en lo propuesto por Flores, *et al.*, 2016 en su folleto técnico donde describe cómo aplicar la metodología de intersecciones planares descrita por Brown, (1974) con adaptación para que pueda ser utilizada en cualquier parte de la República Mexicana.

5.2.1. Asignación de conglomerados

Para la medición del combustible forestal se localizaron las áreas donde ocurrieron incendios en los últimos tres años en las comunidades de Benito Juárez y San Nicolás (tercera y cuarta sección) con la ayuda de los registros de la CONAFOR en Zacatlán (Anexo 1). Para los siguientes conglomerados se ubicaron zonas adyacentes que no se han visto afectadas por incendios nunca o que no han sido siniestradas en los últimos cinco años. Es importante mencionar que para la elección se consideró que sean de fácil acceso. De esta manera se obtuvo un mismo número de conglomerados para zonas afectas y zonas libres de incendios forestales, contando con un total de seis conglomerados (Figura 4).

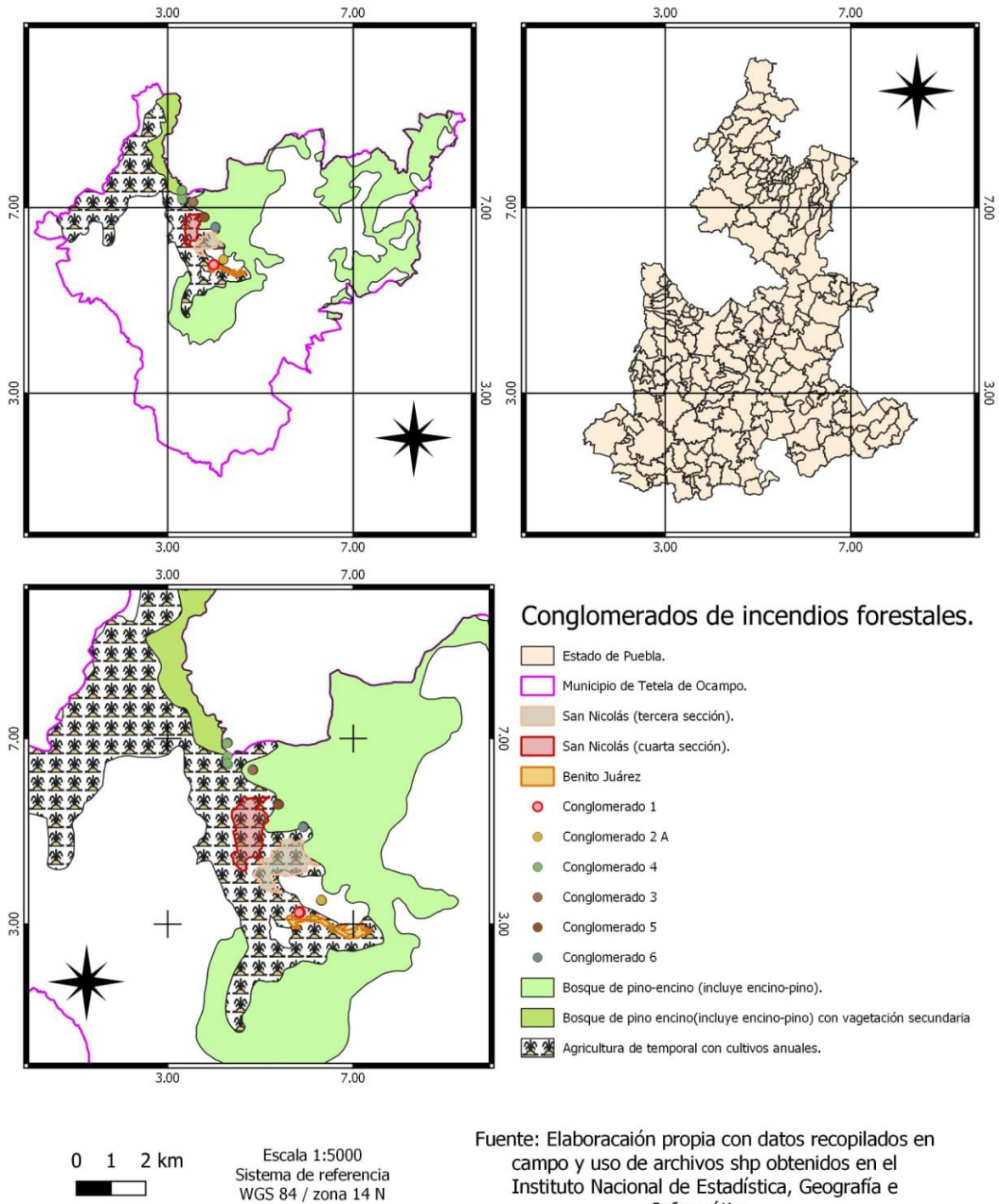


Figura 4. Ubicación de los seis conglomerados elegidos para muestreo en las comunidades de Benito Juárez y San Nicolás, Tetela de Ocampo, Puebla.

5.2.2. Diseño del conglomerado de muestreo

Se trazaron círculos con un radio de 17.84 m para obtener un área total de 1,000 m² por cada conglomerado. A partir del centro se medirá el azimut a 0°, 120° y 240° para el establecimiento de los tres sitios presentes en cada conglomerado (Figura 5).



Figura 5. Diseño del conglomerado. Trazo del círculo de muestreo (color azul) con tres sitios dentro de él.

5.2.3. Instalación del sitio de muestreo de combustible

Siguiendo la metodología usada por Xelhuantzi *et al.*, 2011, después de seleccionar las áreas de muestreo, se registró su ubicación geográfica precisa utilizando un GPS para georreferenciar el centro del conglomerado (Figura 6).



Figura 6. GPS para la toma de coordenadas del centro de cada conglomerado.

Posteriormente, se establecieron dentro del conglomerado tres sitios de 38.5 m^2 , cuya referencia fue el centro del sitio (Figura 7). Los sitios se distribuyeron de la siguiente manera: el sitio 1 (S1) se instaló 7 m hacia el norte franco, el sitio 2 (S2) se localizó a 120° de azimut y el tercer sitio (S3) a 240° de azimut.

En cada sitio se instalaron tres transectos sobre los cuales se midieron las intersecciones planares. Para esto, se colocaron tres cuerdas de 15 m cada una, la primera línea orientada a 0° de azimut, la segunda a 120° y la tercera a 240° para un total de 45 m de muestreo por sitio. El área comprendida entre 0° a 120° se denomina transecto A, de los 120° a los 240° se ubica el transecto B y, por último, se localiza el área del transecto C de los 240° a los 360° .

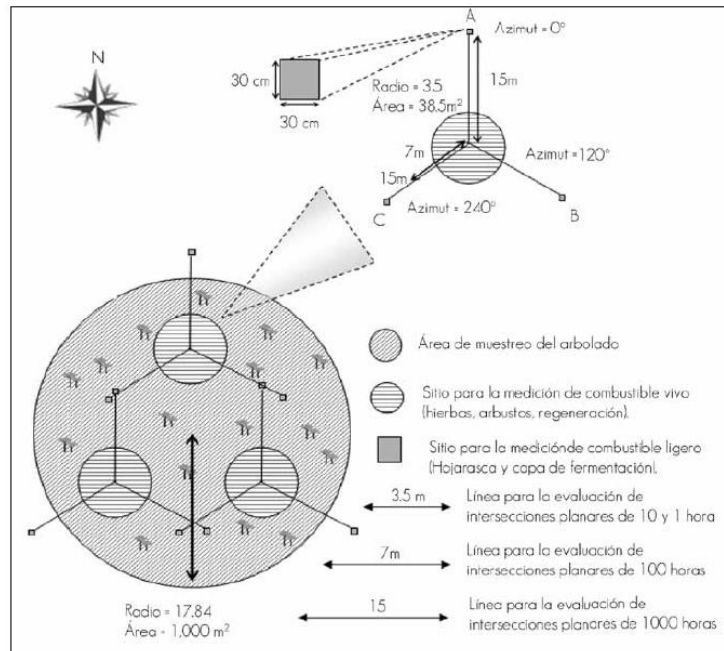


Figura 7. Diseño de muestreo de los conglomerados donde se agrupan tres sitios de investigación. Fuente: *Xelhuantzi et al., 2011*.

Al final de cada transecto fue colocado un cuadro de 30x30 cm, en el que se evaluaron los combustibles ligeros (capa de hojarasca y fermentación) (Figura 8). Antes de trazar los conglomerados se compensó la pendiente dependiendo del porcentaje de desnivel y longitud (*Xelhuantzi et al., 2011*).



Figura 8. Cuadro para el muestreo de combustibles ligeros (hojarasca y capa de fermentación).

5.2.4. Intersecciones planares

Método establecido por Brown en 1974 de intersecciones planares, el cual consiste en contar el combustible interceptado por una línea o un transecto y clasificarlos por su tiempo de retardo (Xelhuantzi *et al.*, 2011). En esta técnica se efectúa un conteo de piezas leñosas por frecuencia interceptadas en un plano, con el objetivo de conocer el tiempo que tarda un combustible vegetal muerto en ganar o perder dos tercios de la diferencia entre el contenido de su humedad inicial y la del ambiente (Flores *et al.*, 2016).

Se utilizó un calibrador de elaboración propia para la recopilación de datos (Figura 9), éste permite una contabilización rápida y eficiente, debido a que cuenta con las medidas para cada clase de combustible de acuerdo con su tiempo de retardo: de 0 a 0.6 cm de diámetro (1 hora); entre 0.6 cm a 2.5 cm de diámetro (10 horas), existentes en la línea de 3.5 m; de 2.6 a 7.5 cm de diámetro (100 horas) en la línea de 7 m; diámetro superior a 7.5 cm (1000 horas) medidos en el transecto de 15 m, estos se clasifican en podridos o firmes (Xelhuantzi *et al.*, 2011).

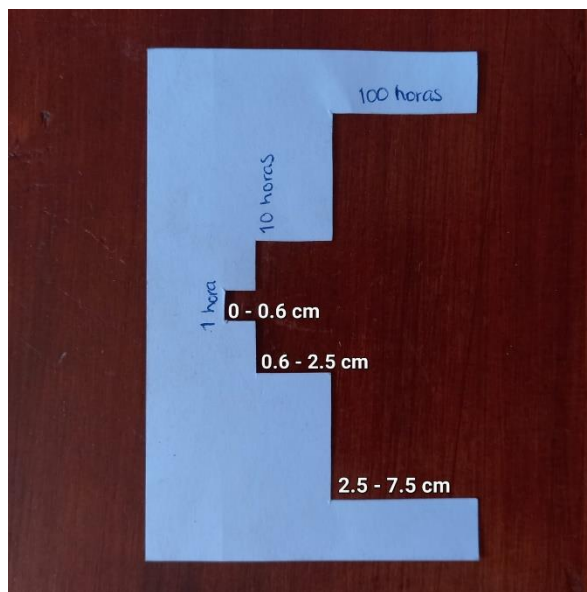


Figura 9. Calibrador para el conteo de combustibles de acuerdo con el tiempo de retardo. Elaboración propia.

A continuación, se presentan las distancias empleadas para la medición de intersecciones de combustibles de acuerdo con su clasificación (Cuadro 3).

Cuadro 3. *Distancia utilizada para cuantificar las intersecciones de combustible por su tiempo de retardo.*

Clase	Tiempo de retardo (h)	Diámetro (cm)	Descripción	Distancia medida (m)
I	1	0 - 0.6	Ramillas finas	0 a 3.5
II	10	0.6 - 2.5	Ramillas	0 a 3.5
III	100	2.5 - 7.5	Ramas	0 a 7
IV	1000	>7.5	Ramas gruesas y troncos	0 a 15

De acuerdo con lo establecido por Brown (1974), para la medición de continuidad de combustibles se consideraron desde ramillas hasta troncos muertos que estuviesen separados de árboles o arbustos y se encontraran en el suelo del bosque, las ramas muertas que se encuentran aún pegadas a un árbol muerto en pie no son contadas. El conteo se realizó caminando siempre de un solo lado de la cuerda para evitar modificaciones al remover combustibles. Se llevó a cabo el mismo procedimiento en las tres cuerdas por sitio, contando todo aquel combustible que interceptaba la línea (Figura 10), se contabilizan los combustibles hasta dos metros sobre la línea (como es el caso en árboles caídos (Figura 11)). Los estróbilos, hojas y hierbas no se consideran en la medición.

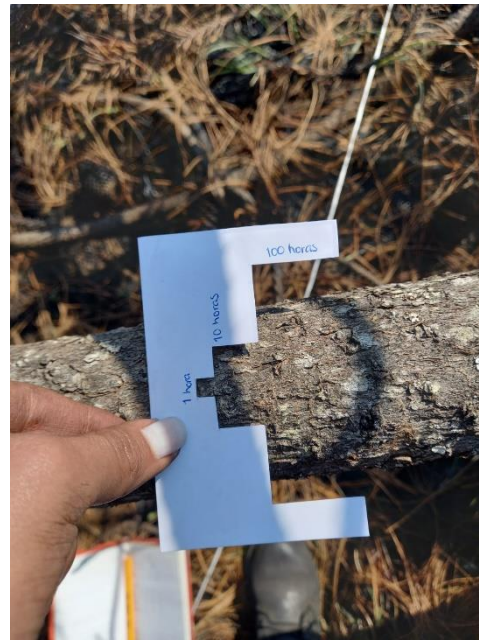


Figura 10. (Izquierda) *Conteo de combustibles con calibrador de combustibles.*

Figura 11. (Derecha) *Conteo de ramas de un árbol caído que interceptan por encima de la cuerda a una altura no mayor a los 2 m.*

Todas las ramillas y ramas encontradas sobre la cama de hojarasca son contabilizadas, incluso si se encuentran dentro, sin embargo, si el eje central se encuentra dentro de la capa de fermentación no se cuenta (Figura 12).



