



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

### "EVALUACIÓN DE CARGAS COMBUSTIBLES BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS"

TESIS DE INVESTIGACIÓN

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER

EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

CLAUDIA IVETTE ORTEGA VARGAS

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO.



**APROBADA**



*Chapingo, Estado de México, junio de 2021*

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**  
**EVALUACIÓN DE CARGAS COMBUSTIBLES BAJO**  
**DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS**

Tesis realizada por **CLAUDIA IVETTE ORTEGA VARGAS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales**

DIRECTOR:

  
DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO

ASESOR:

  
DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

ASESOR:

  
DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

## CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	xiii
ABSTRACT .....	<u>xiv</u>
1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación.....	4
1.3 Planteamiento del problema de investigación.....	4
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos particulares.....	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Preguntas de investigación.....	6
1.7 Estructura del documento .....	7
1.8 Contenido capitular.....	7
1.9 Literatura citada.....	8
2. CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Marco teórico.....	10
2.1.1 Fuego.....	10
2.1.2 Función ecológica del fuego.....	10
2.1.3 Efectos del fuego en los bosques.....	12
2.1.4 Comportamiento del fuego .....	14
2.1.5 Actividades previas al uso y combate del fuego .....	15
2.1.6 Incendio forestal.....	16
2.1.7 Peligro de incendio forestal .....	16
2.1.8 Riesgo de incendio forestal .....	16
2.1.9 Propagación de los incendios forestales .....	17

2.1.10	Combustibles forestales .....	18
2.1.11	Tiempo de retardo de los combustibles forestales .....	18
2.1.12	Características de los combustibles forestales.....	19
2.1.13	Método de intersecciones planares .....	20
2.1.14	Modelos de combustibles forestales .....	20
2.2	Marco de referencia.....	20
2.2.1	Evaluación de combustibles forestales .....	21
2.2.2	Inventarios de combustibles forestales en México .....	22
2.3	Literatura citada.....	24
3.	ESTIMACION DE CARGAS Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN TEXOCUIXPAN, PUEBLA .....	30
3.1	Resumen .....	30
3.2	Abstract .....	31
3.3	Introducción.....	32
3.4	Materiales y métodos.....	34
3.4.1	Área de estudio.....	34
3.4.2	Contenido de Humedad .....	36
3.4.3	Relación superficie/volumen .....	37
3.4.4	Estimación de cargas de combustibles leñosos .....	39
3.4.5	Análisis estadístico.....	43
3.5	Resultados y discusión .....	44
3.5.1	Contenido de humedad .....	44
3.5.2	Relación superficie/volumen .....	47
3.5.3	Cargas de combustibles.....	48
3.6	Conclusiones .....	52
3.7	Agradecimientos.....	52
3.8	Literatura citada.....	53
4.	EVALUACIÓN DE CARGAS COMBUSTIBLES BAJO DIFERENTES	

TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS .....	55
4.1    Resumen .....	55
4.2    Abstract .....	56
4.3    Introducción .....	57
4.4    Materiales y métodos.....	58
4.4.1  Área de estudio.....	58
4.5    Estimación de cargas de combustibles forestales.....	60
4.5.1  Combustibles superficiales.....	60
4.5.2  Combustibles aéreos .....	68
4.5.3  Mapeo de combustibles forestales .....	69
4.6    Resultados y discusión .....	73
4.6.1  Combustibles superficiales.....	75
4.6.2  Combustibles aéreos .....	84
4.6.3  Mapeo de combustibles forestales .....	86
4.6.4  Recomendación de los sitios deberán ser intervenidos.....	93
4.7    Conclusiones .....	94
4.8    Agradecimientos.....	95
4.9    Literatura citada.....	96
5.    ANEXOS .....	99
Anexo 1. Cuadro resumen del muestreo llevado a cabo en el Ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.....	99
Anexo 2. Fórmulas básicas .....	103
Anexo 3. Transformación lineal de algunas funciones no lineales.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del documento de titulación .....	7
Figura 2. Incendios forestales en México .....	21
Figura 3. Superficie afectada en la cañada de Texocuixpan, Ixtamaxtitlan, Puebla. .....	34
Figura 4. Localización de Texocuixpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla. ....	35
Figura 5. Restauración exitosa en la cañada de Texocuixpan, Puebla. ....	36
Figura 6. Equipo empleado para la medición de variables meteorológicas y para la determinación del contenido de humedad de los combustibles leñosos.. .....	37
Figura 7. Muestras de cobertura de copas de los sitios en condición: a) bajo sombra y b) expuestos. ....	38
Figura 8. Diseño de muestreo.....	40
Figura 9. Variación promedio del contenido de humedad de los combustibles de 1 h de TR a lo largo del día durante los meses de enero, febrero y marzo. .....	44
Figura 10. Variación promedio del contenido de humedad de los combustibles de 10 h de TR a lo largo del día durante los meses de enero, febrero y marzo. .....	45
Figura 11. Humedad y temperatura de sitios expuestos en diferentes horas del día. ....	46
Figura 12. Humedad y temperatura de sitios bajo sombra en diferentes horas del día. ....	46
Figura 13. Carga de combustibles por fecha de toma de los datos, promediando por sitio.....	51
Figura 14. Carga de combustibles por sitio, promediando por toma. ....	51
Figura 15. Carga de combustibles por condición (ladera húmeda y ladera seca) a través de las fechas de toma .....	51

Figura 16. Localización del Ejido V. Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. ....	58
Figura 17. Uso del suelo y vegetación en el Ejido Viborillas Ojo de Agua con base en reclasificación supervisada por el método el vecino más cercano. ....	59
Figura 18. Diseño de muestreo.....	61
Figura 19. Tratamientos silvícolas. ....	73
Figura 20. Diagramas de dispersión de altura y diámetro de los diferentes tratamientos silvícolas. ....	74
Figura 21. Diagramas de dispersión de la carga con atributos dendrométricos del arbolado. ....	76
Figura 22. Relación de la carga calculada con el método de Van Wagner con la suma del diámetro normal por hectárea.....	77
Figura 23. Gráficos de cajas de la carga con respecto a transecto, altitud, exposición y pendiente. ....	79
Figura 24. Gráficos de cajas del contenido de humedad, peso húmedo y peso seco de (a) la hojarasca y (b) la capa de fermentación.....	80
Figura 25. Gráfico de cajas de la hojarasca y capa de fermentación. ....	81
Figura 26. Diagramas de dispersión de la hojarasca y la capa de fermentación con respecto a atributos dendrométricos medidos y calculados. ....	82
Figura 27. Diagrama de dispersión de la hojarasca y la capa de fermentación con la densidad de árboles.....	83
Figura 28. Densidad de los atributos dendrométricos medidos y calculados. ...	84
Figura 29. Relación entre el volumen total con la biomasa total .....	85
Figura 30. Mapa de combustibles leñosos en el Ejido Viborillas Ojo de Agua...88	88
Figura 31. Mapa de volumen total en el Ejido Viborillas Ojo de Agua. ....	90
Figura 32. Mapa de biomasa total en el en el Ejido Viborillas Ojo de Agua.....	92
Figura 33. Relación entre el número de árboles por hectárea y el diámetro cuadrático medio con tendencia central de tipo exponencial y su comparativa con la línea de Reineke. ....	93

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Colindancias del área afectada por el incendio. ....	35
Cuadro 2. Ecuaciones para estimar la carga de combustibles forestales (Brown, 1974). ....	41
Cuadro 3. Factores de corrección por pendiente para las líneas de muestreo de combustibles leñosos (Brown, 1974). ....	42
Cuadro 4. Relación superficie/volumen de las probetas de 1h y 10h de TR ....	47
Cuadro 5. Frecuencia de materiales intersectados en sitio fijo ladera noroeste. ....	48
Cuadro 6. Diámetro cuadrático promedio de materiales intersectados en sitio fijo ladera noroeste. ....	48
Cuadro 7. Cargas de materiales intersectados en sitio fijo ladera noreste. ....	49
Cuadro 8. Frecuencia de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste. ....	49
Cuadro 9. Diámetro cuadrático promedio de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste. ....	49
Cuadro 10. Cargas de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste. ...	50
Cuadro 11. P-valores de las comparaciones de medias de las cargas por condición. ....	50
Cuadro 12. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles superficiales (Rodríguez, 2015). ....	62
Cuadro 13. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles subterráneos (Rodríguez, 2015). ....	63
Cuadro 14. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles aéreos (Rodríguez, 2015). ....	63
Cuadro 15. Ecuaciones para estimar la carga de combustibles forestales (Brown, 1974). ....	65
Cuadro 16. Factores de corrección por pendiente para las líneas de muestreo de	

combustibles leñosos (Brown, 1974). .....	66
Cuadro 17. Especificaciones técnicas de las imágenes satelitales Sentinel 2A. .....	70
Cuadro 18. Modelos probados para cartografiar los combustibles. ....	71
Cuadro 19. Análisis de varianza del modelo .....	78
Cuadro 20. Estimaciones, significancia e intervalos de confianza de los parámetros del modelo .....	78
Cuadro 21. Resumen de la hojarasca y capa de fermentación. ....	81

## **DEDICATORIAS**

El presente trabajo lo dedico con todo mi amor y cariño a todos mis seres queridos.

En especial a mi compañero de vida: Antonio Fidel Santos Hernández, la persona más leal que he conocido. Gracias por todo el tiempo compartido, gracias por cuidar de mí y enseñarme que todos los obstáculos se pueden superar... Te amo infinitamente.

A todos mis amigos y compañeros que me acompañaron durante esta etapa de mi vida.

A Keyla, donde quiera que estés, en mi memoria siempre estarán los buenos momentos que compartimos. Fuiste más que una amiga, eras parte de nuestra familia. Te extrañaré.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a las siguientes instituciones y personas que hicieron posible la realización de este trabajo:

Al pueblo de México que por medio de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por apoyarme económicamente para la realización de mis estudios de Maestría en Ciencias.

A la Universidad Autónoma Chapingo, en particular a la División de Ciencias Forestales, por ser un ente precursor en la formación de profesionales del sector agronómico, pero sobre todo por ser pionero en el ámbito forestal y por tener un sinfín de los mejores profesores-investigadores de México, además por haberme brindado la oportunidad de cursar mis estudios de licenciatura y maestría.

Al comité asesor que dirigió la realización de este estudio, integrado por los siguientes profesores: Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, Dr. Antonio Villanueva Morales y Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas.

A las familias Márquez Hernández y Santos Hernández, por el apoyo que se requirió la toma de datos del presente trabajo.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **Datos personales:**

Nombre: Claudia Ivette Ortega Vargas.

Fecha de nacimiento: 23 de agosto de 1994.

Lugar de nacimiento: San Pedro Chiautzingo,

Tepetlaoxtoc, Edo. de México.

CURP: OEVC940823MMCRRRL00.

Profesión: Ingeniero Forestal.

Cedula profesional: 11945041.



### **Desarrollo académico:**

Bachillerato: Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniero Forestal de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

Posgrados: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

## RESUMEN GENERAL

### EVALUACIÓN DE CARGAS COMBUSTIBLES BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS<sup>1</sup>

Los incendios forestales son determinantes en la composición y estructura de los ecosistemas. Una forma efectiva de controlar sus efectos es el manejo y cuantificación de la carga de combustibles. El objetivo de la presente tesis fue determinar la humedad y carga de combustibles en bosques templados de *Pinus patula*. En la fase de toma de datos se eligió la zona de Texocuixpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla. Sin embargo, la pandemia sanitaria COVID-19 impidió continuar las actividades de muestreo debido a que se restringió el acceso a dicha comunidad. Por lo que, se eligió una segunda zona ubicada en el Ejido de Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. En la localidad de Texocuixpan se trabajó con la variación en la humedad de los combustibles a lo largo del día y se correlacionó con las condiciones ambientales durante los meses de enero, febrero y marzo. Mientras que en el Ejido de Viborillas Ojo de Agua se llevó a cabo la estimación de cargas de combustibles forestales bajo diferentes tratamientos silvícolas, mediante la técnica de intersecciones planares. Posteriormente se llevó a cabo una correlación entre las cargas y la densidad del arbolado de los rodales muestreados, finalmente se proyectó su distribución espacial al correlacionar las cargas con bandas satelitales Sentinel 2A. En Texocuixpan las cargas se notaron variables y en orden ascendente en cada mes transcurrido y no mostraron diferencias significativas entre sitios ubicados en ladera seca ( $6.375 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) con respecto a la húmeda ( $7.105 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). En Viborillas Ojo de Agua la carga promedio de combustible leñoso fue  $5.16 \text{ Mg ha}^{-1}$ , la variación correspondió con el tratamiento silvícola empleado, por ejemplo, en sitios de reforestación la carga fue baja ( $1.408 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mientras que en sitios con arbolado maduro la carga fue alta ( $13.101 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). En promedio, la carga de la hojarasca fue de  $5.383 \text{ Mg ha}^{-1}$ , la de la capa de fermentación de  $11.26 \text{ Mg ha}^{-1}$  y la de combustibles vivos (biomasa) fue de  $176.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Los mapas generados que mejor pueden representar las cargas son los del volumen y la biomasa, debido a que los combustibles leñosos fueron mayormente variables. Las evaluaciones de los combustibles pueden contribuir en la planificación de un buen manejo del fuego.