Figura 12. *Las piezas son contadas únicamente cuando no se encuentra en la capa de fermentación (Brown, 1974).*

En caso de que la línea de intersección atravesase la parte final a una rama, ésta sólo se medirá si se intercepta el eje central de la misma (Figura 13).

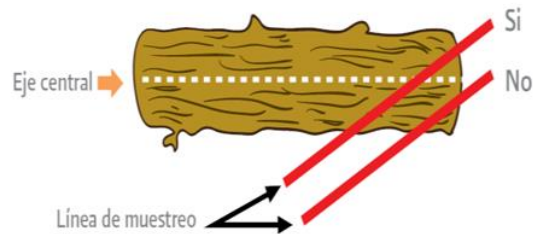


Figura 13. Troza interceptada en la final. La línea debe atravesar el eje central (Brown, 1974).

Cuando los combustibles pesados con pudrición se encuentran muy dañados, se debe estimar el diámetro reconstruyendo visualmente la estructura del material leñoso (Caballero *et al.*, 2018).

5.2.5. Formato de toma de datos

Se elaboraron formatos para la toma de datos en campo, los cuales se dividen en un apartado para registrar los datos generales del conglomerado: clave del conglomerado, coordenadas geográficas, y datos generales como altitud, exposición, fecha, hora de inicio y de termino (Anexo 2). El siguiente fue para anotar el material leñoso caído (MLC): la frecuencia de las intersecciones <7.5 cm, los diámetros de los combustibles >7.5 cm y la pendiente (Anexo 3). El tercer formato se utilizó para registrar los datos de hojarasca y de la capa de fermentación (Anexo 4). Por último, se elaboró una tabla para la medición de los combustibles vivos (Anexo 5).

5.2.6. Evaluación de combustibles finos

Posterior al conteo del MLC, se realizó la medición de la capa orgánica del suelo colocando un cuadro de madera de 30x30 cm. La profundidad de la cama de hojarasca y de la capa de fermentación se midió con un flexómetro y con ayuda de una pala de jardinería se colectaron las muestras (Figura 14).



Figura 14. Material para las muestras de la capa orgánica del suelo: cuadro de madera de 30x30 cm, flexómetro y pala de jardinería.

Con la pala de jardinería se delimitaba el cuadro de muestreo para los combustibles ligeros (Figura 15), permitiendo la entrada del flexómetro para la medición de la profundidad, delimitar el cuadro permitía la pronta identificación del sitio en caso de ser necesario una rectificación. Posteriormente, la muestra se colectaba en bolsas de plástico previamente etiquetadas para su traslado al laboratorio.

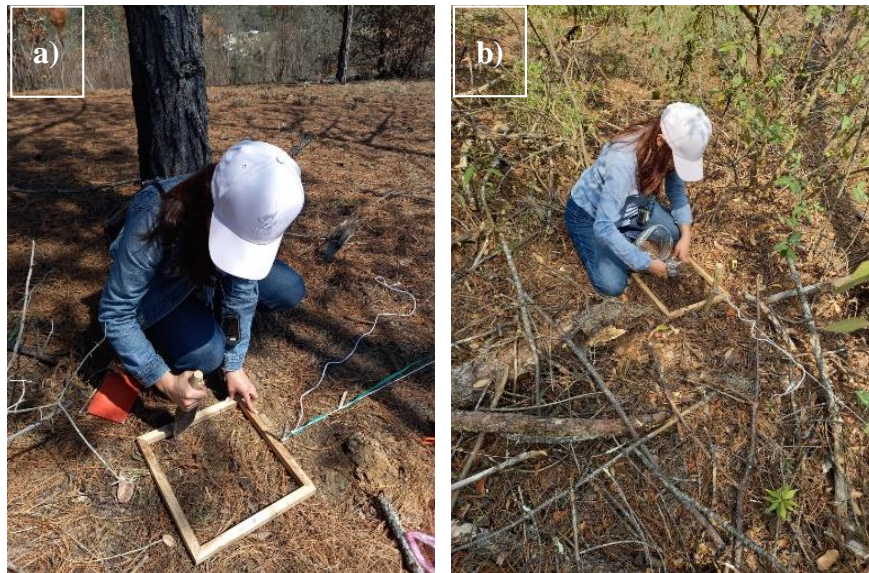


Figura 15. Muestreo de combustibles ligeros. a) Delimitación del área de muestreo de combustibles ligeros; b) Colecta de muestra de hojarasca y capa de fermentación en bolsas plásticas.

5.2.7. Procesamiento de combustibles

Las muestras obtenidas en el cuadrado de 30x30 cm, se limpiaron y separaron las capas de hojarasca y fermentación, se pesaron y guardaron en bolsas respectivamente etiquetadas. Antes de colocarse en la estufa de sacado, cada bolsa se perforó, con el objetivo de que el calor circule por dentro y se pierda humedad. Posteriormente se introdujeron a una estufa de secado previamente calentada de una a dos horas para que la cámara se encuentre a una temperatura de 60 a 80°C; durante el proceso de secado, se pesó el material a las 12, 24, 48 y 72 horas (o más, hasta alcanzar un peso constante) (Figura 16).

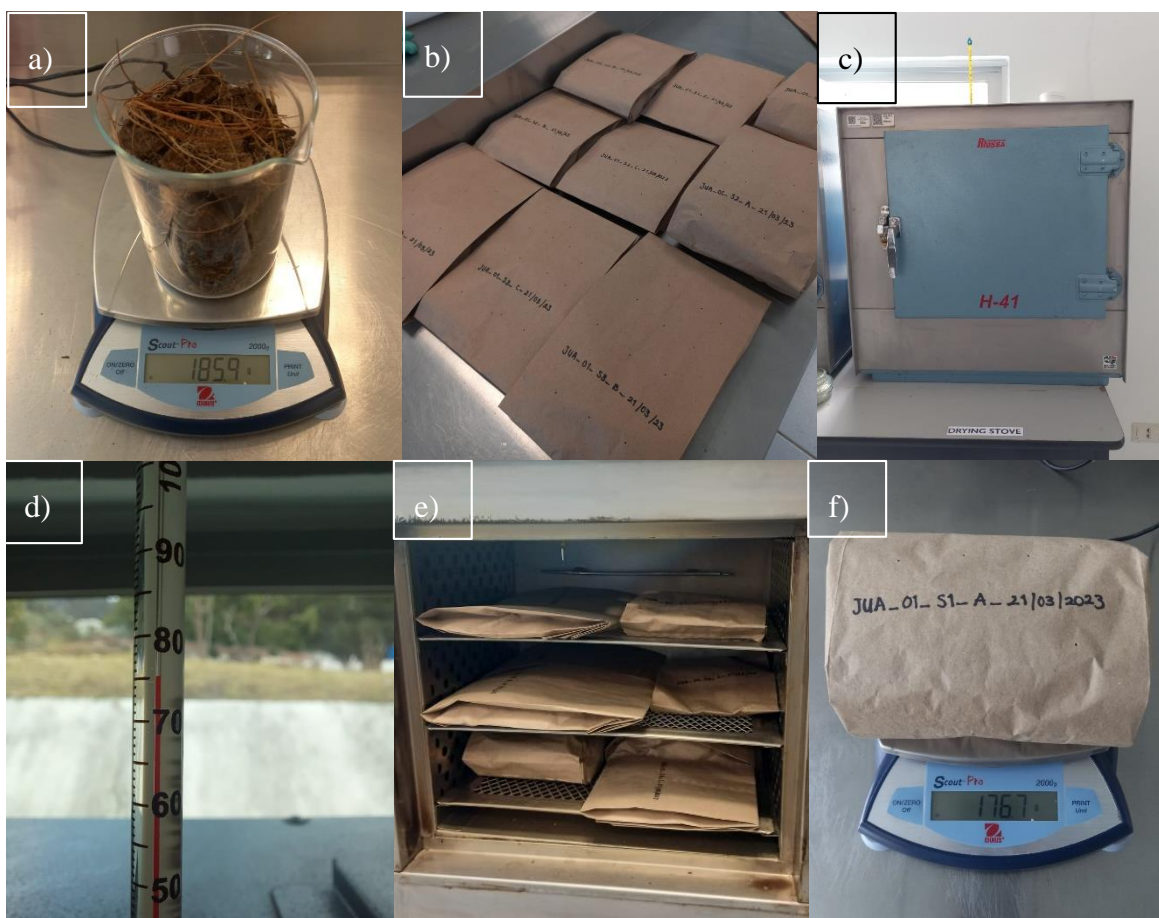


Figura 16. *Procesamiento de combustibles en el laboratorio. a) Separación y pesado de hojarasca y capa de fermentación; b) Rotulado y perforación de bolsas de estraza; c) Estufa de secado; d) Precalentamiento de la estufa para una temperatura óptima; e) Muestras en la estufa de secado; f) Registro de peso seco de las muestras.*

5.3. Análisis de datos

Se empleó la metodología de intersecciones planares descrita por Brown (1974) para muestrear la carga de combustibles leñosos *in situ*. Esta técnica está basada en los principios que estableció Van Wagner (1968), por lo tanto, en este trabajo se emplearon las fórmulas de Van Wagner (1982) descritas por Morfín *et al.*, (2012) para obtener resultados en unidades del sistema internacional y no del sistema inglés como lo aplicó Brown (1974).

5.3.1. Material leñoso caído

Se empleó el método de Van Wagner (1985) para determinar la carga de cada clase de combustible, aplicando la siguiente ecuación para el cálculo de combustibles de 1000h:

$$C = \frac{(k)GE \Sigma DC (c)}{L} \quad (1)$$

Donde:

C = Carga de combustible, expresada en megagramos por hectárea ($Mg \text{ ha}^{-1}$),

k = Constante equivalente a 1.234, obtenida de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la carga en $Mg \text{ ha}^{-1}$,

GE = Gravedad específica de la madera calculada sobre peso seco ($g \text{ cm}^3$),

DC = Diámetro cuadrático (diámetro intersecado elevado al cuadrado),

c = Factor de corrección de la pendiente,

L = Longitud de los transectos (m).

Para el cálculo de la carga en los combustibles de 1, 10 y 100 horas se emplean los recuentos de las frecuencias de las piezas que intersecan con sus valores específicos de tamaño de la partícula en el diámetro cuadrático promedio (DCP) y GE aplicando la ecuación siguiente:

$$C = \frac{(k)GE (DCP) (f) (c)}{L} \quad (2)$$

Donde:

C = Carga de combustible (Mg ha^{-1}),

$k = 1.234$,

GE = Gravedad específica de la madera (g cm^3),

DCP = Diámetro cuadrático promedio (cm) de cada categoría (1 h, 10 h, o 100 h),

f = Frecuencia de las partículas intersectadas por clase (1 h, 10 h, o 100 h),

c = Factor de corrección de la pendiente,

L = Longitud de los transectos (m).

5.3.2. Determinación de la pendiente

Para cada línea de muestreo es necesario incluir a la ecuación factores de corrección de la pendiente, debido a que el terreno no es uniforme, de esta manera se tienen mejores estimaciones (Morfín *et al.*, 2012).

La fórmula es la siguiente:

$$c = \sqrt{1 + \frac{(\% \text{ pendiente})^2}{100}} \quad (3)$$

5.3.3. Hojarasca y capa de fermentación

La carga de las capas de hojarasca del suelo y la densidad aparente se calculan de manera independiente, con el procedimiento siguiente: primero se calcula la densidad aparente de cada capa de hojarasca, para determinar el volumen se promedian las profundidades y luego se relaciona con el peso.

$$\rho = \left(\frac{p}{a*h}\right) 10 \quad (4)$$

Donde:

ρ = Densidad aparente ($\text{Mg}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$),

p = peso seco (g)

a = área del cuadro (cm^2)

h = Promedio de las profundidades de la capa de hojarasca (mm)

I_0 = Constante para convertir la densidad de la hojarasca g cm^{-3} en $\text{Mg}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$

Una vez obtenida la densidad aparente se puede calcular la carga de las capas de hojarasca y de fermentación con la siguiente ecuación:

$$C_o = \frac{\sum_{i=1}^9 (h_i)(d)}{9} \quad (5)$$

Donde:

C_o = Carga de la capa orgánica del suelo, hojarasca o capa de fermentación (Mg ha^{-1}),

h_i = Profundidad, ya sea de hojarasca o de la capa de fermentación (mm),

D = Densidad aparente ($\text{Mg}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$).