**Palabras clave:** ecología del fuego, intercepciones planares, manejo integral del fuego, vulnerabilidad.

---

<sup>1</sup> Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.  
Autor: Claudia Ivette Ortega-Vargas  
Director: Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

## ABSTRACT

### ASSESSMENT OF FUEL LOADS UNDER DIFFERENT SILVICULTURAL TREATMENTS IN MEXICO

Forest fires are decisive in ecosystem composition and structure. An effective way to control its effects is management and quantification of forest fuel loads. The aim of this Master of Science thesis was to determine fuel moisture and forest loads in temperate *Pinus patula* forests. In the data collection phase, the forest of Texocuixpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla was chosen. However, the COVID-19 health pandemic prevented sampling activities from continuing because access to the community was restricted. Therefore, a second place was chosen located in the forest of Ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. In Texocuixpan, we worked with the variation in fuels moisture throughout the day and it was correlated with environmental conditions during the months of January, February and March. While in Ejido Viborillas Ojo de Agua, the estimation of forest fuel loads was carried out under different silvicultural treatments, using the flat intersections technique. Subsequently, a correlation between the loads and the tree density was carried out; finally, their spatial distribution was projected by correlating the loads with Sentinel 2A satellite bands. Both study areas carry out different fuel loads values. In Texocuixpan, the loads were some variable and in ascending order in each elapsed month and they did not show significant differences between sites located on the dry hillside ( $6.375 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) with respect to the humid one ( $7.105 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). In Ejido Viborillas Ojo de Agua the average load was  $5.16 \text{ Mg ha}^{-1}$  but the variation corresponded to the silvicultural treatment used, for example, in reforestation sites the load was low ( $1.408 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) while in sites with mature or old trees the load was high ( $13.101 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). On average, the litter load was  $5.627 \text{ Mg ha}^{-1}$ , the fermentation layer load was  $11.854 \text{ Mg ha}^{-1}$  and the live fuel load (biomass) was  $400.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ . The maps generated can best represent the loads are those of volume and biomass, since the woody fuels were mostly variable. The fuel evaluations that were carried out can contribute to planning for good fire management.

**Key words:** fire ecology, integral fire management, planar interceptions, vulnerability,

# 1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1 Antecedentes

En México, bosques y selvas son constantemente afectados por numerosos incendios forestales. En algunos casos, estos provocan pérdidas de recursos naturales de gran valor ecológico y económico (Xelhuantzi, Flores y Chávez, 2011). Estos incendios ocurren regularmente cuando existe una prolongada época de sequía, suficiente material combustible y cuando la cubierta vegetal tiene la continuidad necesaria para que el fuego se propague. Por lo tanto, en áreas donde los combustibles se producen, acumulan y transcurren largos periodos de tiempo sin la presencia del fuego, el riesgo de un incendio de alta intensidad es más probable (Flores, Alfonso y Aguirre, 2007). La cantidad y disposición de los combustibles muertos juegan un papel importante debido a que generalmente determinan la facilidad de iniciar y propagar el fuego (Villers, 2006), como ha ocurrido en diversos ecosistemas.

El rol ecológico del fuego en los ecosistemas, ha sido ensombrecido por los enormes desastres que ha provocado su uso inadecuado (Castillo, Pedernera, y Peña, 2003). En el siglo XX, el fuego se percibió como una amenaza a la gente y a los recursos naturales, muchos países desarrollaron programas sofisticados de prevención de incendios y crearon organizaciones para la supresión de los mismos, el resultado fue una vegetación cambiada que proveyó combustible a incendios más intensos en años excepcionalmente secos (Myers, 2006). De aquí que suprimir el fuego sin tener conocimiento de su relación con los ecosistemas no ha sido la opción adecuada, surge entonces el manejo del fuego como componente del manejo de ecosistemas (Jardel, 2010). La protección contra los incendios forestales se ha convertido en una de las actividades más importantes para los países que poseen recursos forestales (Flores, Rodríguez, Meléndez, y Rosas, 2008).

Según datos del reporte semanal nacional de incendios forestales de la CONAFOR (2021), de enero a mayo 2021 se han registrado 5,261 incendios forestales en 32 entidades federativas, afectando una superficie de 286,437

hectáreas, De esta superficie, el 93% correspondió a vegetación en los estratos herbáceo y arbustivo y el 7% a arbóreo. Las entidades federativas con mayor número de incendios fueron: México, Ciudad de México, Michoacán, Chihuahua, Puebla, Tlaxcala, Chiapas, Jalisco, Morelos y Durango, que representan el 84% del total nacional. Las entidades federativas con mayor superficie afectada fueron: Guerrero, Nuevo León, Chihuahua, Chiapas, Oaxaca, Durango, Michoacán, México, Nayarit y Jalisco, que representan el 78% del total nacional. Del total de incendios forestales, 539 (10%) correspondió a ecosistemas sensibles al fuego, afectando una superficie de 33,790 hectáreas (12%) del total nacional. Lo anterior se atribuyó a las altas temperaturas ambientales causadas por el cambio climático y a la acumulación excesiva de material vegetativo.

Si bien la existencia de fuego puede cambiar el ecosistema, este puede manifestarse como efectos negativos y positivos, que dependen principalmente de su comportamiento, y se verá afectado por factores como el clima, la topografía y la vegetación.

Los incendios forestales no sólo afectan los hábitats para la fauna y flora, sino que también elimina la cubierta protectora vegetal, alterándose los ciclos hidrológicos y modificándose las características edáficas y con ello la disminución de la productividad de los suelos, asociados a procesos severos de erosión. A nivel económico, los incendios son responsables de graves pérdidas coligadas a la afectación de especies maderables y alteraciones a nivel climático local. El humo de los grandes incendios tiene efectos temporales sobre la formación de nubes de lluvia dificultando su formación (Nepstad *et al.*, 2001), además de afectaciones a la salud por las elevadas concentraciones de material en suspensión. Aquellos incendios que se producen en zonas de interface entre áreas residenciales y bosques, conllevan, además, pérdidas de bienes materiales, cosechas, y en casos extremos vidas humanas.

Con este panorama, resulta importante desarrollar procesos que permitan la estimación de la distribución espacial y la cantidad de los combustibles forestales, ya que llegado el momento se podrán tomar decisiones importantes a partir de

información precisa (Flores, 2007).

Conocer la carga, calidad y distribución de los combustibles es esencial para la planificación de estrategias relacionadas con la prevención de incendios debido a que además de ser el único elemento que el hombre puede controlar (Mota, 2005), permite mejorar la toma de decisiones para establecer programas relacionados con el manejo integral del fuego (quemadas prescritas, regeneración natural de las plantas, programas preventivos y de combate directo de incendios), lo que lleva a evitar posibles pérdidas de vidas humanas (Villers, 2006).

Actualmente, existe poca información sobre la relación que existe entre la variación de temperatura y humedad de los combustibles forestales y la temperatura y humedad relativa del ambiente en diferentes condiciones y ecosistemas. Con base en esto, durante los meses de enero, febrero y marzo de 2020 se llevaron a cabo actividades de campo encaminadas a la realización de una evaluación de estas variaciones en sitios de muestreo que se ubicaron en la comunidad de Texocuixpan, Ixtacamaxtitlán, Puebla; para ello se utilizaron probetas de *Pinus patula* y el apoyo de un estuche meteorológico para monitorear estas variaciones cada hora a lo largo del día. La importancia de realizar el estudio en esta zona se debió a que, en mayo de 1998, consecuencia del fenómeno del niño (Rodríguez y Fulé, 2003), se propició un incendio catastrófico de copas que cubrió 400 ha, provocando la muerte de 19 combatientes voluntarios de la localidad y que tuvo grandes pérdidas económicas, ecológicas y humanas. Hasta el momento no se ha originado otro incendio de igual magnitud, sin embargo, es necesario seguir estudiando la zona debido a que en la actualidad cuenta con una gran acumulación de combustible y que, sumado a las altas temperaturas causadas por el cambio climático se pueda dar origen a otro siniestro.

El 2020 se vio afectado por la situación de emergencia sanitaria, lo que impidió la culminación del estudio en Texocuixpan, Puebla, por lo que la segunda parte del estudio se reubicó en la comunidad de Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz en donde se realizó la evaluación de cargas de combustibles forestales en

diferentes rodales bajo diferentes tratamientos silvícolas.

Para esta segunda parte del estudio se utilizó la metodología de intersecciones planares descrita por Brown (1974) y se aplicaron las fórmulas de Van Wagner (1982). Lo anterior nos permitió conocer el efecto que tienen los diferentes tratamientos silvícolas sobre la cantidad de cargas de combustibles forestales.

## **1.2 Justificación**

La información de la distribución espacial de las cargas de combustibles forestales y la relación de la humedad de los combustibles con la del medio ambiente, proporciona elementos para realizar actividades de prevención de incendios forestales.

## **1.3 Planteamiento del problema de investigación**

En su condición natural renovable, el bosque dispone de mecanismos para regenerarse y continuar previendo sus servicios a la sociedad mediante la satisfacción de sus demandas en productos, protección ambiental y recreo (Rojo, 1998). Sin embargo, debido al cambio climático los incendios forestales han ido en aumento y, con ello, sus efectos ambientales (Rodríguez, 2015). Además, la exclusión del fuego en diversas regiones ha provocado la acumulación de material vegetativo lo que resulta una desventaja ya que aumenta el riesgo de incendios más intensos y severos (Rodríguez, 2012).

Como parte de la prevención de incendios, es necesario conocer los elementos básicos que son necesarios para que se propicie un incendio, estos elementos son: el material combustible, calor y oxígeno, sin alguno de ellos, el fuego no existiría (Rodríguez, 1996). De estos tres elementos, el combustible forestal juega un papel muy importante debido a que es el único componente que puede ser alterado directamente por el hombre (Mota, 2015), además de que influye en el comportamiento del fuego (Martínez *et al.*, 2018).

Para conocer todo lo relacionado con el manejo de los combustibles forestales es necesario realizar estudios para evaluar sus características y determinar los

efectos que el fuego podría ocasionar en un área dada.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar la variación del contenido de humedad de combustibles forestales de 1 y 10 h de tiempo de retardo mediante mediciones continuas en Texocuijpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla, para asociarlo a temperatura y humedad relativa.

Evaluar la carga del combustible forestal en Ojo de agua, Huayacocotla, Veracruz para aproximar la distribución espacial.

### **1.4.2 Objetivos particulares**

#### **Texocuijpan, Puebla**

- a) Evaluar el contenido de humedad de combustibles de 1 y 10 h de tiempo de retardo mediante mediciones continuas a lo largo del día, de enero a marzo de 2020, en Texocuijpan, Ixtacamaxtitlán, Puebla.
- b) Evaluar la carga de combustible leñoso mediante su muestreo con sitios fijos para identificar la variación en los meses previos a la temporada de incendios (enero-marzo).

#### **Huayacocotla, Veracruz**

- c) Evaluar la carga del combustible forestal mediante la técnica de intercepciones planares en Ojo de agua, Huayacocotla, Veracruz.
- d) Correlacionar variables dendrométricas con las cargas de combustibles forestales.
- e) Obtener un mapa que represente la distribución espacial de las cargas y la biomasa total de arbolado con el procesamiento de bandas satelitales y álgebra de mapas.

## **1.5 Hipótesis**

### **Texocuixpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla.**

El estatus de protección que presenta la cañada de Texocuixpan, Puebla, desde hace aproximadamente 20 años, ha permitido que se genere una mayor acumulación de combustibles aunado a que la variación de la humedad de estos proporciona condiciones necesarias para dar origen a un nuevo incendio catastrófico.

### **Viborillas Ojo de agua, Huayacocotla, Veracruz.**

Las intervenciones silvícolas (aclareos, podas, cortas de regeneración y cortas de liberación) incrementan la carga de combustibles superficiales, a menos que también se haga manejo de combustibles forestales.

Será posible representar en el espacio las cargas de combustibles forestales tras su modelado por regresión lineal.

## **1.6 Preguntas de investigación**

¿El arbolado adulto de las zonas de estudio presentan continuidad vertical?

De acuerdo a las condiciones de la distribución de los combustibles ¿Aumenta la probabilidad de incendios de copas?

¿La carga y contenido de humedad de los combustibles están altamente influenciadas por la temperatura y humedad del ambiente?

## 1.7 Estructura del documento

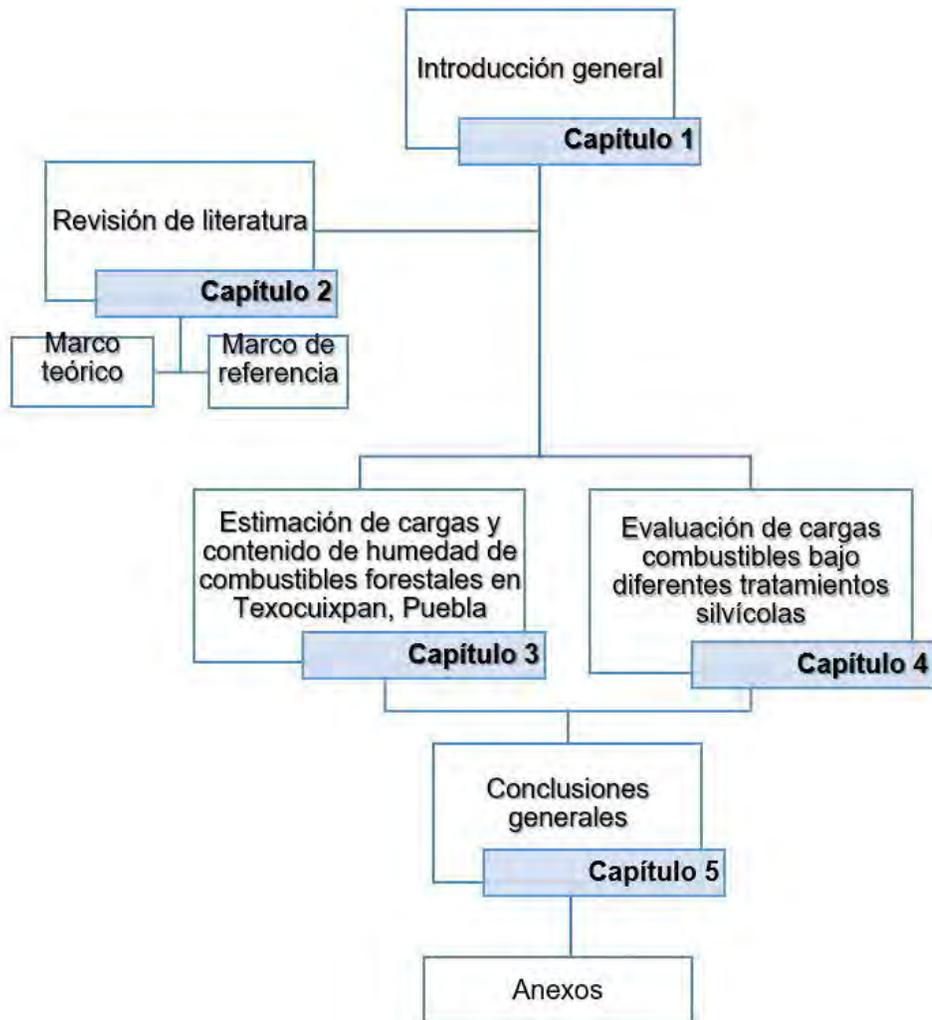


Figura 1. Estructura del documento de titulación

## 1.8 Contenido capitular

El presente documento está integrado por 5 capítulos. El primer capítulo entra en un contexto de introducción en el que contiene antecedentes, justificación, planteamiento del problema de investigación, objetivos, hipótesis y un diagrama de la estructura del presente documento. El segundo capítulo contiene la revisión de literatura que lo divide en dos partes 1) Marco teórico y 2) Marco de referencia. El capítulo 3 y 4 contiene 2 propuestas de artículos, derivados de la investigación que se llevó a cabo durante el programa de posgrado de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales.

## 1.9 Literatura citada

Brown, J. K. (1974). Handbook for Inventorying Downed Woody Material. General Technical Report INT-16. USDA Forest Service. Ogden, Utah.

Castillo, M., Pedernera, P., y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA, XIX(1), 44–53. <http://doi.org/10.1002/hyp.9647>

CONAFOR (2021). Reporte semanal nacional de incendios forestales. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/637538/Reporte\\_del\\_01\\_de\\_enero\\_al\\_13\\_de\\_mayo\\_de\\_2021..pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/637538/Reporte_del_01_de_enero_al_13_de_mayo_de_2021..pdf)

DeBano, L. F. and E. C. Conrad. (1978). The effect of fire on nutrients in a chaparral ecosystem. Ecology 59 (3): 489-497.

Flores Garnica, J. G., Rodríguez Chávez, O. G., Meléndez Gómez, M., y Rosas Aceves, O. G. (2008). Sitios de muestreo para monitoreo de combustibles forestales (SIMMCOF). Guadalajara, Jalisco, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Flores, G., J. G. (2007). Plan de protección contra incendios forestales en el estado de Chiapas, basado en la ubicación de áreas de mayor riesgo.

Flores, G., J. G. Alfonso M, Aguirre C. (2007). Monitoreo de Ecosistemas con estrategias de geoestadísticas, una aplicación de gran escala en Jalisco México. Madera y Bosques, vol. 13 num 002, pp. 97-104.

Jardel Peláez, E. J. (2010). Planificación del Manejo del Fuego. Autlán, Jalisco, México.

Mota, N. M. (2005). Modelagem de combustíveis florestais no Parque Nacional do Iguacu, Paraná, Brasil. Floresta Curitiba. 36: 3. Recuperado de: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/7520> DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v36i3.7520>

Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego: Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego. The Nature Conservancy, 28.

Nepstad, D., G. Carvalho, A.C Barros, A. Alencar, J.P. Capobianco, J. Bishop, P. Moutinho, P. Lefebvre, U. Lopes da Silva, Jr. (2001). Road paving, fire regime feedbacks and the future of Amazon forests. For. Ecol. Manage. 154:395-407.

Villers R., M. (2006). Incendios forestales. Ciencias. 81: 60-66.

Xelhuantzi C., J., Flores G., J. G., y Chávez D., Álvaro A. (2011). Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. Revista mexicana de ciencias forestales, 2(3), 37-52. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322011000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000100004&lng=es&tlng=es).

Rojo M., G. E. 1998. Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal para bosques de clima templado de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo.

Rodriguez-Trejo, D. A. 2012 Génesis de los incendios forestales. Rev. Chapingo ser. cienc. for. ambient, Chapingo , v. 18, n. 3, p. 357-373. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-40182012000300008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182012000300008&lng=es&nrm=iso) DOI: 10.5154/r.rchscfa.2011.12.091.

## **2. CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA**

Este capítulo está estructurado en dos partes, la primera se refiere al marco teórico, en él se presentan los conceptos más importantes referentes al presente trabajo. Mientras que la segunda parte engloba el marco de referencia en el que se incluyen trabajos que se han hecho sobre las cargas y contenido de humedad de los combustibles y la cantidad de incendios ocurridos en los últimos años.

### **2.1 Marco teórico**

#### **2.1.1 Fuego**

El fuego es un proceso físico-químico que ha jugado un papel importante en la formación de nuestro ambiente y el mantenimiento de la biodiversidad en todo el mundo. Los beneficios e impactos del fuego son amplios; a menudo determina la distribución de los hábitats, el flujo de carbono y los nutrientes y las propiedades de retención del agua de los suelos. En hábitats adaptados al fuego y dependientes del mismo, la exclusión del fuego con frecuencia resulta en una reducción de la biodiversidad y un aumento en la densidad de la vegetación, aumentando el peligro de un incendio catastrófico con el correr del tiempo (TNC, 2007).

Para que el fuego se produzca se requiere de tres elementos que forman el llamado “triángulo del fuego”: combustible, calor y oxígeno; si uno de ellos falta, el fuego no se produce (Rodríguez, 1996).

#### **2.1.2 Función ecológica del fuego**

Hardesty, Myers y Fulks (2005) señala que los ecosistemas pueden ser catalogados en cuatro categorías según su relación con el fuego, a continuación, se presenta cada una de estas con su respectiva descripción:

#### **Ecosistemas dependientes del fuego**

Son aquellos en que el fuego es un factor fundamental para el mantenimiento de la composición, estructura y funcionalidad del ecosistema. Asimismo, son caracterizados como ecosistemas adaptados o mantenidos por el fuego.

(sabanas, bosques templados de coníferas). Además, otra característica es que las especies han desarrollado adaptaciones que les permiten afrontar el fuego, e incluso la selección natural podría haber favorecido a las especies más propensas a quemarse (Mutch, 1970). Las alteraciones en los regímenes de fuego (supresión, aumento o disminución fuera de los rangos naturales) generan profundos efectos en estos ecosistemas, perdiéndose hábitats y especies (Shlisky *et al.*, 2007).

México cuenta con una gran cantidad de estos ecosistemas. Por ejemplo, los pinares (Rodríguez y Fulé, 2003) y los encinares (Rodríguez y Myers, 2010); y en ambos géneros México es el país más rico del mundo en número de especies. Otros ejemplos se tienen al noroeste, donde hay matorrales adaptados por incendios relativamente poco frecuentes (con períodos entre 30 y 100 años). Incluyen géneros como *Arctostaphylos*, *Ceanothus*, *Pinus*, *Quercus* y *Garrya*, entre muchos otros. En el particular caso de los encinos arbustivos en México central, destacan *Q. frutex*, *Q. microphylla*, y *Q. repanda* (González *et al.*, 2012).

### **Ecosistemas independientes del fuego**

Este tipo de ecosistemas son caracterizados por presentar condiciones extremas que evaden los fenómenos de fuego. Estos ecosistemas llegan a ser demasiado húmedos, fríos o secos para quemarse. Los incendios sólo se vuelven un problema cuando han sufrido grandes alteraciones en el ecosistema, concernientes con el cambio de uso de suelos, invasión de especies exóticas o cambios climáticos. Fundamentalmente se encuentran conformados por zonas donde el material combustible o las fuentes de ignición son muy bajas o nulas, como desiertos, zonas montañosas y regiones polares y semi-polares (Shlisky *et al.*, 2007).

### **Ecosistemas sensibles al fuego**

En estos ecosistemas no se requiere del fuego para mantener el tipo de vegetación, es decir, sus especies no están adaptadas al fuego por que no se desarrollaron con el fuego como un proceso recurrente. Lo anterior se atribuye

por tratarse de incendios ocasionales que se presentan en largos periodos de tiempo cuando hay sequía extrema, pero resultan ser catastróficos. Para la recuperación de la vegetación original, ha de transcurrir la sucesión ecológica durante siglos (CONAFOR, 2020)

En esta categoría se encuentran incluidos los bosques tropicales perennifolios o subperennifolios (que incluyen selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias), bosque tropical caducifolio (selva baja caducifolia), manglares, bosques de oyamel y posiblemente varios bosques de encino (CONAFOR, 2020).

### **Ecosistemas influidos por el fuego**

Hardesty, Myers y Fulks (2005), además, incluyen esta última categoría que engloba tipos de vegetación que se encuentran repetidamente en la zona de transición entre los ecosistemas dependientes del fuego y los ecosistemas sensibles al fuego o independientes al fuego. De manera general, éstos son ecosistemas sensibles al fuego, pero contienen algunas especies que pueden responder de manera positiva a las perturbaciones del fuego, o ecosistemas que podrían perdurar sin la presencia del fuego, pero en los cuales las perturbaciones del fuego juegan un papel en la creación de ciertos hábitats, favoreciendo la abundancia relativa de ciertas especies y manteniendo la biodiversidad (Myers, 2006).