5.3.4. Carga total de combustibles forestales

La carga total de combustibles gruesos y finos se aplicó la siguiente fórmula:

$$CT = PTCL + PTCO \quad (6)$$

Donde:

CT = Carga total (Mg ha^{-1})

$PTCL$ = Peso total del combustible leñoso,

$PTCO$ = Peso total de la capa orgánica.

5.3.5. Análisis estadístico

A partir de las muestras en campo y los cálculos de las cargas de combustibles de cada categoría por tiempo de retardo, se obtuvo una base de datos para los 18 sitios de muestreo (con tres sitios cada uno), la cual se utilizó para los cálculos estadísticos para cada clase de combustible: media, moda, desviación estándar.

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA de un factor) con una significancia del 95 % para comparar las medias entre los sitios para la carga de material leñoso caído y hojarasca. Posteriormente se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Tuckey. El análisis estadístico se realizó en el software IBM SPSS Statistics.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados a continuación corresponden a datos recaudados en el inventario de combustibles forestales, que fueron procesados mediante las fórmulas propuestas por Van Wagner (1982), para calcular la carga de combustibles en $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Se describen los resultados obtenidos en promedio para las zonas evaluadas, la caracterización y cargas de combustible referente a los sitios de muestreo en los conglomerados evaluados. Con la base de datos y a partir de los datos obtenidos se elaboraron mapas del tipo de vegetación en cada conglomerado y un mapa final donde se muestra el riesgo de incendio por zona.

Carga de combustibles Forestales

A continuación, en el Cuadro 4, se muestra la carga total de combustibles por su tiempo de retardo para cada uno de los conglomerados. Se encontró una acumulación de combustibles forestales promedio de $34.79 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, ésta corresponde al conjunto del combustible leñoso y el combustible presente en la capa orgánica del suelo: hojarasca (HO) y la capa de fermentación (CF). Dentro de esta cifra, se encuentran incluidas todas las categorías de combustibles, con los siguientes valores obtenidos de carga total media para cada una: combustibles de 1 h ($0.48 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); combustibles de 10 h ($4.23 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); combustibles de 100 h ($10.26 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); combustibles de 1000 h P ($12.76 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); combustibles de 1000 h F ($5.32 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); hojarasca ($0.66 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); capa de fermentación ($1.07 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Cuadro 4. Carga de combustibles presentes en el área de estudio de acuerdo con su tiempo de retardo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

<i>Conglomerado</i>	1 h	10 h	100 h	1000 h P	1000 h F	HO	CF	Total
I	0.12	2.59	12.94	20.06	0.00	0.46	1.14	37.31
II	0.26	3.64	2.47	0.00	0.00	0.90	1.07	8.34

III	0.83	4.79	15.12	13.15	0.00	0.83	1.60	36.32
IV	0.59	5.55	15.00	40.91	31.90	0.76	0.96	95.66
V	0.62	4.17	7.71	2.45	0.00	0.55	0.78	16.29
VI	0.46	4.66	8.30	0.00	0.00	0.49	0.89	14.80
Media Mg*ha ⁻¹	0.48	4.23	10.26	12.76	5.32	0.66	1.07	34.79

Se obtuvo una acumulación total de carga de combustible menor a lo registrado por Bonilla *et al.*, (2013) en el municipio vecino Chignahuapan, con una carga total media de 44.735 Mg*ha⁻¹. En ambos estudios, se obtuvo que la mayor acumulación fue de los combustibles con un tiempo de retardo de 1000 h podridos, seguido por los combustibles de 100 h.

El conglomerado que presentó mayor acumulación de combustible leñoso fue el ubicado en San Nicolás sección cuarta, conglomerado 4 (no quemado) con un total de 95.66 Mg*ha⁻¹ (Figura 17).

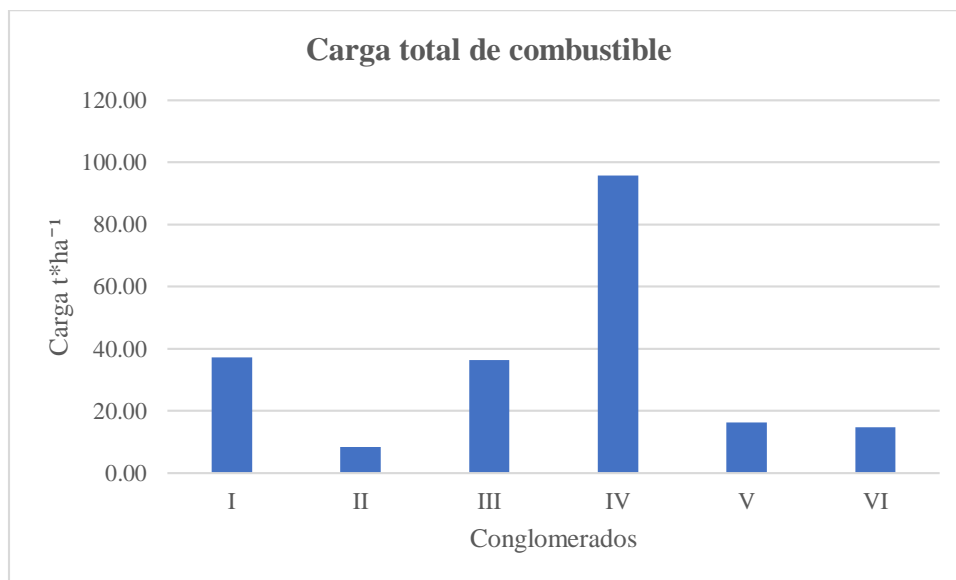


Figura 17. Carga total de combustibles leñosos en cada conglomerado.

Para la capa de hojarasca, el conglomerado 2 (no quemado) registró una carga total de 0.90 Mg*ha⁻¹, superando al resto de los conglomerados (Figura 18).

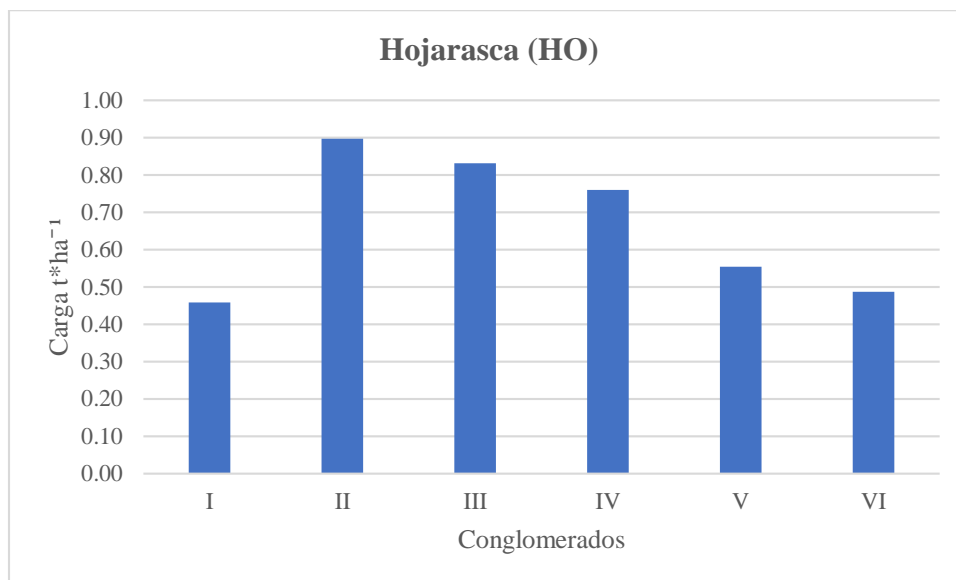


Figura 18. Carga total de combustibles leñosos en cada conglomerado.

En la capa de fermentación se presenta una diferencia más evidente del conglomerado 4 con un total de 0.96 Mg*ha⁻¹ (Figura 19).

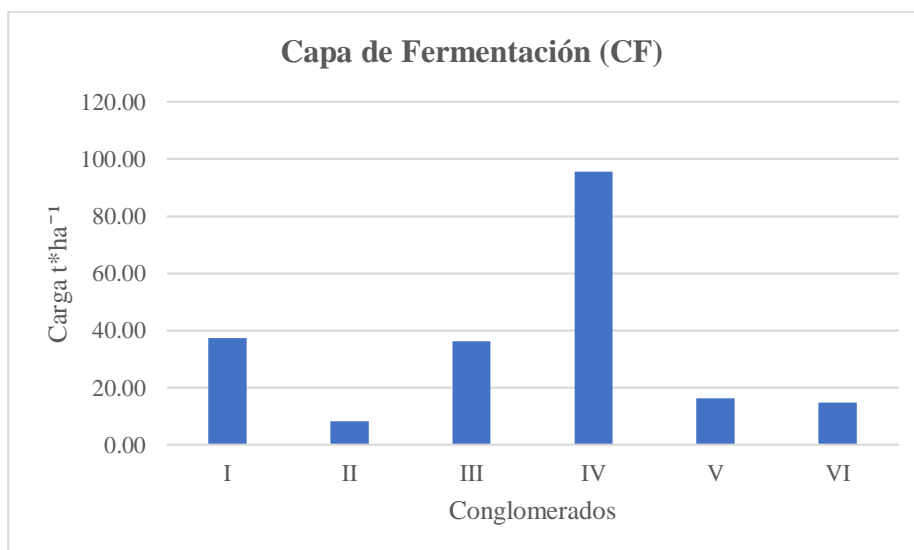


Figura 19. Carga total de capa de fermentación en cada conglomerado.

Combustible leñoso por condición: quemado y no quemado

A continuación, se muestra una comparativa entre las medias de la carga total de combustibles de los conglomerados quemados (I, III y V) y los no quemados (II, IV, VI) por su tiempo de retardo (Figura 20).

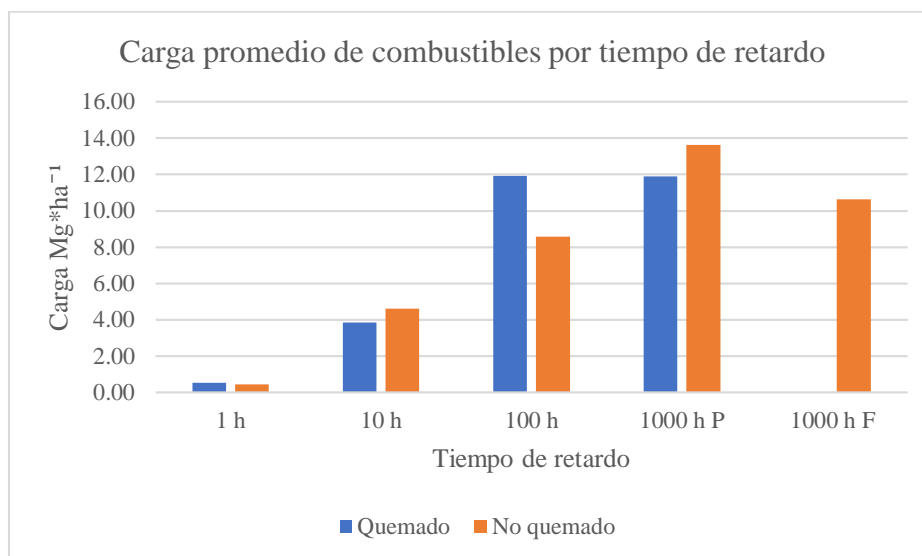


Figura 20. Carga promedio de combustibles por tiempo de retardo en conglomerados quemados y no quemados.

Las cargas totales medias fueron de 29.97 Mg*ha⁻¹ para el área quemada, mientras que en la no quemada alcanzaron 39.60 Mg*ha⁻¹; la diferencia puede estar dada por los incendios ocurridos en las zonas que causaron la pérdida de biomasa al quemarse. Los combustibles leñosos se distribuyen en el área quemada de la siguiente manera (Figura 21): los de 1 h de tiempo de retardo (TR) representan el 2% con 0.52 Mg*ha⁻¹; los combustibles de 10 h TR con 3.85 Mg*ha⁻¹ correspondiente al 14%; los combustibles de 100 h TR con 11.92 Mg*ha⁻¹ y 42%; los combustibles de 1000 h podridos TR, 11.89 Mg*ha⁻¹ equivalentes al 42% de la carga total; por último, no se encontraron combustibles de 1000 h F.

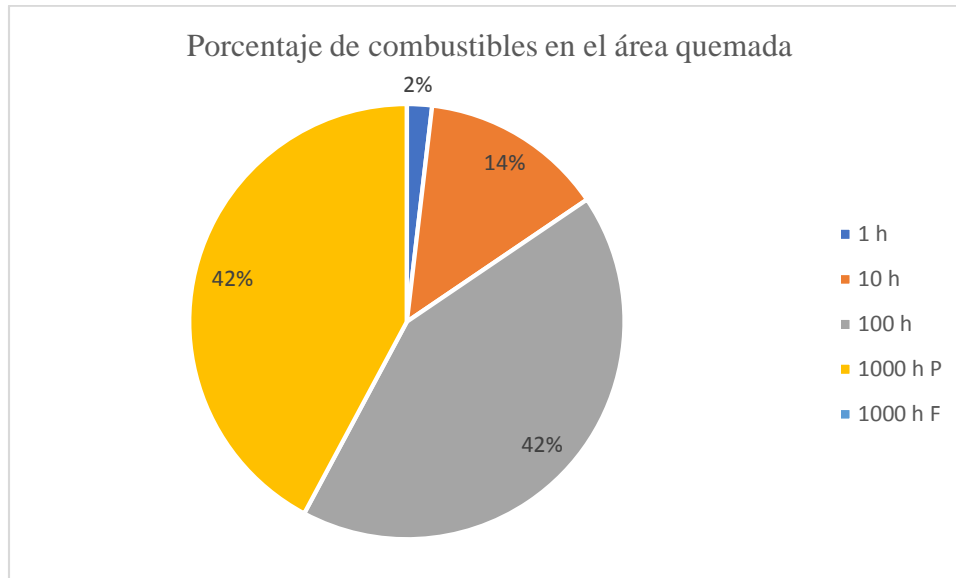


Figura 21. Porcentaje de combustible leñoso disponible por su tiempo de retardo en los conglomerados siniestrados.