En estos ecosistemas, los incendios generalmente se originan en la vegetación adyacente dependiente del fuego (Myers, 2006).

#### **2.1.3 Efectos del fuego en los bosques**

En el caso de los bosques de clima templado y frío, los incendios dañan la regeneración de la vegetación, debilitan al arbolado adulto, lo hacen susceptible al ataque de plagas y enfermedades y reducen el valor económico de los productos forestales (CONAFOR, 2020).

Flores y Benavides (1992) mencionan que las quemadas prescritas pueden favorecer el establecimiento de la regeneración. En sitios abiertos el fuego

favorece el control de la vegetación que puede competir con la regeneración

Los efectos inmediatos del fuego en un árbol se relacionan con un gradiente de temperatura que, dependiendo de la distancia del tejido de que se trate, la fuente de calor (por ejemplo, altura de la copa de un latizal) y la intensidad del fuego (por ejemplo, superficial) pueden implicar temperaturas desde someramente elevadas en algunas hojas altas, sin efectos directos adversos, hasta la combustión completa de las hojas en las ramas bajas. La intensidad del fuego es muy variable, desde  $<12$  kCal/m/s en incendios superficiales de baja intensidad, hasta  $>12\ 000$  kCal/m/s en incendios de copa (Agee, 1993; Rodríguez, 2009). La longitud de la llama puede ser desde unos 10 cm. En incendios de pastizal bajo muy poco intensos, hasta más de 20 m en incendios de copa. Las temperaturas pueden alcanzar entre unos 300 °C hasta más de 1200 °C (Rodríguez, 2009).

La tolerancia al calor, tolerancia al fuego y resistencia al fuego son conceptos diferentes; el primer término hace referencia a la capacidad de los tejidos vegetales para tolerar altas temperaturas, el segundo término se aplica cuando la planta pierde su parte aérea al fuego, pero se recupera rebrotando y el último término se define como la capacidad de la vegetación para sobrevivir al paso del fuego. La tolerancia del protoplasma al calor parece ser similar en la mayoría de las plantas (DeBano *et al.*, 1998; Rodríguez, 2009). Aunque variable, se ha establecido que la temperatura letal para la mayoría de los tejidos vegetales es de 60 °C desde dos a 60 min, dependiendo del contenido de humedad (Rodríguez, 2009). Otros factores son el tiempo de permanencia de la temperatura y el estado metabólico del tejido (Whelan, 1995; Rodríguez, 2009). Las yemas tienden a ser mucho más sensibles al calor cuando están en crecimiento activo que cuando no lo están (Rodríguez, 2009). Los tejidos que típicamente tienen mayor contenido de humedad, se mueren a menores temperaturas y en menores tiempos (DeBano *et al.*, 1998; Rodríguez, 2009).

La resistencia al fuego varía, según el tipo de adaptaciones, las reservas alimenticias y el régimen del fuego a que la planta está sometida. Acorde con Martínez (2013), la concentración de compuestos que varían estacionalmente,

así como las sales, azúcares y ligninas, también pueden estar relacionadas con la tolerancia de las plantas al calor. El nivel de carbohidratos al momento del incendio, ha sido considerado como un factor relevante que determina la capacidad de respuesta del árbol.

Las especies leñosas mueren porque no pueden adquirir o movilizar suficientes recursos para mantener una función normal, a cierto nivel de daño y estrés (Waring, 1987; Rodríguez, 2009). La necrosis en follaje, ramas y yemas deriva en reducidas tasas de fijación de carbono, elevando la posibilidad de muerte, mientras que la necrosis de la raíz afecta la absorción de agua y nutrientes y la necrosis en floema y cambium vascular implica imposibilidad de procesos de transporte (Dickinson y Johnson, 2001; Rodríguez, 2009). Los árboles exhiben diferentes tejidos de defensa ante el fuego, como la corteza, las escamas de las yemas, la masa de hojas en el saco de especies cespitosas y la cubierta seminal dura y aislante en las semillas de diversas especies. A sí mismo el suelo mineral es un excelente aislante térmico, por lo que raíces, rizomas y semillas están protegidos (Rodríguez, 2009).

#### **2.1.4 Comportamiento del fuego**

Es la forma en que avanza el fuego en cuanto a su velocidad, su intensidad, su tasa de crecimiento perimetral y de área, configuración y la altura promedio que alcanzan las llamas, así como el tipo de incendio: superficial, aéreo o subterráneo (Montoya, 2004).

El comportamiento del fuego en cualquier incendio forestal está altamente influenciado por tres factores: el complejo de combustibles existentes en el lugar del siniestro, la topografía del terreno y las características del tiempo atmosférico prevaeciente (Rodríguez *et al.*, 2002).

La velocidad de propagación de un incendio es el incremento que se nota en el perímetro del incendio en una cierta unidad de tiempo, éste aumento depende de la densidad de cubierta, de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, de la topografía del sitio donde se presente el incendio y de la clase de material

combustible (Show y Clarke, 1953).

### **2.1.5 Actividades previas al uso y combate del fuego**

Antes de presenciar un incendio existen actividades de supresión, también conocidas como previas al combate pre-extinción, estas actividades se realizan antes de la ocurrencia del incendio, su propósito radica en facilitar y hacer más eficaz y seguro su control y liquidación, una vez que éste se presente. Estas actividades requieren tener preparado un equipo de radiocomunicación, vehículos y herramientas antes de que el incendio se presente, así también se debe de tener personal capacitado y apto físicamente. Las quemas prescritas también ayudan a prevenir incendios (quema preventiva) o sirven como barreras que pueden ayudar a controlar incendios (quema pre-supresiva) (Rodríguez *et al.*, 2002).

Una organización encargada de la lucha contra incendios debe de estar preparada para hacer frente a las diversas situaciones que se puedan presentar al momento en que se produzca un incendio, esto con la finalidad de poder actuar eficaz y oportunamente (Show y Clarke, 1953).

Show y Clarke (1953) señalan que estas actividades deben incluir las siguientes fases:

- a) Instrucción y cooperación;
- b) Adquisición y mantenimiento de materiales;
- c) Medición y pronóstico del peligro de incendios;
- d) Detección;
- e) Transportes y comunicaciones;
- f) Cortafuegos y líneas de fuego.

### **2.1.6 Incendio forestal**

Un incendio forestal se define como la propagación libre del fuego sobre la vegetación forestal (Rodríguez, 1996), ya sea por causas naturales o inducidas (antrópica), con una ocurrencia y propagación no controlada o programada, lo que obliga a combatirlo (MMAyA, 2012). Un incendio forestal se produce cuando el fuego afecta a combustibles vegetales naturales, situados en el monte, cuya quema no estaba prevista, lo que obliga a intentar su extinción (Rico *et al.*, 1981). Arnaldos *et al.* (2004) mencionan que un incendio forestal es un fuego violento que se desarrolla sin control en un espacio abierto, afectando la superficie vegetal del mismo.

Los incendios forestales contribuyen a la deforestación y a la contaminación. Sin embargo, también reflejan impactos positivos en el ecosistema, tales como, frenar poblaciones de plagas, proporcionar nutrientes, regeneración (Durán *et al.*, 2008), entre otras. Además, los incendios forestales recurrentes disminuyen la probabilidad de incendios más catastróficos ya que evitan que el material combustible se acumule. Las principales causas del aumento de incendios se le atribuyen al cambio climático global y actividades antropogénicas (González, 2011).

### **2.1.7 Peligro de incendio forestal**

El peligro de incendio hace referencia a la existencia de condiciones ambientales y de los combustibles forestales, favorables para que se pueda dar el inicio y desarrollo de un incendio, tales como temperatura elevada, humedad relativa baja, sequía, vientos veloces, pastos y desechos de explotación seca, entre otros (Rodríguez, 1996).

### **2.1.8 Riesgo de incendio forestal**

El riesgo de incendio se define como la existencia de factores que pueden iniciar fuego en el monte, tales como quemas agrícolas en terrenos adyacentes a bosques, hornos de carbón, cazadores, maquinaria, fogatas y muchos otros (Rodríguez, 1996).

### **2.1.9 Propagación de los incendios forestales**

Para que se produzca un incendio forestal, se necesita la conjunción de una serie de circunstancias que favorezcan su inicio y posterior propagación (Porrero, 2001). Éstas son:

- a) Suficientes combustibles finos, vivos y muertos, con un tamaño adecuado y una distribución espacial continua.
- b) Combustibles con un contenido de humedad bajo, que acelera la velocidad de propagación.
- c) Presencia de un medio de ignición; el calor de activación necesario.

En función de la distribución del combustible, los incendios forestales pueden clasificarse en:

- a) Subterráneos: cuando el fuego se encuentra por debajo de la superficie.
- b) Superficiales: cuando el fuego se encuentra sobre la superficie.
- c) De copas: cuando el fuego se encuentra por las copas de los árboles.

Los incendios que ocurren en la superficie forestal pueden rápidamente generar incendios subterráneos y de copa, los cuales queman las gruesas acumulaciones de materia orgánica y afectan gradualmente el arbolado adulto favoreciendo la propagación del incendio. Estos pueden matar la mayor cantidad de las plantas que tienen raíces en la materia orgánica.

El desarrollo y tamaño del incendio vendrán condicionados por factores externos, como la meteorología (viento, humedad, temperatura) y topografía (pendiente), que así mismo podrán dificultar la eficacia de las tareas de extinción (Porrero, 2001).

La propagación del fuego tiene lugar desde un foco inicial, por medio de la

transmisión del calor que se emite en la combustión, a los combustibles más o menos próximos, que al calentarse pueden igualmente arder y así sucesivamente (Fernández *et al.*, 2001).

Fernández *et al.*, 2001 señalan que existen tres formas de propagación del fuego, que son:

- a) Convección;
- b) Radiación;
- c) Conducción.

#### **2.1.10 Combustibles forestales**

Un combustible forestal es toda materia de origen vegetal que puede arder.

#### **2.1.11 Tiempo de retardo de los combustibles forestales**

El tiempo de retardo se define como el tiempo que el combustible muerto tarda en perder (cuando el ambiente tiene un menor contenido de humedad que el combustible) o en ganar (cuando el ambiente tiene un mayor contenido de humedad que el combustible), dos tercios de la diferencia entre su contenido de humedad y la humedad del ambiente (Rodríguez *et al.*, 2002). Arnaldos *et al.* (2004) dicen que el tiempo de retardo de un combustible muerto es el tiempo en que el combustible tarda para alcanzar una temperatura de 26. 7 °C (80 °F) y una humedad relativa del 20%.

Conforme el combustible sea más grande más lentamente perderá o ganará humedad, tendrá un mayor tiempo de retardo (Cuadro 1). Esta es una característica propia del combustible. El tiempo de retardo se expresa en horas.

**Cuadro 1. Tiempo de retardo para combustibles forestales**

<b>Clase</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Tiempo de retardo (h)</b>
I	0 – 0.6	1
II	0.6 – 2.5	10
III	2.5 – 7.5	100
IV	Mayor a 7.5	1,000

**Fuente: Tomado de Rodríguez *et al.* (2002).**

### **2.1.12 Características de los combustibles forestales**

Porrero (2001) señala que las principales características de los combustibles que influyen en la combustibilidad son:

- a) Cantidad
- b) Tamaño y forma
- c) Compactación
- d) Continuidad horizontal
- e) Continuidad vertical
- f) Densidad de la madera
- g) Sustancia químicas
- h) Humedad del combustible

Sin embargo, estas características dependen directamente de los siguientes factores:

- a) Exposición
- b) La altitud sobre el nivel del mar
- c) La latitud
- d) El clima
- e) El suelo

- f) La edad de la vegetación (densidad y especie)
- g) Actividad y manejo anterior

### **2.1.13 Método de intersecciones planares**

La técnica de intersecciones planares es la más difundida para cuantificar los combustibles leñosos. Ideada por Van Wagner (1968) y adaptada y difundida por Brown (1974), la técnica consiste en cuantificar y clasificar el número de frecuencias de los combustibles leñosos dentro en un transecto. Dichas frecuencias se transforman en cargas a partir de modelos que consideran la frecuencia de intersecciones, el diámetro de las partículas combustibles, la gravedad específica del agua y la de la madera, la pendiente del transecto, así como el número y longitud de transectos.