Para el caso del área no quemada (Figura 22), la distribución de los combustibles por tiempo de retardo se divide de la siguiente manera: los combustibles de 1h TR aportan un 1% con 0.44 Mg*ha^{-1} ; los combustibles de 10 h TR 12%, con 4.62 Mg*ha^{-1} ; los de 100 h TR 23% y 8.59 Mg*ha^{-1} ; los combustibles de 1000 h TR podridos 36% con 13.64 Mg*ha^{-1} ; mientras que los combustibles de 1000 h TR firmes con 10.63 Mg*ha^{-1} correspondiente al 28%.

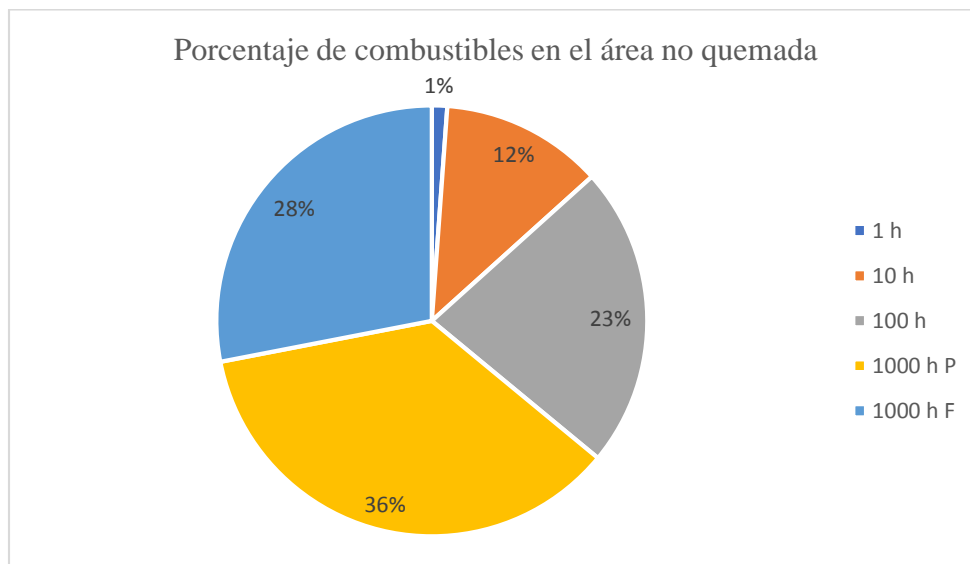


Figura 22. Porcentaje de combustible leñoso disponible por su tiempo de retardo en los conglomerados no quemados.

Según Contreras y Ángeles (2007), el estado de la vegetación al momento de la evaluación, el tipo y la intensidad del incendio, así como el tiempo transcurrido desde el último siniestro están estrechamente relacionados con la cantidad de combustibles presentes en cada condición. Estimar los combustibles forestales ayuda a predecir la intensidad de los incendios y evaluar sus efectos.

En el análisis de los datos puede apreciarse que la mayor carga de combustible se concentra en las áreas que no han sido siniestradas en los últimos años, resultados que coinciden con lo reportado por Xelhuatzin *et al.*, (2011), donde la carga media de combustibles en el área no quemada fue de 23.63 Mg*ha^{-1} y en el área quemada de 13.57 Mg*ha^{-1} , lo mismo se registró en Bonilla *et al.*, (2013), con 31.73 Mg*ha^{-1} en el área no quemada y 14.09 Mg*ha^{-1} en el área quemada. Esto es debido a que los incendios tienen un impacto en la cantidad de residuos y material combustible que permanece en las zonas afectadas. El intervalo entre incendios anteriores también es crucial, a medida que pasa el tiempo desde el último fuego, la cantidad de combustibles forestales puede aumentar. De ahí que, el propósito de estimar estos combustibles forestales es poder prever la intensidad de posibles incendios futuros y evaluar los efectos a largo plazo del fuego en el ecosistema. En resumen, entender la relación entre la cantidad de combustibles y estos factores permite una gestión más efectiva y una mejor comprensión de los riesgos y consecuencias asociados con los incendios forestales.

Capa de hojarasca (HO)

Se obtuvo una carga total media de la capa de hojarasca en los conglomerados quemados de 0.61 Mg*ha^{-1} mientras que para los no quemados de 0.71 Mg*ha^{-1} (Figura 23). En estos sitios se observó una profundidad promedio de 1.43 cm en los conglomerados siniestrados, mientras que en los no quemados se presentó de 1.63 cm. La carga total de hojarasca es de 3.99 Mg*ha^{-1} , estos resultados están por debajo de lo documentado por Xelhuantzi, Flores & Chávez (2012) con 8 Mg*ha^{-1} y Naranjo (2014) 7.66 Mg*ha^{-1} , esto indica una menor probabilidad de que en la zona ocurran incendios de alta intensidad.

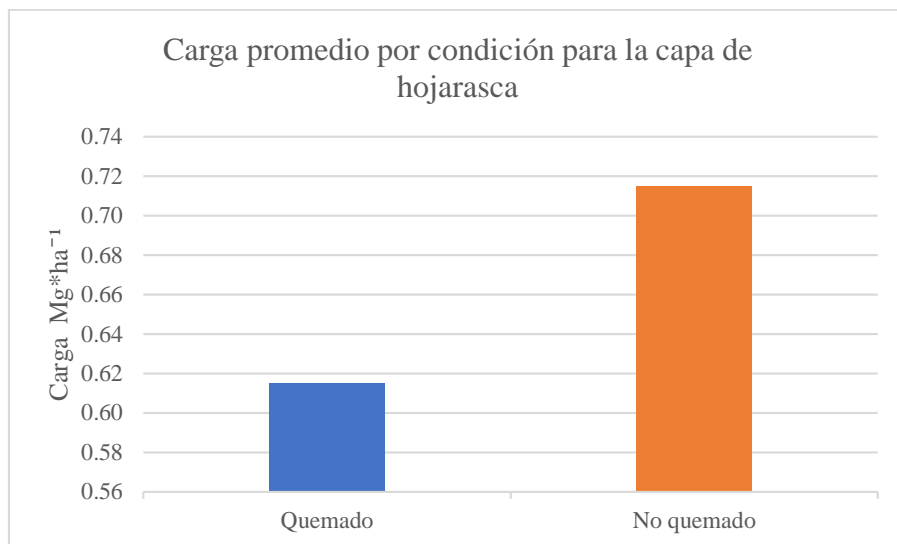


Figura 23. Carga promedio por condición para la capa de hojarasca en las áreas de muestreo.

Capa de Fermentación

Esta capa presentó una profundidad promedio de la capa de hojarasca en los conglomerados siniestrados de 0.52 cm, mientras que en los no quemados corresponde a 3.18 cm. Las cargas medias totales se obtuvieron de 1.17 Mg*ha⁻¹ y de 0.97 Mg*ha⁻¹, respectivamente en el mismo orden (Figura 24).

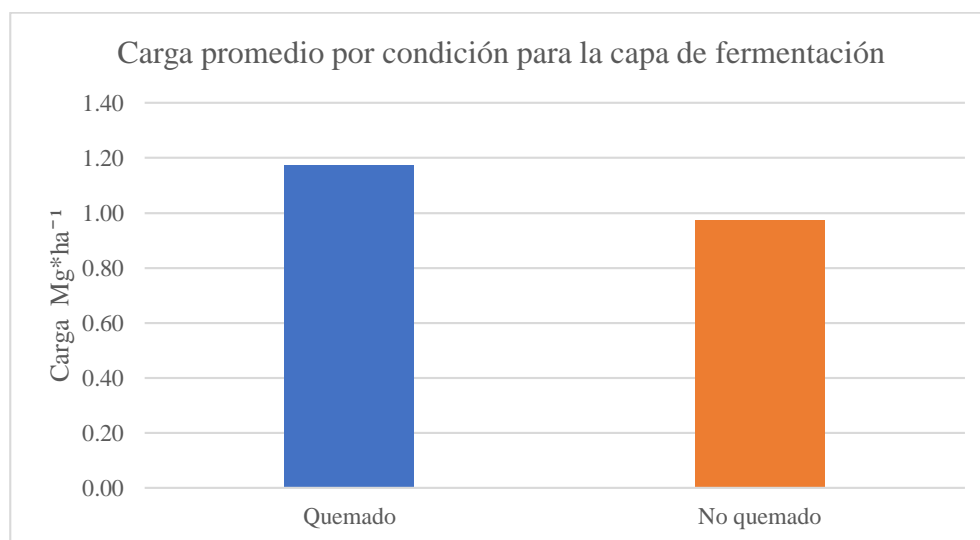


Figura 24. Carga promedio por condición para la capa de hojarasca en las áreas de muestreo.

En general, cuando se hace la comparación por condición en áreas siniestradas y las que no, la carga de combustibles forestales es mayor en las áreas no quemadas, esto se relaciona con la capacidad de regeneración de los encinos y la fácil ignición de los pinares, como lo reportan (Bonilla *et al.*, 2012; Rodríguez y Myers, 2010; Zavala, 2000).

Caracterización de combustibles dentro de las zonas de muestreo

En cada comunidad se consideró un área quemada (AQ) y otra no quemada (NQ) con la finalidad de hacer la comparativa entre sí. Para el caso de la comunidad de Benito Juárez, el conglomerado 1 AQ (Figura 25) está conformado en su mayoría por combustible pesado con tiempo de retardo de 1000 h podrido con un 56% de la carga total, mientras que en el conglomerado 2 NQ (Figura 26) el combustible ligero de 10 h representa la mayor concentración material combustible con un 57%.

En el conglomerado 1 (área quemada) perteneciente a la comunidad de Benito Juárez registró una carga total de combustible de $37.30 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sin presencia de combustibles de 1000 h firme.

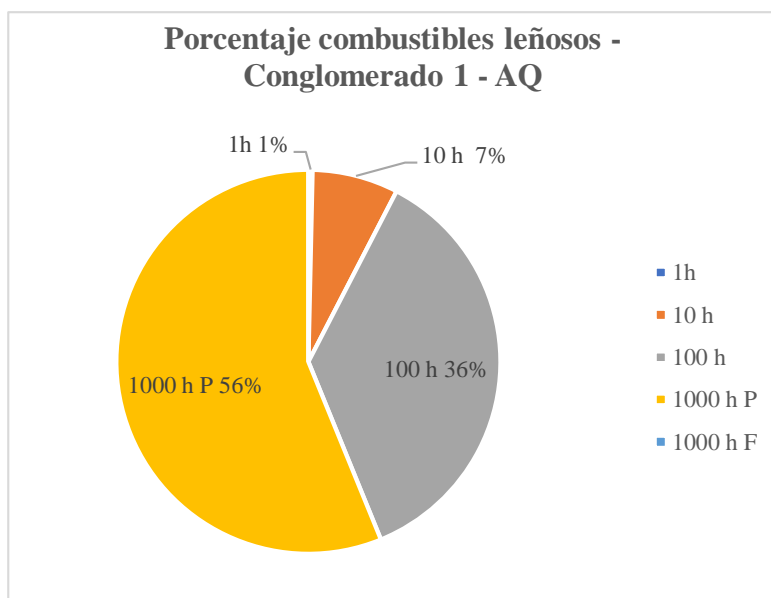


Figura 25. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 1 área quemada, en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.

En la zona adyacente no quemada, el conglomerado 2 en Benito Juárez tuvo una carga total de combustibles leñosos de $8.34 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, este ha sido el conglomerado con menor carga combustible debido a su cercanía con viviendas, caminos y rutas de ciclismo de montaña, lo que significa un mayor manejo a la zona.