### **2.1.14 Modelos de combustibles forestales**

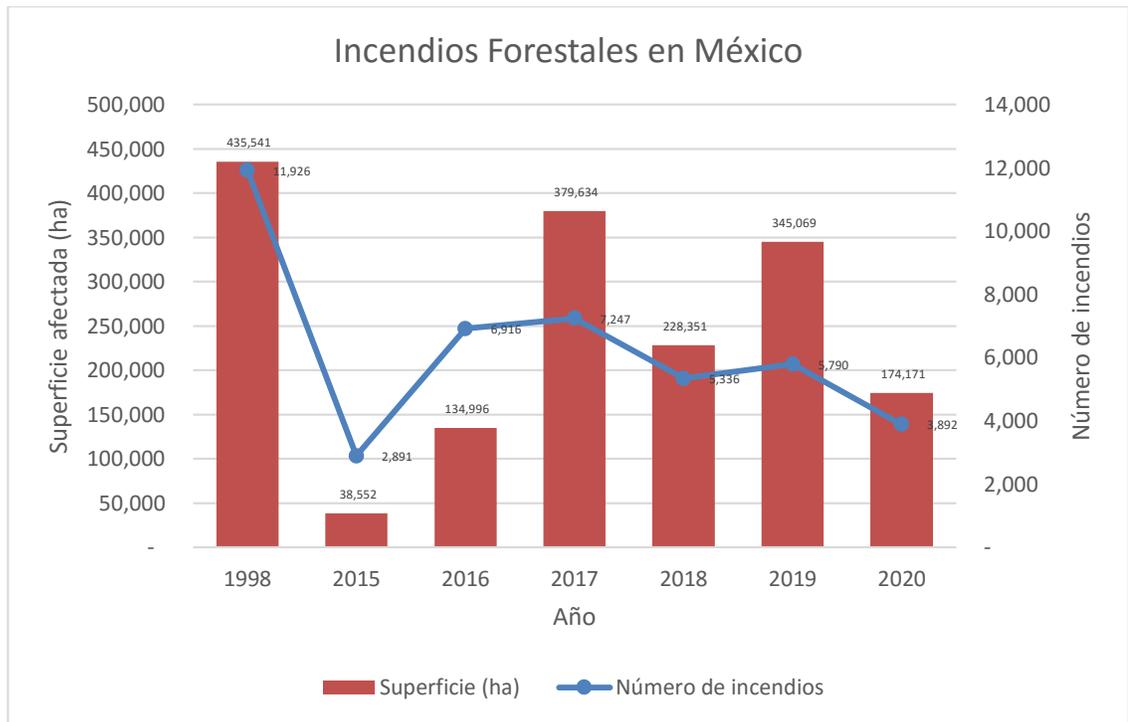
Los modelos de combustibles forestales se definen como la caracterización de los materiales combustibles en áreas representativas, en uno o más tipos de vegetación dados. El fuego tiene un comportamiento del fuego particular en cada modelo. Por ejemplo, en la hojarasca de pino o latifoliadas, el fuego se comporta de forma similar.

## **2.2 Marco de referencia**

México ha sufrido numerosos incendios. El peor año en la historia del país fue en 1998, cuando se presentó el fenómeno conocido como “El Niño”, dicho fenómeno fue crucial ya que de él se derivó la mayor incidencia de incendios, según cifras oficiales de la CONAFOR (2021). A continuación, en el Cuadro se muestra el número de incendios y la superficie afectada en en año de 1998 y de los últimos seis años

**Cuadro 1. Incendios Forestales en México**

Año	Número de incendios	Superficie (ha)
1998	11,926	435,541
2015	2,891	38,552
2016	6,916	134,996
2017	7,247	379,634
2018	5,336	228,351
2019	5,790	345,069
2020	3,892	174,171



**Figura 2. Incendios forestales en México**

### 2.2.1 Evaluación de combustibles forestales

La carga de combustible se define como el peso seco de combustible presente por unidad de superficie, generalmente se expresa en toneladas por hectárea (t/ha) (Arnaldos *et al.*, 2004).

Cuanto mayor sea la carga, el incendio arderá con mayor intensidad. La cantidad de combustible varía bastante de un tipo de vegetación a otro (Porrero, 2001). La caracterización de los combustibles es una de las bases más importantes para explicar el comportamiento del fuego (Alvarado, 1986).

Los combustibles forestales son un complejo formado de material muerto y vivo, subterráneo, superficial o aéreo (INIFAP, 2006). Los combustibles muertos son aquellos que no tienen tejido vivo y yacen en el suelo. Su contenido de humedad es gobernado casi completamente por la humedad ambiental, temperatura del aire y radiación solar. Los combustibles vivos están formados por plantas herbáceas, pastos, arbustos y regeneración del arbolado. Su característica principal como combustible es que el contenido de humedad es controlado fisiológicamente dentro de la planta (Alvarado, 1986).

El material combustible no sólo influye en la velocidad de propagación, sino en la dificultad de combatir los incendios, es decir, en la resistencia a las actividades de defensa. La cantidad de material combustible, lo mismo que su disposición y volumen, sea que se trate de material fresco o viejo, así como las especies que constituyen la materia combustible, son, en conjunto, cuestiones de importancia cuando se está adoptando disposiciones para combatir incendios (Show y Clarke, 1953).

### **2.2.2 Inventarios de combustibles forestales en México**

En México existen numerosos trabajos acerca de cómo inventariar los residuos forestales. Por lo general, estos trabajos aplican la técnica de intersecciones planares o alguna de sus variaciones, debido a que es el método más utilizado a nivel mundial.

Vera (1980), realizó un inventario de residuos forestales en el campo experimental Zoquiapan, México; en un área de 502 ha de *Pinus hartwegii* Lindl, en el que obtuvo cargas promedio de 0.3071 t/ha de residuos forestales.

Zapata (1990) realizó un estudio que consistió en la determinación de indicadores de peligro de incendios forestales con base en la cuantificación de material combustible de la Unidad de Manejo Forestal de Topia, Durango. Los resultados obtenidos los presentó en rangos por cada una de las cinco categorías de carga

de combustibles: I (0 – 21 t/ha), II (22 – 35 t/ha), III (36 – 49 t/ha), IV (50 – 63 t/ha) y VI (>64 t/ha); la vegetación dominante fue de *Pinus arizonica* Engelm y *Pinus durangensis* Martínez.

Alanís y Sánchez (1994) realizaron un estudio de quemas prescritas en una masa joven de *Pinus durangensis* Martínez., en Madera, Chih., donde determinaron una carga de 10-31.3 t/ha de combustibles leñosos; la composición florística arbórea predominante fue de *Pinus durangensis*, *Pinus arizonica* y *Quercus* sp.

Flores *et al.* (2010) realizaron un estudio en un bosque de pino-encino y encontraron las siguientes cargas de combustibles: 1 h (0.19t/ha), 10 h (2.5 t/ha), 100 horas (4.57 t/ha), 1,000 h (25 t/ha) y una carga de 27.91 t/ha para los combustibles de hojarasca y capa de fermentación.

Hernández y Ramírez (2010) realizaron una evaluación del material combustible en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, con un resultado de 5 rangos de carga de combustible: muy bajo (0 – 30 t/ha), bajo (30 – 60 t/ha), medio (60 – 70 t/ha), alto (70 - 80 t/ha), y muy alto (>80 t/ha). La vegetación del área de estudio fue *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, *Alnus jorullensis* y pastizal bajo.

Bonilla *et al.* (2013) llevaron a cabo un estudio en un área quemada sobre dinámica de combustibles en rodales de pino-encino de Chignaguapan, Puebla. Los autores reportan como resultado, una carga de 31.726-11.93 t/ha y 7.099-1.78 t/ha; para arbustos, la carga fue de 1.04 –0.75 t/ha y 0.60 – 0.26 t/ha, la capa de hojarasca acumuló una carga promedio de 10.95 – 2.34 t/ha y 6.13 – 1.73 t/ha y la capa de fermentación concentró una carga promedio de 9 – 4.39 t/ha y 0.76 – 2.15 t/ha.

### 2.3 Literatura citada

- Agee J., K. 1993. Fire Ecology of the Pacific Northwest. Island Press, Washington, D.C.
- Hardesty, J., Myers, R. L., Fulks, W. 2005. Fire, ecosystems and people. A preliminary assessment of fire as a global conservation issue. The George Wright Forum 22: 78-87.
- Alanís, M., H .E. y Sánchez, C. J. 1994. Quemadas Prescritas en una Masa Joven de Pinus durangensis Martínez., en Madera, Chih. Folleto Técnico No. 5. INIFAP. 27p.
- Alvarado, C. E. 1986. Comportamiento del Fuego en Rodales Pocos Perturbados de Pinus montezumae Lamb. Tesis profesional. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de México. 113p.
- Brown, J. K. (1974). Handbook for inventorying downed woody material. General Technical Report INT-16. USDA Forest Service. IFRES, Ogden, Utah. 24 p.
- Van Wagner, C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. Forest Science 14(1): 20-26.
- Arnaldos, V. J.; Navalón, N. X.; Pastor, F. E.; Planas, C. E. Y Zárata, L. L. 2004. Manual de Ingeniería Básica para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 414p.
- Ávila, G., Aljaro M. E., y Silva B. 1981. Observaciones en el estrato herbáceo del matorral después del fuego. Anales del Museo de Historia de Valparaíso (Chile) 14:99-105
- Bonilla, P. E.; Rodríguez, T., D. A.; Borja, De La R. A.; Cíntora, G. C. Y Santillán, P. J. 2013. Dinámica de Combustibles en Rodales de pino – encino del municipio de Chignahuapan, Puebla. INIFAP –Vol. 4. No. 19. Recuperado de:<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/3032/2506#>.

- Brown, A. A. 1973. Forest Fire Control and Use. Second edition. Ediciones McGraw-Hill Book Company. United States of America. 686p.
- Cañellas, I. 2003. La Coscoja (*Quercus coccifera* L): Ecología, Características y Usos. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 195p.
- CONAFOR, 2020. Dime qué ecosistema eres y te diré cuánto fuego soportas. Blog. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/dime-que-ecosistema-eres-y-te-dire-cuanto-fuego-soportas?idiom=es>
- DeBano, L., D. G. Neary and P. F. Ffolliott 1998. Fire's effects on ecosystems. New York: John Wiley y Sons. 333p.
- Dicknson, M. B., y Johnson, E. A. 2001. Fire effects on trees. Forest Fires: Behavior and Ecological Effects pp. 477-525. Academic Press, San Diego, CA
- Fernández, S. F.; Fernández, S. H.; Radilla, C., J. L.; Castañón, S., J.C. y Vargas, L. B. 2001. Manual de Capacitación para la Prevención y Combate de Incendios Forestales. SEP. México, D.F. 142 p.
- Flores, G., J. G y Benavides, S., J. D. 1992. Las Quemadas Prescritas como Apoyo al Manejo Forestal Integral. En: ARTEAGA, M. B. (ed.). Primer Foro nacional sobre Manejo integral Forestal. Memoria. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp. 387 – 342.
- Flores, G., J. G.; Xelhuantzi, C. J. y Chávez, D., A. A. 2010. Monitoreo del Comportamiento del Fuego en una Quema Controlada en un Rodal de Pino–Encino. Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(1): pp. 50 -59.
- Rodríguez Trejo, D. A., Fulé, P. Z. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. International Journal of Wildland Fire 12: 23-37.

- Rodríguez Trejo, D. A., Myers, R. L. 2010. Using oak characteristics to guide fire regime restoration in Mexican pine-oak and oak forests. *Ecological Restoration* 28(3): 304-323.
- Hernández, R. R. y Ramírez, M. U. 2010. Evaluación del Material Combustible en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Chapingo, Texcoco; Edo. México. 55 p.
- INIFAP (Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y pecuarias).2006. Sitios de Muestreo para el Modelaje de Combustibles Forestales (SIMMCOF). Reporte técnico. Capítulo II. 42p.
- Martínez-Trinidad, Tomás, Plascencia-Escalante, Francisca O., & Islas-Rodríguez, Lisbet. (2013). La relación entre los carbohidratos y la vitalidad en árboles urbanos. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 459-468. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.016>
- MMAyA, 2012. Áreas protegidas subnacionales en Bolivia. Situación actual. 87p. Recuperado de: <http://dgbap.mmaya.gob.bo/wp-content/uploads/2017/10/AREAS-PROTEGIDAS-SUBNACIONALES-2012.pdf>
- Montenegro G. M., Gómez, F. D, Ginocchio R. 2003. Regeneration potential of Chilean matorral after fire: Updated View. In: Veblen T, W Baker, G Montenegro, T Swetnam. *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas*, vol 160. Springer New York. P 375-403
- Montenegro, G., Ginocchio R., Segura A., Keely J. E. y Gómez M. 2004. Fire regimes and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista Chilena de Historia Natural* 77:455-464
- Montoya, M., J. A. 2004. Los incendios forestales en el estado de Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias

- Forestales. Chapingo, Edo. De México. 85 p.
- Mutch, R. W. 1970. Wildland fires and ecosystems – hypothesis. *Ecology* 51, 1046-1051
- Myers, L. R. 2006. Convivir con el Fuego – Manteniendo los Ecosistemas y los Medios de Subsistencia Mediante el Manejo Integral del Fuego. Iniciativa Global para el Manejo del Fuego. The Nature Conservancy.
- Porrero, R., M. A. 2001. Incendio Forestales. Tomo I. Investigación de Causas. Mundi-Prensa. Madrid, España. 158 p.
- Rico, R. F.; Vélez, M. R.; Villaescusa, S. R.; Rodero, F. F. y Baz, S. L. 1981. Técnicas para Defensa Contra Incendios Forestales. Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Monografía 24. 200 p.
- Rodríguez T., D. A., M. Rodríguez, F. Fernández y S. Pyne 2002. Educación e incendios forestales, Mundi-Prensa, México.
- Rodríguez, T., D. A. 1996. Incendios Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa. México, D.F. 630 p.
- Rodríguez, T., D. A. 2009. El fuego y sus efectos en los árboles. Impacto ambiental de los incendios forestales. Colegio de Postgraduados. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Mundi-Prensa. México, México. Pp:105-107
- Shlisky, A., J. Waugh, P. González, M. González, M. Manta, H. Santoso, E. Alvarado, A. Ainuddin Nuruddin, D. A. Rodríguez- Trejo, R. Swaty. D. Schmidt, M. Kaufmann, R. Myer, A. Alencar, F. Kearns, D Johnson, J. Smith, D. Zonlner y W. Fulks. 2007. El Fuego, los Ecosistemas y la Gente: Amenazas y Estrategias para la Conservación Global de la Biodiversidad. Informe Técnico de la Iniciativa Global para el Manejo del Fuego 2007 – 2. The Nature Conservancy. Arlington.VA.

- Show, S. B y Clarke, B. 1953. La Lucha Contra los Incendios Forestales. FAO. Roma. 130 p.
- Spurr, S. H. y Barnes, B. V. Ecología Forestal. 1980. AGT editor. México, D.F. 690 p.
- Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., and Cramer, W. 2001. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: Coupling fire into a dynamic global vegetation model,.Global Ecol. Biogeogr., 10, 661–677.
- TNC (The Nature Conservancy). 2007. Iniciativa global para el manejo del fuego. TNC. Tallahassee, Florida.
- Vera, G. F. 1980. Presentación de la Técnica de Intersecciones Planares en un Caso de Inventario de Residuos Forestales en el Campo Experimental Zoquiapan. Tesis profesional. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. 64 p.
- Waring, R. H. 1987. Characteristics of tres predisposed to die. BioScience 37, 569-574
- Whelan R., J. 1995. The ecology of fire. New York,NY: Cambridge University Press. 346 p p.
- Wright, H. A., & Bailey, A.W. (1982). Fire Ecology: United States and Southern Canada. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Wright, H. A., 1970. A Method to determine heat-caused mortality in bunchgrasses. Ecological Society of America. <https://doi.org/10.2307/1934038>
- Zapata, P., C. 1990. Determinación de Indicadores de Peligro Potencial de Incendios Forestales con Base en la Cuantificación del Material Combustible. Seminario de Titulación. Chapingo, Texcoco; Edo. México.

Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. 77 p.

González, Mauro E, Lara, Antonio, Urrutia, Rocío, & Bosnich, Juvenal. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 215-219. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>

Durán H. J., Rodríguez P. A, Fernández-Palacios, Gallardo C. A. (2008). Disponibilidad de nutrientes de una cronosecuencia de incendios en bosques de *Pinus Canariensis*. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 25:173-178. Recuperado de: [Dialnet-DisponibilidadDeNutrientesDeUnaCronosecuenciaDeInc-4249393.pdf](#)

### 3. ESTIMACION DE CARGAS Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN TEXOCUIXPAN, PUEBLA<sup>2</sup>

#### 3.1 Resumen

México es un país que ha registrado numerosos incendios a lo largo de su historia. En 1998 se registraron 544 incendios en el estado de Puebla, que afectaron una superficie de 19,835 ha. Derivado de esto, la localidad de Texocuixpan, Puebla, resultó fuertemente afectada. Sin embargo, con el apoyo los pobladores de la zona, en la actualidad han logrado recuperar la totalidad de superficie dañada por aquel incendio. No obstante, la falta de actividades silvícolas ha provocado que hoy día exista una acumulación de material combustible y continuidad vertical en el arbolado adulto de *Pinus patula*. Por lo anterior, se estimaron las cargas mediante los métodos 1) Van Wagner y 2) Brown modificado por Sánchez y Zerecero. Para ello, se utilizaron líneas de intersecciones planares fijas durante los meses de enero, febrero y marzo, esto permitió captar la variación de la carga a través del tiempo. La carga de combustibles promedio, obtenida fue de 6.375 Mg ha<sup>-1</sup> en ladera seca y 7.105 Mg ha<sup>-1</sup> en ladera húmeda. Se observó un aumento en la carga de combustibles leñosos conforme se acercaba la temporada de incendios. Para el contenido de humedad se utilizaron probetas de *Pinus patula* 1 y 10h de TR, mismas que se colocaron en la cama de combustibles y se monitorearon durante el día para captar las variaciones de ganancia o pérdida de contenido de humedad. Se registró que la humedad relativa y temperatura se comportan de manera inversa. El contenido de humedad disminuye conforme se acerca la temporada de incendio y dado que las cargas son altas, se recomienda hacer aclareos, podas, extracción de leña y quema de residuos, lo cual disminuiría la posibilidad de registrar un siniestro de la magnitud del ocurrido en 1998. Las probetas de 1h de TR captan mejor la variación de la humedad.

Palabras clave: cargas de combustibles, contenido de humedad, incendios forestales, intersección planar, *Pinus patula*.

---

<sup>2</sup> Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.  
Autor: Claudia Ivette Ortega-Vargas  
Director: Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

### 3.2 Abstract

Mexico has suffered fires throughout its history. In 1998, 544 fires were registered in Puebla, affecting an area of 19,835 ha. As a result, the forest of Texocuiipan, Puebla was drastically affected. However, its population have recovered the area damaged by that fire. Currently no type of silvicultural activity is carried out; this has led to a high fuel quantity and horizontal and vertical continuity in the trees, which are key factors for fire spread. Therefore, the loads were estimated using method 1) Van Wagner (1982) and 2) Brown modified by Sánchez and Zerecero. Fixed flat intersection lines were used during January, February and March, this to capture the variation of loads through time. The average fuel load obtained was 6.375 Mg ha<sup>-1</sup> on the dry hill and 7.105 Mg ha<sup>-1</sup> on the wet hill. An increase in the load of woody fuels is postulated as the fire season approached. For the moisture content, samples of *Pinus patula* of 1 and 10 h Delay Time (DT) were used, which were placed on the fuel bed and monitored during the day to capture the variations of gain or loss of moisture percent. Relative humidity and temperature were recorded to behave inversely. The moisture content decreases as the fire season approaches and since the fuel loads were high, it is recommended to thin, prune, extract firewood and burn wood waste, which would reduce the risk of a catastrophic fire like the one in 1998. It is recommended to use the smaller sample because it can better capture the variation in the environment.

Keywords: fuel loads, fire forest, moisture content, *Pinus patula*, planar intersection.

### 3.3 Introducción

Los ecosistemas mexicanos constantemente son afectados por incendios. Frecuentemente, estos provocan pérdidas de recursos naturales de gran valor ecológico y económico (Xelhuantzi, Flores y Chávez, 2011). En el siglo pasado, el fuego se percibió como una amenaza al ser humano y a los recursos naturales, numerosos países desarrollaron programas sofisticados de prevención de incendios, además y crearon organizaciones para su supresión. El resultado fue una vegetación cambiada que proveyó combustible a incendios más intensos en años raramente secos (Myers, 2006). De aquí que suprimir el fuego sin tener conocimiento de su relación con los ecosistemas no ha sido la opción apropiada, surge entonces el manejo del fuego como elemento del manejo de ecosistemas (Rodríguez *et al.*, 2001; Myers, 2006; Jardel, 2010). La protección contra los incendios forestales se ha convertido en una de las actividades más importantes para los países que poseen recursos forestales (Flores, Rodríguez, Meléndez, y Rosas, 2008), y es una parte importante del manejo del fuego.

Los combustibles forestales constituyen una pieza clave en los ecosistemas forestales. Su definición indica que son todo tipo de material vegetal: partes de plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, epifitas y parasitas, así como residuos derivados de ellas, como hojarasca, capa de fermentación, materiales leñosos, conos y frutos sobre la superficie forestal (Rodríguez, 2015). El que puedan arder o no y la rapidez de propagación del fuego depende directamente de las características del combustible, tales como el contenido de humedad, disponibilidad, estado (vivos o muertos), peso (ligeros, medianos y pesados), tamaño, forma, densidad, sustancias inflamables, carga, entre otros. La precisa realización del muestreo de carga se torna difícil por la complejidad de los combustibles. Por ello, es necesario planear y diseñar el tipo de muestreo (Morfin *et al.*, 2012)

La carga se define como el peso seco por unidad de superficie que tienen los combustibles forestales. Es extremadamente variable y depende básicamente del tipo de ecosistema y de perturbaciones naturales y disturbios antropógenicos

que hayan acontecido, así como el tiempo desde que lo hicieron. Comúnmente la estimación de cargas se realiza para combustibles superficiales y parte de los subterráneos. Sin embargo, en zonas donde los incendios de copa son frecuentes, es conveniente estimar la carga de combustibles aéreos.

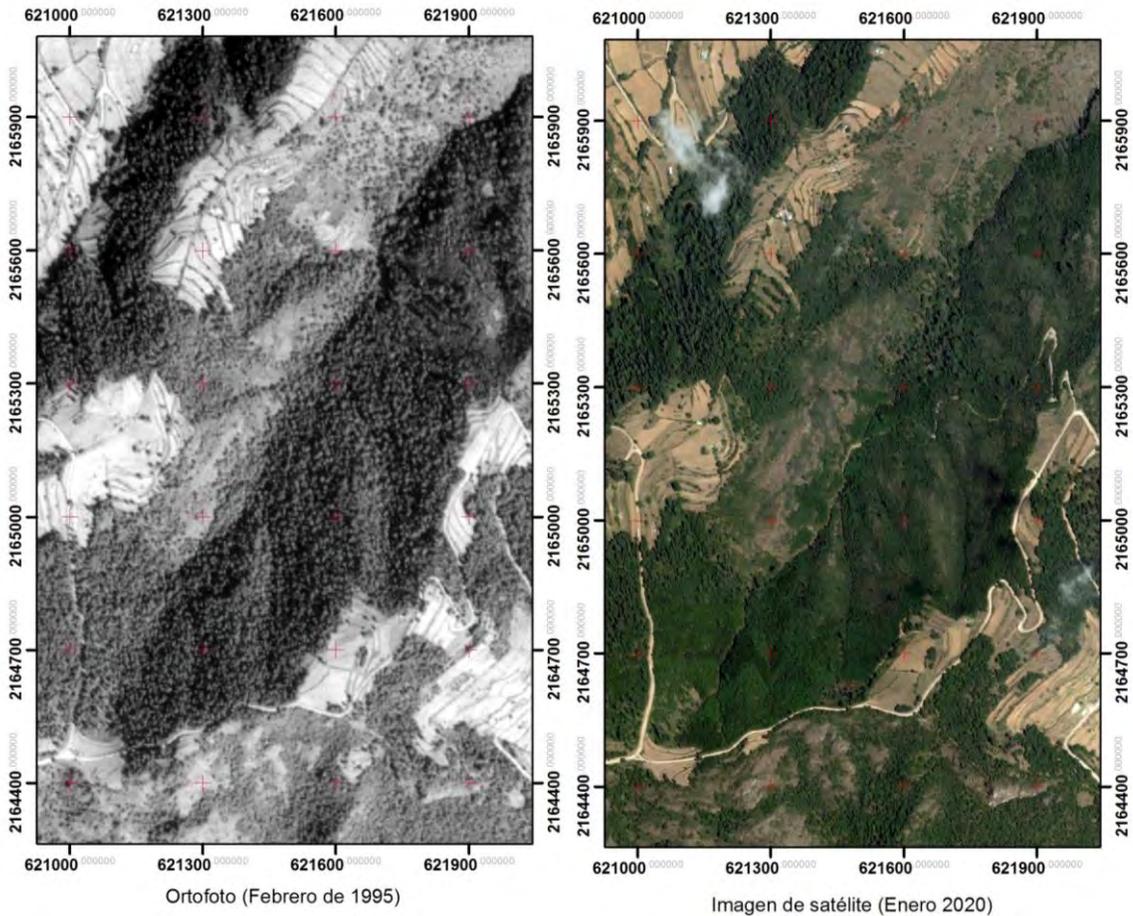
En nuestro país, todavía son escasos los estudios encaminados a analizar la variación del contenido de humedad de combustibles forestales en espacio y tiempo. Asimismo, solo existe una investigación en México que muestra la variación de la carga de combustibles superficiales en el transcurso de la temporada de incendios forestales, en un encinar del valle de México (Martínez *et al.* 2018).