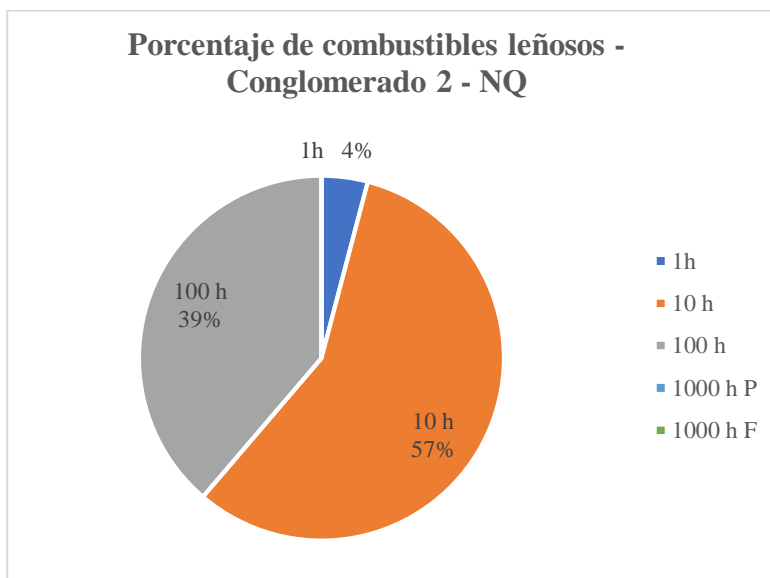


Figura 26. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 2 área no quemada, en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.

Para la zona quemada donde pertenece el conglomerado 3 en San Nicolás sección cuarta, se han obtenido resultados de $36.32 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, donde predominan los combustibles de 100 h de tiempo de retardo con un 45% de la carga total con $15.12 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Figura 27).

El conglomerado 4 área no quemada ubicado en San Nicolás sección cuarta es el de mayor carga de combustible total con $95.66 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, de los cuales el combustible de 1000 h P representa el 43% de la carga con $40.91 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, seguido por el combustible de 1000 h F con $31.90 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ y con apenas un 1% de combustible fino de 1h (Figura 28).

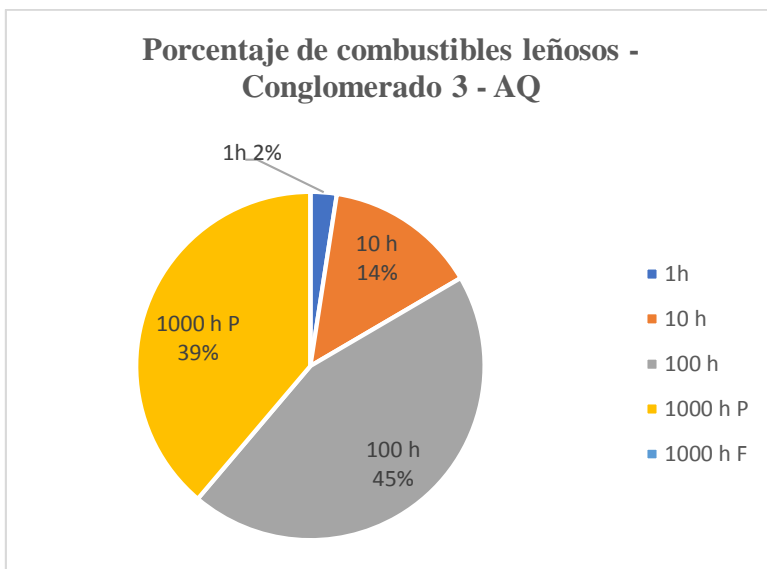


Figura 27. *Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 3 área quemada, en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.*

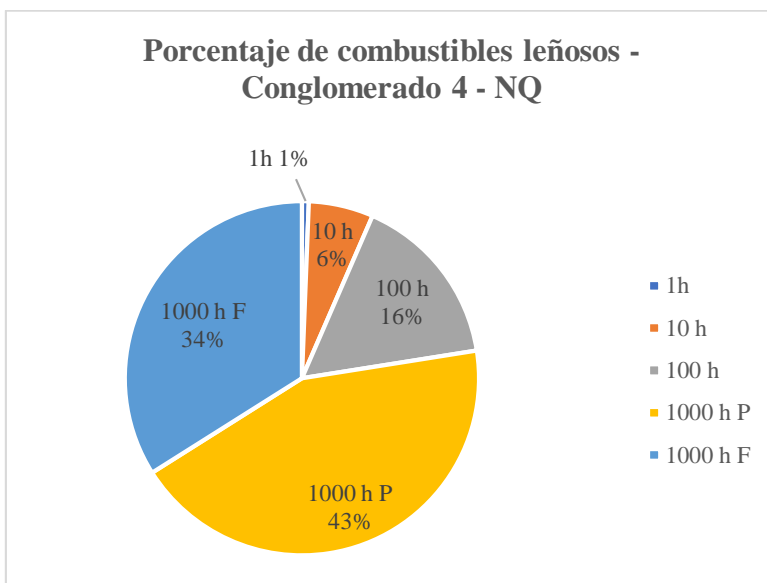


Figura 28. *Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 4 área no quemada, en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.*

El conglomerado 5 siniestrado en la sección tercera de San Nicolás tuvo un total de carga de combustible de $16.29 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ con mayor presencia de combustible de 100 h de retardo con $7.71 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Figura 29).

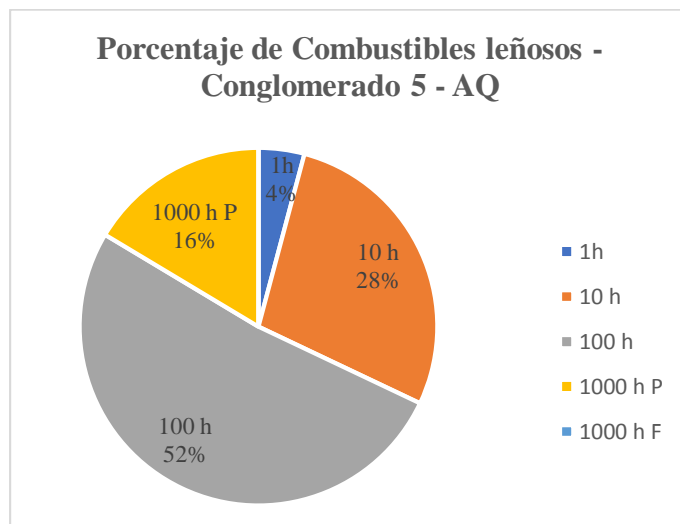


Figura 29. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 5 área quemada, en San Nicolás Sección Tercera, Tetela de Ocampo.

Para el conglomerado 6 ubicado en la colonia de Cruz Verde de San Nicolás se obtuvo una carga total de combustible de $14.80 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, igual que el área quemada, el combustible de 100 h representa la mayor cantidad con $8.30 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Figura 30).

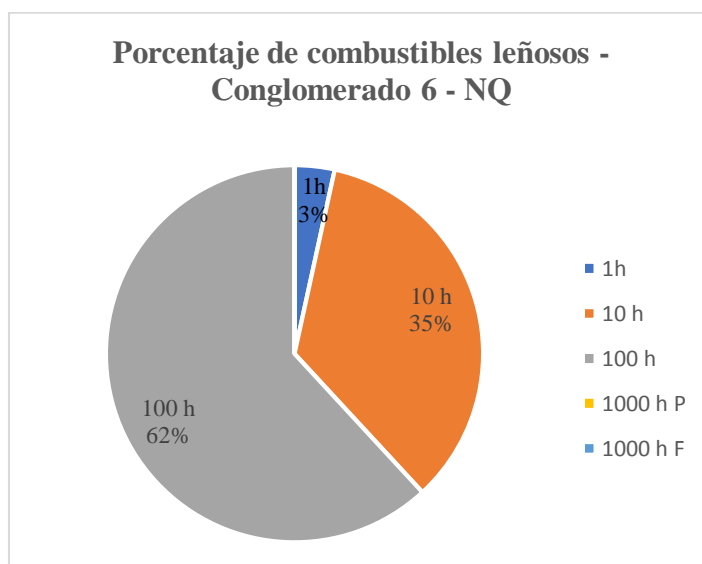
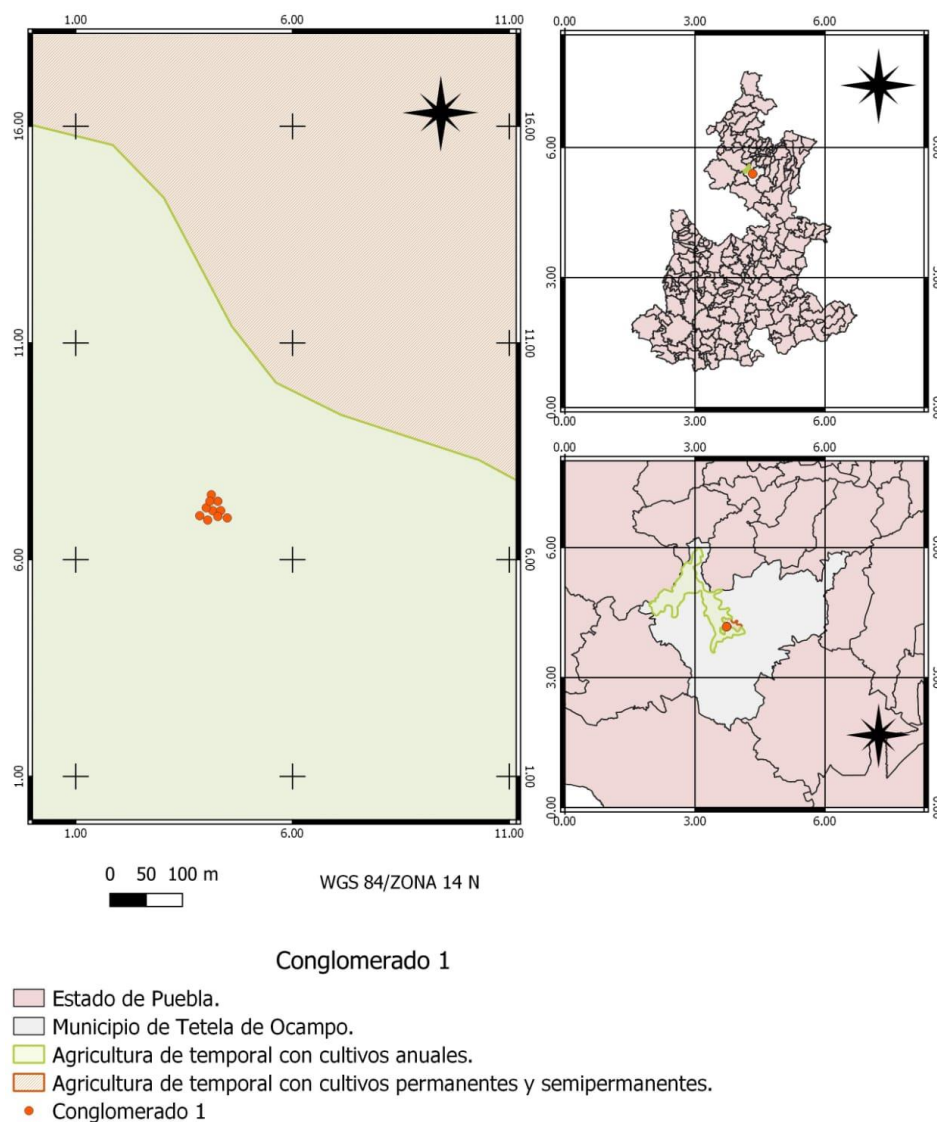


Figura 30. Porcentaje de combustible disponible en el Conglomerado 6 área no quemada, en Cruz Verde, San Nicolás, Tetela de Ocampo.

Mapas de los conglomerados

A continuación, se muestran los mapas obtenidos al tomar datos de georreferenciación en cada punto de los sitios pertenecientes a los conglomerados, para conocer el tipo de vegetación registrada en la zona.

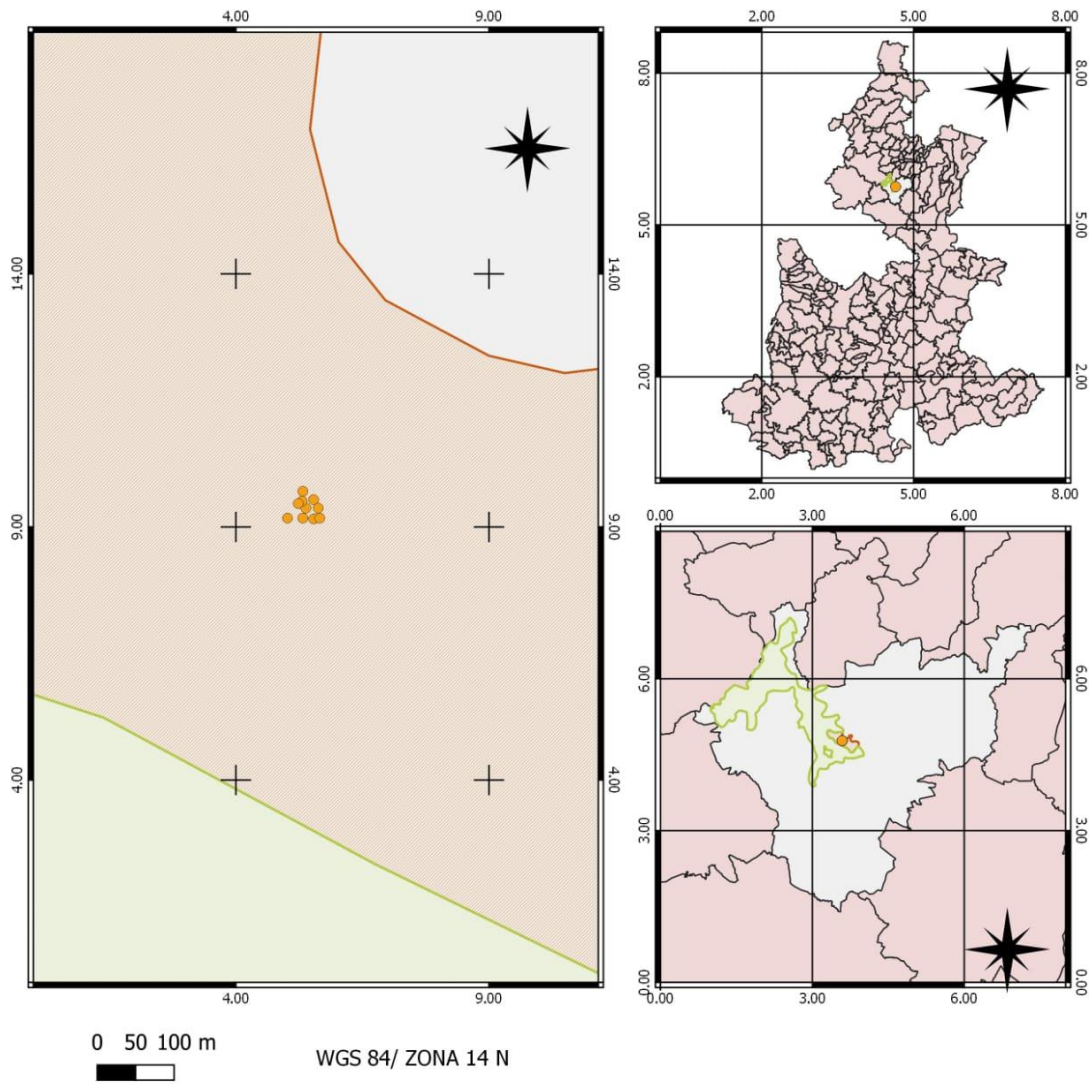
En la comunidad de Benito Juárez, el conglomerado 1 área quemada se ubicó en un área con vegetación de temporal con cultivos anuales (Figura 31).



Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México)

Figura 31. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 1 AQ en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.

Mientras que el conglomerado 2, área no quemada, tiene un tipo de vegetación de agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes (Figura 32).



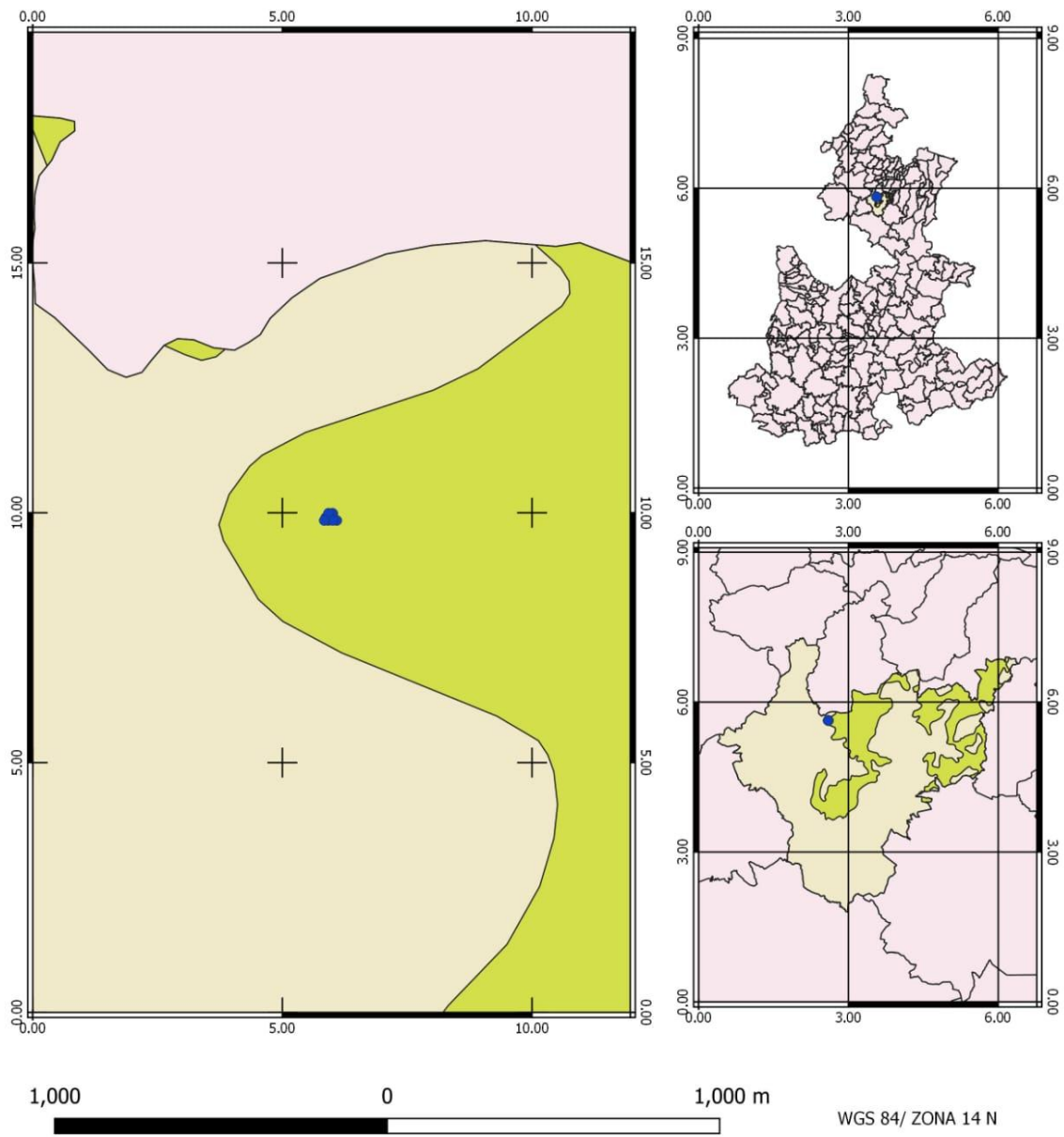
Conglomerado 2.

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Agricultura de temporal con cultivos anuales.
- Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.
- Conglomerado 2.

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México).

Figura 32. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 2 NQ en Benito Juárez, Tetela de Ocampo.

Los conglomerados ubicados en la sección cuarta de la comunidad de San Nicolás cuentan con un tipo de vegetación de Bosque de Pino-Encino (Figura 33).



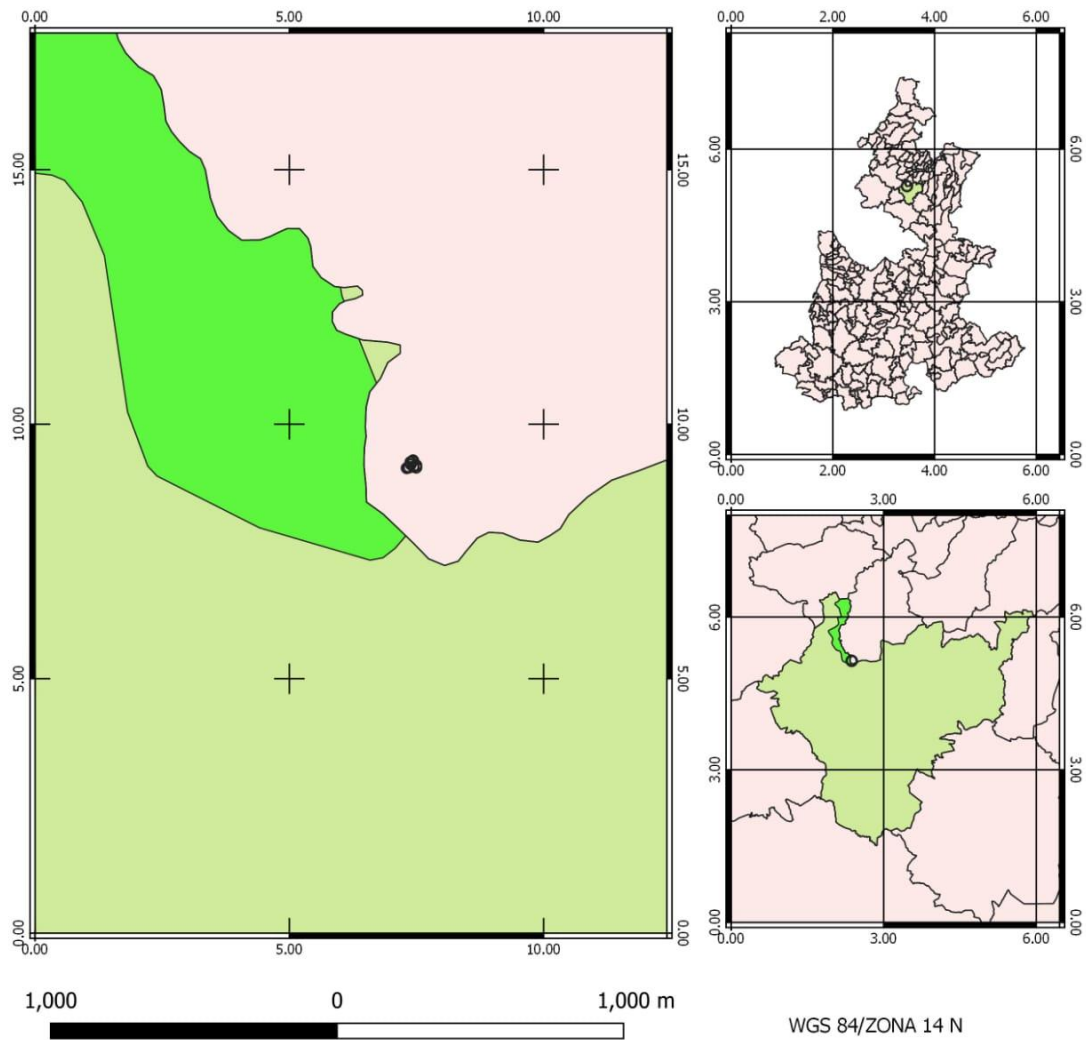
Conglomerado 3

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)
- Conglomerado 3

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México)

Figura 33. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 3 AQ en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.

Para el conglomerado 3 área quemada y de Bosque Pino-Encino con vegetación secundaria en el conglomerado 4 área no quemada (Figura 34).



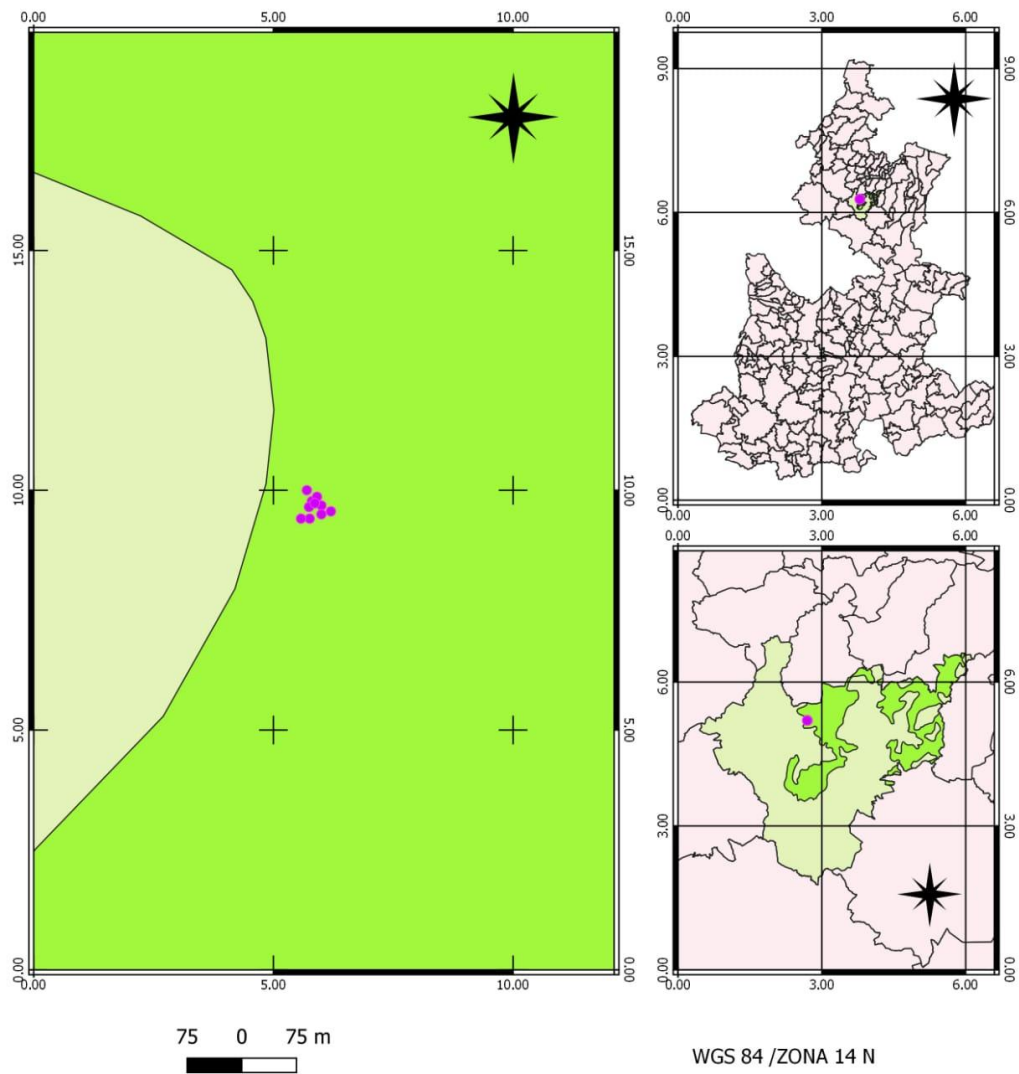
Conglomerado 4

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con vegetación secundaria.
- Conglomerado 4

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México)

Figura 34. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 4 NQ en San Nicolás Sección Cuarta, Tetela de Ocampo.