El objetivo principal del presente trabajo, fue generar información que mostrara las variaciones del contenido de humedad de los combustibles a través del tiempo, así como los cambios en las cargas de combustibles en cada mes transcurrido conforme avanzaba la temporada de incendios.

### 3.4 Materiales y métodos

#### 3.4.1 Área de estudio.

En área de estudio se encuentra en la localidad de Texocuíxpan, municipio de Ixtacamaxtitlan, en la Sierra Norte de Puebla.



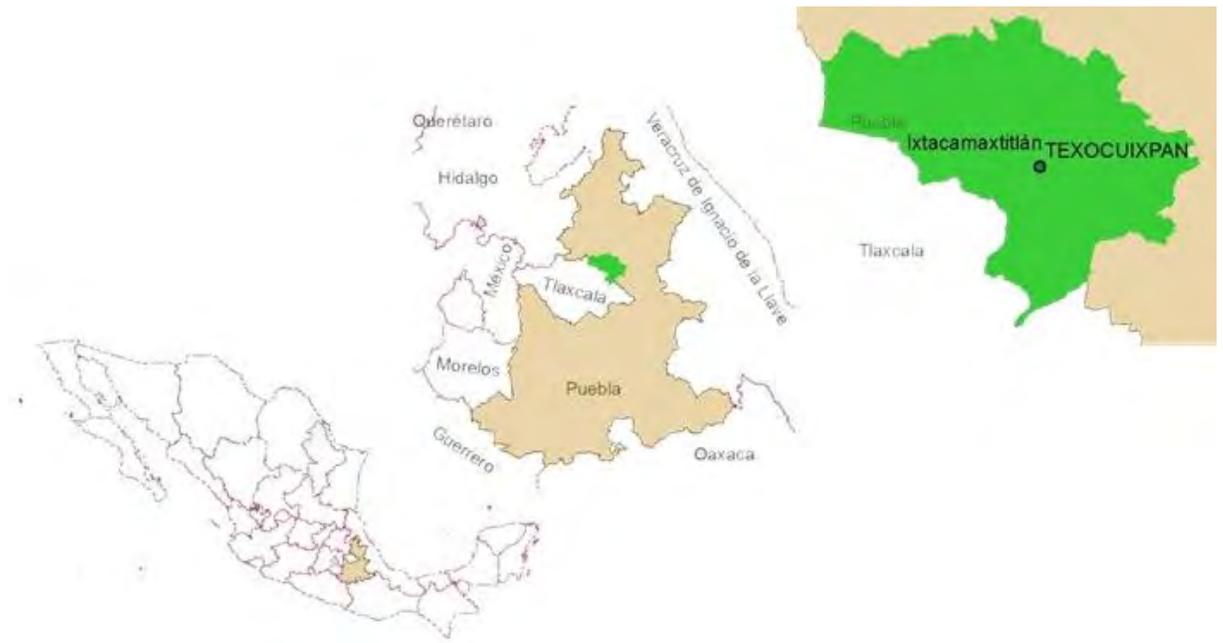
**Figura 3. Superficie afectada en la cañada de Texocuíxpan, Ixtacamaxtitlan, Puebla.**

La importancia de este lugar radica en que en mayo de 1998 sufrió un incendio de copa catastrófico que provocó la pérdida de toda la vegetación de oyamel (*Abies religiosa*). Sin embargo, inmediatamente el área fue reforestada con pino (*Pinus patula*) y actualmente se ha logrado recuperar. La superficie afectada por aquel incendio fue de aproximadamente 400 ha. En ese mismo año, el Diario Oficial de la Federación, declaró como zona de restauración ecológica (DOF, 1998)

En la Figura 3 se observan dos imágenes correspondientes al área afectada por el incendio de 1998, la primera corresponde a una ortofoto (1995) tres años antes

del incendio y la segunda es una imagen de satélite reciente (2020), comparándolas se pueden apreciar los cambios en la vegetación a causa del incendio.

La localidad de Texocuixpan, Puebla se encuentra localizada en las coordenadas geográficas 19°34'10" y 19°35'49" N y 97°49'40" y 97°51'15" O (Figura 4), referidas al meridiano de Greenwich, presenta un rango altitudinal de 2,700 a 3,100 msnm.



**Figura 4. Localización de Texocuixpan, Ixtacamaxtitlán, Puebla.**

**Cuadro 1. Colindancias del área afectada por el incendio.**

Orientación	Colindancia
Al Norte	Pequeñas propiedades de San Francisco Ixtacamaxtitlán
Al Sur	Pequeñas propiedades de Texocuixpan
Al Este	Ejido Analco
Al Oeste	Pequeñas propiedades de Texocuixpan

En la Figura 5 se puede observar que la cubierta forestal de la cañada presenta arbolado que corresponde a *Pinus patula* y *Quercus rugosa*, sin embargo la falta

de actividades silvícolas como: recolecta de leña, podas y aclareos, ha ocasionado que la zona contenga una gran acumulación de material combustible y continuidad vertical en el arbolado, lo que la ha convertido en una zona con alta probabilidad de incendio.



**Figura 5. Restauración exitosa en la cañada de Texocuixpan, Puebla. Foto: Claudia Ortega, 2020.**

### **3.4.2 Contenido de Humedad**

Para calcular las variaciones del contenido de humedad en los combustibles a lo largo del día, se utilizaron probetas cilíndricas de *Pinus patula* de 1 y 10 h de TR. Estas probetas se colocaron sobre el piso forestal en cuatro sitios fijos con diferentes combinaciones de condiciones: ladera exposición noreste (la más húmeda) bajo sombra, ladera exposición noreste expuesto, ladera exposición suroeste (la más seca) bajo sombra y ladera con exposición suroeste expuesto. En cada sitio se colocaron ocho probetas, cuatro de 1 h de TR y cuatro de 10 h de TR.

Posteriormente se realizó un monitoreo en cada uno de los sitios cada hora, de 9:00am a 6:00 p.m. Dicho monitoreo consistió en medir temperatura ambiental y humedad relativa de cada sitio con apoyo de un estuche meteorológico portátil (Figura 6) y en registrar el peso de cada una de las probetas de *Pinus patula*.

Este procedimiento se llevó a cabo en cada sitio fijo durante los días: 15 de enero, 12 de febrero y 10 de marzo de 2020.



Figura 6. Equipo empleado para la medición de variables meteorológicas y para la determinación del contenido de humedad de los combustibles leñosos. Componentes del estuche meteorológico portátil: a) funda, b) anemómetro de bolsillo, c) brújula, d) agua destilada, e) psicrómetro de bolsillo; f) probeta de Pinus patula y g) báscula digital.

### 3.4.3 Relación superficie/volumen

También se determinó la relación superficie/volumen en las probetas y en muestras de materiales leñosos mediante las siguientes fórmulas.

Primero se calculó la superficie de las dos caras del combustible, para el que se asumió una forma cilíndrica:

$$S_{2c} = 2\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$$

Donde:

$S_{2c}$ = Superficie de las dos caras del combustible,

$\pi$  = Factor 3.1416,

$D^2$ = Diámetro al cuadrado,

Después se calculó la superficie del cilindro:

$$S_{ci} = \pi DL$$

Donde:

$S_{ci}$ = Superficie del cuerpo del cilindro,

$\pi$  = Factor 3.1416,

D= Diámetro,

L= Longitud de la probeta.

Ahora para obtener la superficie total de la combustible, se sumó el resultado de la superficie de las dos caras y la superficie del cilindro, es decir;

$$S = S_{2c} + S_{ci}$$

Para calcular el volumen, se realizó lo siguiente:

$$V = S_{ca}L$$

Donde:

$S_{ca}$ =Superficie de una cara del combustible, es decir,  $(\frac{\pi D^2}{4})$

L= Longitud de la probeta

Finalmente, la relación superficie/volumen, queda como:

$$R_{S/V} = S/V$$

FONAM (2006) define la cobertura de copa como la proyección ortogonal de las copas de los árboles sobre la superficie, es decir, la superficie del suelo que es cubierta por individuos de porte arbóreo. En el presente trabajo se utilizó la app de uso libre llamada Canopy Cover Free para medir la cobertura de copa en sitios bajo sombra y expuestos. El porcentaje de cobertura para sitios bajo sombra (Figura 7a) fue de 90% y para sitios expuestos (Figura 7b) de 10%.

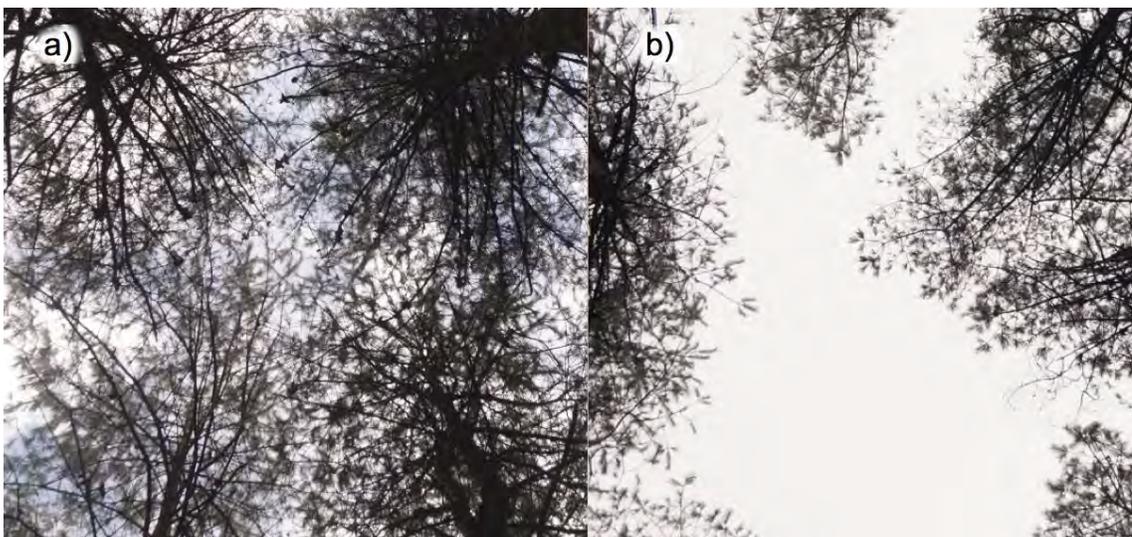


Figura 7. Muestras de cobertura de copas de los sitios en condición: a) bajo sombra y b) expuestos.

#### **3.4.4 Estimación de cargas de combustibles leñosos**

La estimación de cargas se realizó solo para combustibles leñosos. Los sitios que se emplearon fueron fijos en cada muestreo y se establecieron en áreas representativas de la cañada, ladera con exposición noreste (húmeda) y ladera con exposición suroeste (seca).