En la sección tercera de San Nicolás, el conglomerado 5 área quemada se ubicó en una vegetación de tipo Bosque Pino Encino (Figura 35).



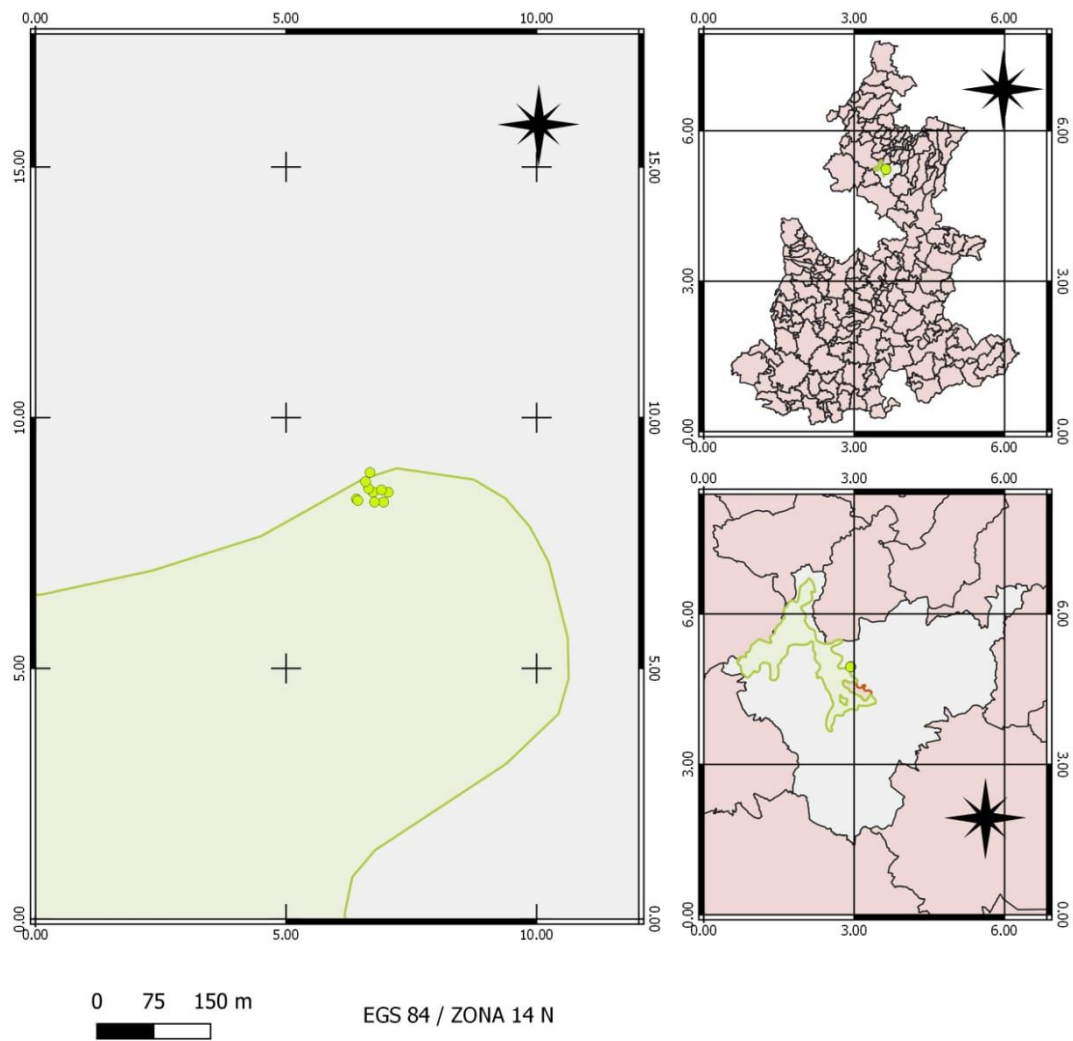
Conglomerado 5

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)
- Conglomerado 5

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de estadística, Geografía e Informática (INEGI, México)

Figura 35. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 5 AQ en San Nicolás Sección Tercera, Tetela de Ocampo.

Mientras que, el conglomerado 6 no quemado se encuentra en agricultura de temporal con cultivos anuales (Figura 36).



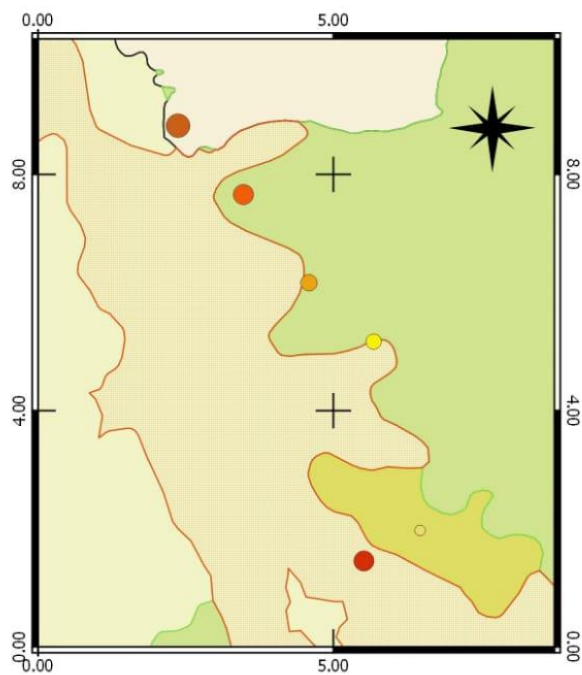
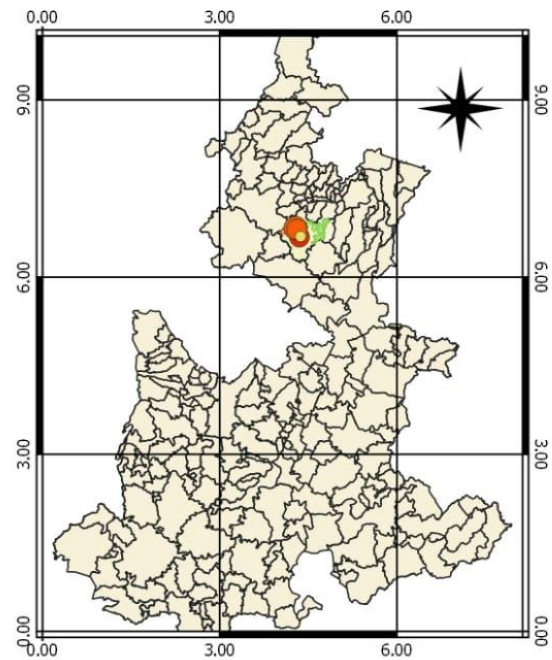
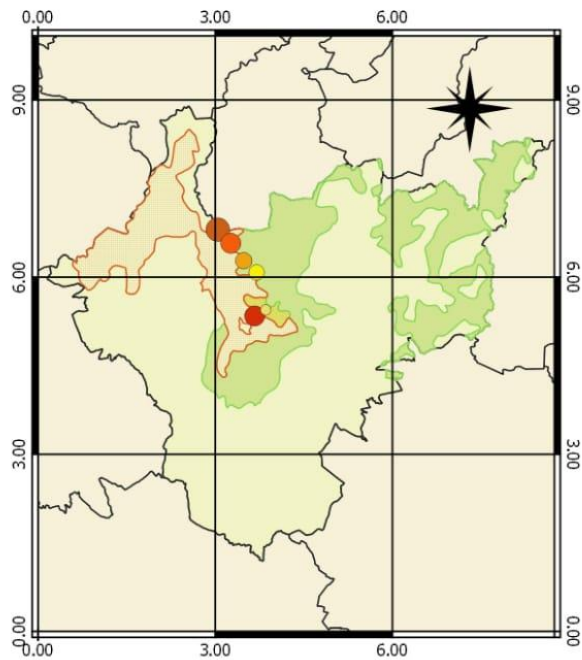
Conglomerado 6

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Agricultura de temporal con cultivos anuales.
- Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.
- Conglomerado 6

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México)

Figura 36. Mapa del tipo de vegetación en el Conglomerado 6 NQ en Cruz Verde, San Nicolás, Tetela de Ocampo.

En el siguiente mapa se presenta el riesgo de incendio por conglomerados de acuerdo con la carga de combustible disponible en la zona, en la Figura 37 se puede observar que el conglomerado 4 representa el 46% de la carga total de combustibles forestales evaluados en el municipio de Tetela de Ocampo, lo que lo coloca como el principal foco de riesgo.



0.5 0 0.5 km

Sistema de referencia
WGS 84 / zona 14 N

Conglomerados de incendios forestales.

- Estado de Puebla.
- Municipio de Tetela de Ocampo.
- Bosque de pino-encino (incluye encino-pino).
- Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.
- Agricultura de temporal con cultivos anuales.
- C1. % de combustible en la zona: 18.
- C2. % de combustible en la zona: 4.
- C3. % de combustible en la zona: 17.
- C4. % de combustible en la zona: 46.
- C5. % de combustible en la zona: 8.
- C6. % de combustible en la zona: 7.

Fuente: elaboración propia con datos recabados en campo y archivos shp tomados del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, México).

Figura 37. Mapa de Riesgo de Incendios Forestales por distribución de combustible forestal.

VII. CONCLUSIONES

La acumulación de combustibles en las zonas aumenta significativamente el riesgo de incendios futuros al proporcionar un mayor potencial de combustión. Por lo tanto, es de crucial importancia implementar una gestión adecuada del fuego y la planificar medidas de prevención de incendios en estas áreas.

La cantidad de combustible disponible en una determinada área indica los sitios que requieren una planificación específica para el manejo de combustibles. Los conglomerados ubicados más lejos de la población son los que presentan mayor acumulación de combustibles. Esto puede deberse a la falta de interés en estas zonas consideraras como “ajenas”. Sin embargo, es importante destacar que estos mismos conglomerados han sido lugares siniestrados en el pasado y con frecuencia vuelven a experimentar incendios, lo que hace evidente que se requiere un plan de manejo integral por parte del municipio para abordar este problema.

La estimación de cargas ha sido el principal enfoque para comprender cómo funcionan los combustibles en los ecosistemas nacionales. Este enfoque nos permite evaluar y planificar estrategias efectivas para reducir el riesgo de incendios forestales y proteger nuestras áreas naturales.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alcasena Urdíroz, F. J., Vega García, C., Ager, A. A., Salis, M., Nauslar, N.J., Mendizabal, F.J., & Castell, R. (2019). Metodología de evaluación del riesgo de incendios forestales y priorización de tratamientos multifuncionales en paisajes mediterráneos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(2). 571-600. Universidad de La Rioja. DOI: <http://doi.org/10.18172/cig.3716>.
- Arnaldos Viger, J., Navalón Nonell, X., Pator Ferrer, E., Planas Cuchi, E., & Zárata López, L. (2004). *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*. Barcelona: Mundi-Prensa.
- Caballero Cruz, P., Santiago Juárez, W., Martínez Santiago, D., Cruz Santiago, O. L., Pérez Silva, E. R., & Aguirre Calderon, O. A. (2018). Combustibles forestales y susceptibilidad a incendios de un bosque templado en la Mixteca alta, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana*, 20(1), 9-14.
- Chávez D., A. A., J. Xelhuanzi C., E. A. Rubio C., J. Villanueva D., H. E. Flores L. & C. De la Mora O. (2016). Caracterización de cargas de combustibles forestales: una herramienta importante para el manejo de los reservorios de carbono y su potencial contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol. Esp. (13), 2589-2600. Doi: 10.29312/remexca.v0i13.485.
- Cruz López, M. I. (2018). Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México. *GeoFocus (Artículos)*, Núm. 21, 119-143. ISSN: 1578-5157. DOI: <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2012). *Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores*. (Tercera edición).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). *Reporte semanal de resultados de incendios forestales, Coordinación General de Conservación y Restauración, Comisión Nacional Forestal, Gerencia de Manejo del Fuego*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604834/Cierre_de_la_Temporada_2020.PDF

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). *Incendios forestales*. Recuperado de <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- Contreras C., I. E. & R. E. Ángeles. (2007). Evaluación de combustibles forestales en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. En: *Proceedings of Wildfire 2007*, Sevilla, España. 19 p.
- Díaz, E. R. E. (2012). Caracterización de combustibles forestales mediante un muestreo directo. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Díaz García, E. R., González Tagle, M. A., Jiménez Pérez, J., Treviño Garza, E. J., & Ávila Flores, D. Y. (2012). Caracterización de combustibles forestales mediante un muestreo directo en plantaciones forestales. En *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales* (pp. 426-436).
- Estrada, I. y Ángeles, E. R. (2007). Evaluación de combustibles forestales en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. Recuperado el 24 de mayo de 2014 de http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/SESIONES_Tematicas/ST3/Estrada_Angeles_SPAIN_Zaragoza.pdf
- Faleh, A., Lakhouaja, H., Sadiki, A., & Chaaouan, J. (2012). SIG, Teledetection et evaluation de risque d’incendie de forets “exemple du massif forestier Khezana (Province de Chaouene)”. *Papeles de Geografía*, 55-56, Pp. 37-48. Universidad de Murcia, España.
- Flores Garnica, J. G., & Benavides Solorio, J. D. (2006). Cap. 2 Avances de la investigación en incendios forestales en México (2004). En J. G. Flores Garnica, D. A. Rodríguez Trejo (Eds.), *Incendios Forestales, Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. (pp. 11-25) México:CONAFOR, Mundi-Prensa.
- Flores-Garnica, J. G. (2006). *Incendios Forestales*. CONAFOR. Mundi-Prensa. 254pp.

- Flores G., J.G.; Benavides S., J.D.; Macías M. A.; Vega M., D., & Flores R., A.G. (2016). *Metodología para la caracterización de condiciones propicias para incendios forestales en campo*. (Folleto Técnico, Núm. 5). INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 63 p.
- Flores G., J. G., Moreno G., D. A., & Morfín R., J. E. (2010). *Muestreo directo y fotoseries en la evaluación de combustibles forestales*. (Folleto Técnico, Núm. 4). INIFAP CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jal., México. 69 p.
- Flores Rodríguez, A. G., Flores Garnica, J. G., González Eguiarte, D. R., Gallegos Rodríguez, A., Zarazúa Villaseñor, P., & Mena Munguía, S. (2021). Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.60396](https://doi.org/10.14350/rig.60396)
- Flores Rodríguez, A. G., Flores Garnica, J. G., González Eguiarte, D. R., Gallegos Rodríguez, A., Zarazúa Villaseñor, P., & Mena Munguía, S. (2021). Revisión de métodos de sensores remotos para la detección y evaluación de la severidad de incendios forestales. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 273-283.
- Fornacca, D., Ren, G. & Xiao, W. (2018). Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10, 1196. DOI: [10.3390/rs10081196](https://doi.org/10.3390/rs10081196)
- Frausto Leyva, J. M. (2006). Cap. 7 El programa de prevención de incendios FMCN-USAID. En J. G. Flores Garnica & D. A. Rodríguez Trejo (Eds.), *Incendios Forestales, Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación* (pp. 83-96). México: CONAFOR, Mundi-Prensa.
- Garay, D. (2020). Incendios rurales y forestales: La importancia de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica. *Revista Tecnoárido* 2(3), 46-48. Editorial Estación Experimental Agropecuaria La Rioja, INTA, Argentina.
- Gould, W. A., González, G., Hudak, T.A., Hollingsworth, N.T., & Hollingsworth, J. (2008). Forest structure and downed woody debris in boreal, temperate and tropical

forest fragments. *AMBIO- A Journal of the human Environment*, Vol. 37, 577-587. University of Nebraska-Lincoln.

- Hernández, R. y Ramírez, U. (2010). Evaluación del material combustible en la estación forestal experimental Zoquiapan. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Hinojosa Aguirre, F. J. (2006). Cap. 12 Experiencia de participación social en la prevención y combate de incendios forestales. En J. G. Flores Garnica & D. A. Rodríguez Trejo (Eds.), *Incendios Forestales, Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. (pp. 149-160) México: CONAFOR, Mundi-Prensa.
- Jardel P., E. J., Alvarado, E., Morfín R., J. E., Castillo N., F., & Flores G., J. G. (2009). Regímenes de Fuego en Ecosistemas Forestales de México. En J. G. Flores Garnica, (Ed.), *Impacto ambiental de incendios forestales* (pp. 73-100). México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Colegio de Postgraduados.
- Key, C. H. & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment sampling and analysis Methods. En D. C. Lutes (Ed.), *Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. (pp. LA1 – LA51). Rocky Mountain: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/241688462_Landscape_Assessment_LA_Sampling_and_Analysis_Methods
- Lasanta, T., Nadal Romero, E., & García Ruíz, J.M. (2019). Clearing shrubland as a strategy to encourage extensive livestock farming in the Mediterranean mountains. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45. DOI: <http://doi.org/10.1812/cig.3616>.
- Martín Isabel, M. P., Chuvieco Salinero, E., Oliva Pavón, P., Rodríguez Verdú, F., Nieto Solana, H., & Padrón Paredes, D. (2007). Un ejemplo práctico de aplicación operativa de la Teledetección a la gestión de riesgos naturales: cartografía y evaluación urgente de áreas quemadas en Galicia. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 33, Pp. 19-37. Universidad de La Rioja.

- Miller, J.D. & Thode A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109, 66-80. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.006
- Morfín-Ríos, J. E., Jardel P., E. J., Alvarado C., E. & Michel-Fuentes, J. M. (2012). Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. 59 p.
- Moscovich, F. A., Ivandic, F., Besold, L.C. (2014) *Manual de Combate de Incendios Forestales y Manejo del Fuego*. Argentina: Ediciones INTA (Instituto Nacional de Tecnologías Agrícolas).
- Myers, R. J. (2004). *Guía para el Desarrollo de una justificación ecológica y plan de estrategia del manejo del fuego*. Taller Internacional el Manejo Integrado del fuego en Ecosistemas Montanos de Latinoamérica. República Dominicana.
- Nájera Díaz, A. (2006). Cap. 10 Capacitación en manejo del fuego. En J. G. Flores Garnica, D. A. Rodríguez Trejo (Eds.), *Incendios Forestales, Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. (pp. 115-121). México: CONAFOR, Mundi-Prensa.
- National Wildfire Coordinating Group (NWCG). 2018. *Guía de Respuesta de Incidente de Bolsillo (GRI/IRPG)*. Estados Unidos. Pp. 122. Recuperado de <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- Neger, C., & Manzo-Delgado L. L. (2021). La evaluación de la gestión del riesgo de los incendios forestales en áreas naturales protegidas tropicales: el caso de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (México). *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 95-128
- Raygoza Martínez, J. A. (2006). Cap. 1 Sistema satelital de incendios forestales en México. En J. G. Flores Garnica, D. A. Rodríguez Trejo (Eds.), *Incendios Forestales, Definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación* (pp. 03-10). México: CONAFOR, Mundi-Prensa.
- Rodríguez T., D. A. & Myers, R. L. (2010). Using characteristics of oaks as guides to restoring fire regimes in Mexican pine-oak and oak forests. *Ecological Restoration*, 28(3): 304-323.

- Rubio, E. A. (2013). Análisis de la estructura, biomasa y combustibles forestales: una aproximación a la ecología del fuego en bosques montanos de la Sierra Madre Oriental. Tesis de maestría no publicada, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- SEMARNAT. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y pesca). (2022). *Número de incendios forestales*. Recuperado de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RFOREST_A05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2022). *Observando el tiempo: Monitoreo atmosférico y ambiental*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/monitoreo-atmosferico-ambiental>
- Tran, B. N., Tanase, M. A., Bennett, L. T. & Aponte, C. (2018). Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote sensing*, 10, 1680. DOI: 10.33/rs10111680
- Tran, B. N., Tanase, M. A., Bennett, L. T. & Aponte, C. (2019). Fire-severity classification across temperate Australian forests: random forests versus spectral index thresholding. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*, 111490U. DOI: 10.1117/12.2535616
- Urrutia H., I., Rodríguez A., B., González M., M., Martínez B., L. W., Flores G., J. G., & Alonso T., Y. (2020). Impacto de quemas prescritas en la estabilidad del escurrimiento superficial en un bosque de pino. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621549. DOI: 10.21829/myb.2020.2621549
- Van Wagner, C.E. (1982). Practical aspects of the line method (Information Report PI-X-12). Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute. Chalk River, Ontario, Canada.
- Vloger, K.C., Ager, A.A., Day, M.A., Jennings, M., & Bailey, J.D. (2015). Prioritization of forest restoration projects: tradeoffs between wildfire protection, ecological restoration and economic objectives. *Forest*, 6, 4403-4420. DOI: <https://doi.org/10.3390/f6124375>.

- Xelhuantzi C., J., J. G. Flores G. & A. A. Chávez D. (2011). Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3): 37-52. DOI: 10.29298/rmcf.v2i3.624.

ANEXOS

Anexo 1. Incendios forestales ocurridos en Tetela de Ocampo del 2020 al 2022.

Fuente: Comisión Nacional Forestal - Zacatlán, y CONAFOR (2022).

Año	Lugar	Fecha	Coordenadas	Tipo de incendio	Superficie afectada	Predio
2020		24/03/20- 26/03/20	19°50'56.2"N 97°47'52.1"O	Superficial	Herbáceo: 35 ha Arbustivo:80 ha. Total: 115ha	Las Limas
	Las Limas	27/03/2020	19°51'30.4"N 97°48'42.2"O	Superficial	Herbáceo: 3 ha.	Atenti
	Cascada de Aconco Xaltatempa	08/04/2020	19°53'20.6"N 97°50'01.9"O	Superficial	Herbáceo: 16 ha.	Acatlán
	Atenti Ooriente	12/04/2020	19°50'59.1"N 97°40'46.6"O	Superficial	Herbáceo: 2 ha.	Atenti
	Las Limas	21/04/2020- 22/04/2020	19°51'47.2"N 97°47'53.2"O	Superficial	Herbáceo: 12 ha.	Las Limas
	Benito Juárez	05/05/2020	19°49'24.0"N 97°48'4.0"O	Superficial	Herbáceo: 1 ha.	El arenal
2021	Tatzalan	22/03/2021- 23/03/2021	19°50'51.3"N 97°47'13.7"O	Superficial	Arbustivo: 34ha Herbáceo: 5.9 ha Total: 39.9 ha.	
		26/04/2021- 01/05/2021	19°50'31.7"N 97°51'33"O	Superficial	Arbustivo: 749 ha Herbáceo:187 ha. Total: 936 ha.	
2022	Tilapa	02/04/2022	No disponible	Superficial	Total: 184 ha	Tilapa
	Xiletitla	03/04/2022	No disponible	Superficial	Total: 118 ha	Cerro de Taxis
	Zoyatitla	15/04/2022	No disponible	Superficial	Total: 57 ha	San Antonio

240° - C							
----------	--	--	--	--	--	--	--

Anexo 4. Formato de registro de combustibles finos: hojarasca y capa de fermentación.

Medición de combustibles en el marco 30x30 cm			
	Tercio A	Tercio B.	Tercio C
Porcentaje de cobertura de hojarasca			
Porcentaje de cobertura de fermentación			
Profundidad de capa de hojarasca			
Profundidad de capa de fermentación			
Foto de cuadro 30x30 a 1 de h			
Foto al cielo a 1m del cuadro 30x30			
Foto profundidad hojarasca y capa de fermentación			

Anexo 5. Formato de registro de combustibles vivos.

Medición de vegetación en círculo de 15m						
	Tercio A 0° -120°		Tercio B. 120° -240°		Tercio C. 240° -360°	
	Altura promedio	Porcentaje de cobertura	Altura promedio	Porcentaje de cobertura	Altura promedio	Porcentaje de cobertura
Arbolado joven						
Arbustos						
Regeneración						
Hierbas						
Pastos						

Anexo 6. Cuadro de ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F
1 h	Entre grupos	0.036	5	0.007	4.105
	Dentro de grupos	0.085	48	0.002	
	Total	0.121	53		
10 h	Entre grupos	0.586	5	0.117	1.114
	Dentro de grupos	5.053	48	0.105	
	Total	5.639	53		
100 h	Entre grupos	13.819	5	2.764	1.328
	Dentro de grupos	99.874	48	2.081	
	Total	113.693	53		
1000 (podridos)	Entre grupos	141.997	5	28.399	3.046
	Dentro de grupos	447.477	48	9.322	
	Total	589.474	53		
1000 (firmes)	Entre grupos	94.199	5	18.84	4.66
	Dentro de grupos	194.064	48	4.043	
	Total	288.263	53		
Hojarasca	Entre grupos	0.02	5	0.004	1.827
	Dentro de grupos	0.104	48	0.002	
	Total	0.123	53		
Capa de fermentación	Entre grupos	0.046	5	0.009	1.231
	Dentro de grupos	0.358	48	0.007	
	Total	0.404	53		
Total	Entre grupos	572.86	5	114.572	10.409
	Dentro de grupos	528.349	48	11.007	
	Total	1101.209	53		
	Entre grupos	1.021	5	0.204	0.251

Profundidad hojarasca	Dentro de grupos	38.996	48	0.812	
	Total	40.016	53		
Profundidad CF	Entre grupos	386.439	5	77.288	14.487
	Dentro de grupos	256.076	48	5.335	
	Total	642.515	53		