El muestreo *in situ* de la carga de combustibles leñosos se llevó cabo mediante la metodología de intersecciones planares descritas por Brown (1974). Sin embargo, es importante resaltar que dicha metodología esta adecuada para trabajar con materiales leñosos de coníferas de Estados Unidos y que sus principios están basados en la técnica de Van Wagner (1968). Por lo que, en este trabajo se emplearon las fórmulas de Van Wagner (1982).

Los sitios fueron conglomerados diseñados como se observa en la Figura 8, con el objetivo de captar la mayor variación posible en el sitio dado. Estos sitios estuvieron conformados por tres líneas de muestreo de combustibles leñosos: la primera se orientó al norte franco ( $0^\circ$ ) y las otras dos se ubicaron a partir del final de la línea, con una separación de  $120^\circ$  cada una (a  $120^\circ$  y  $240^\circ$ ). Las tres líneas del conglomerado fueron de 12 m, y cada una de ellas se marcó a 2, 4 y 12 m desde el punto extremo hacia la unión de las líneas. El conteo de frecuencias de los combustibles leñosos intersecados se clasificó según su tiempo de retardo (TR): para combustibles de 1 h TR se utilizó el segmento de 0-2 m, para los de 10 h TR el de 0-4 m, y en los 12 m se contabilizaron combustibles de 100 h TR y en caso de encontrar combustibles de 1000 h TR, se registraron sus diámetros, estos últimos clasificados por su estado de descomposición (firmes o podridos).

Esta contabilización, al igual que el monitoreo del contenido de humedad en los combustibles, se realizó durante los meses de enero, febrero y marzo.

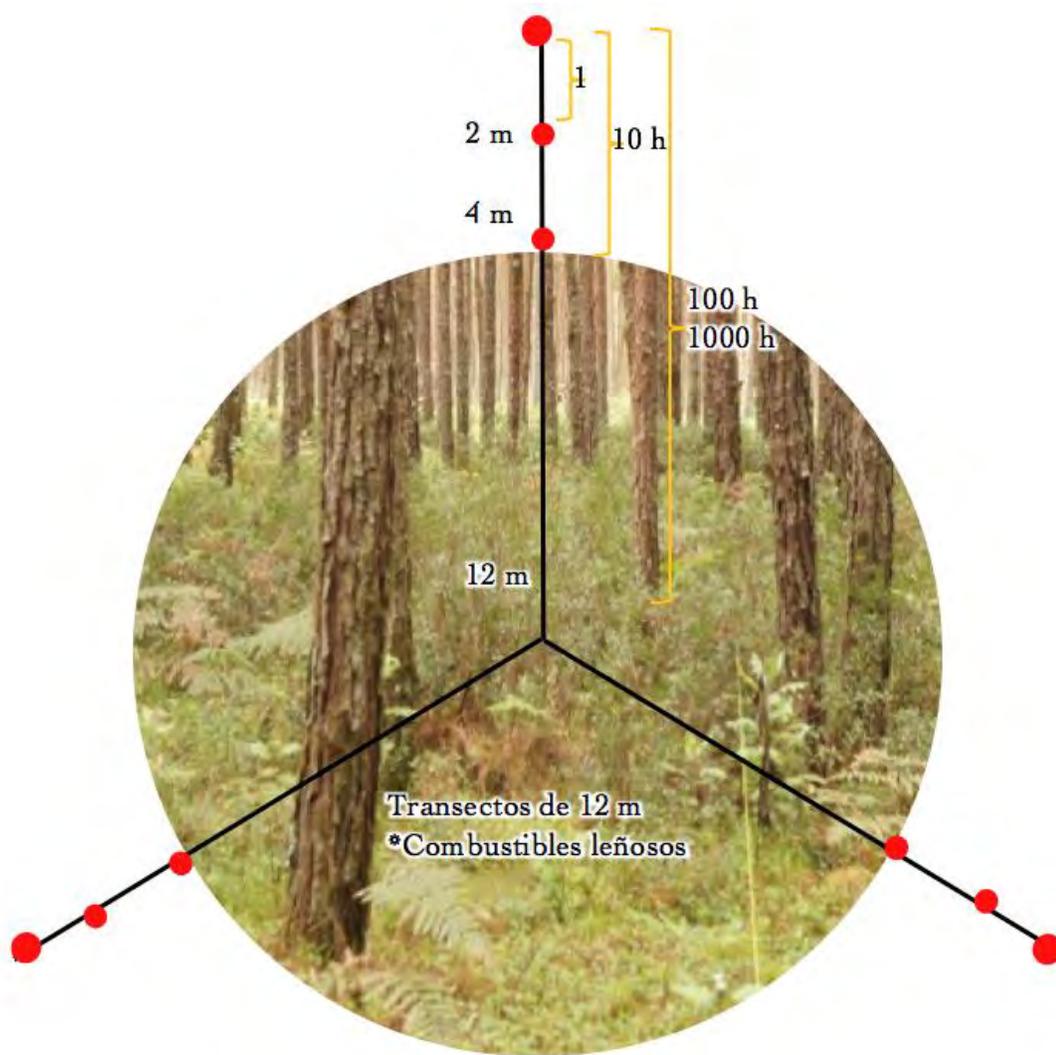


Figura 8. Diseño de muestreo

Como se mencionó anteriormente, las fórmulas de Brown (1974) son famosas en todo el mundo y muchos autores las emplean para la estimación de combustibles. Sin embargo, el método de Brown (1974) se basa en los fundamentos de Van Wagner (1968). Brown (1974) utilizó gravedades específicas enfocadas a bosques de coníferas del noroeste de Estados Unidos y aunque el cálculo es aceptable, lo ideal sería obtener muestras de materiales leñosos y medir su volumen y peso inmediatamente. Con ello podríamos determinar la densidad de cada partícula al momento de muestreo dividiendo su peso en su volumen (Rodríguez, 2015).

Estas fórmulas se presentan en el Cuadro 2, solo con el objetivo de ilustrar al lector.

**Cuadro 2. Ecuaciones para estimar la carga de combustibles forestales (Brown, 1974).**

Clase	Diámetro (cm)	Ecuación
1 h (zacates, hojas, ramillas finas)	<0.6	$P = \frac{0.484 F C}{N l}$
10 h (ramillas)	0.6-2.5	$P = \frac{3.369 F C}{N l}$
100 h (ramas)	2.5-7.5	$P = \frac{36.808 F C}{N l}$
1000 h (ramas gruesas y troncos)	>7.5 (firme)	$P = \frac{1.46 \sum d^2 C}{N l}$
	>7.5 (podrido)	$P = \frac{1.21 \sum d^2 C}{N l}$

Donde:

P = Carga o peso seco de los combustibles, expresado en toneladas métricas por hectárea ( $Mg\ ha^{-1}$ ),

n = Frecuencia o número de intersecciones,

C = Factor de corrección por pendiente

$\sum d^2$  = Suma de los cuadrados de los diámetros,

NL = Longitud total de la línea de muestreo o suma de las longitudes de las líneas en pies lineales.

Es importante incluir la fórmula para calcular el factor de corrección por pendiente, sea cual sea el método propuesto, será necesario calcular ese dato. La fórmula es:

$$C = \sqrt{1 + \frac{\% \text{ de pendiente}^2}{100}}$$

Sim embargo, para agilizar el trabajo de los cálculos de estimación de cargas, también incluimos los factores de corrección por pendiente (Cuadro 3) para las líneas de muestreo de combustibles leñosos (Brown, 1974)

**Cuadro 3. Factores de corrección por pendiente para las líneas de muestreo de combustibles leñosos (Brown, 1974).**

Pendiente (%)	Factor de corrección
0	1.00
10	1.00
20	1.02
30	1.04
40	1.08
50	1.12
60	1.17
70	1.22
80	1.28
90	1.35
100	1.41
110	1.49

El método de Van Wagner (1985) utiliza la siguiente ecuación para la evaluación de combustibles leñosos de 1 a 100 h de TR, su resultado lo arroja en toneladas métricas (t=megagramos, Mg) (Morfín *et al.*, 2012):

$$C = \frac{k * DB * DCP * f * c}{NL}$$

Donde,

C = Carga o peso seco de los combustibles, expresado en toneladas métricas por hectárea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ),

k = Derivada de la gravedad específica del agua y de factores de conversión para obtener la carga en  $\text{Mg ha}^{-1}$ , el factor es 1.234,

DB = Densidad específica o gravedad específica de la madera ( $\text{g cm}^{-3}$ ),

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

f = Frecuencia de los combustibles intersectados (Clasificados en 1, 10 o 100 h de TR)

c = Factor de corrección de la pendiente,

NL = Longitud de las líneas de muestreo (m).

Para el caso de los combustibles de 1000 h de tiempo de retardo se realiza una modificación a la ecuación que queda de la siguiente forma:

$$C = \frac{k * DB * \Sigma DC * c}{NL}$$

Donde,

$\Sigma DC$  = Es la sumatoria de los diámetros cuadráticos obtenidos durante el muestreo.

La suma de la carga de los diferentes combustibles leñosos correspondió a la carga total por transecto, así mismo el promedio de las cargas de los tres transectos de cada conglomerado correspondió a la carga total de cada sitio.

### **3.4.5 Análisis estadístico**

Se realizaron pruebas de hipótesis de que las cargas medias eran distintas mediante la prueba de F.

### 3.5 Resultados y discusión

#### 3.5.1 Contenido de humedad

Simard y Main (1982) mencionan que los combustibles muertos se encuentran en un proceso continuo de variación de humedad. En este caso, la humedad de los combustibles mostró dicha variación a lo largo del día (de 09:00am a 06:00pm) en cada uno de los cuatro sitios de ambas condiciones. A continuación se observa que esta variación fue más evidente en combustibles de 1h de TR (Figura 9) en comparación con la de combustibles de 10h de TR (Figura 10). Esta variación juega un papel importante ya que a lo largo de un solo día los combustibles finos y leñosos pueden recorrer todo el rango de humedades que se presentan durante una estación completa (Hatton *et al.*, 1988)

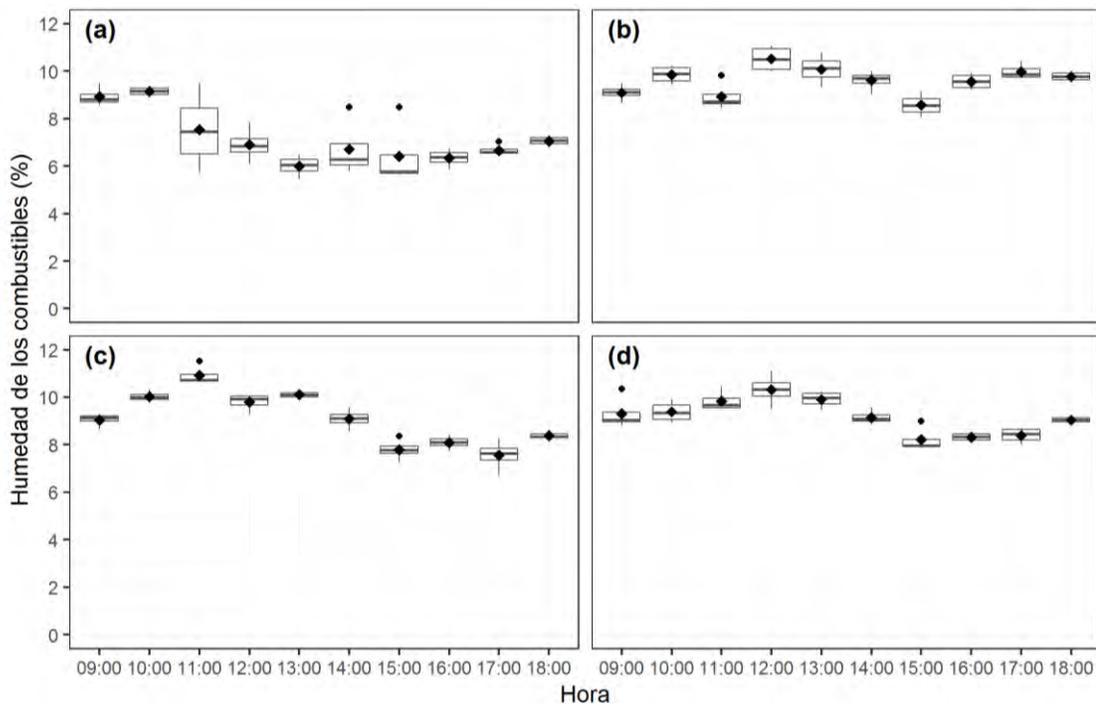
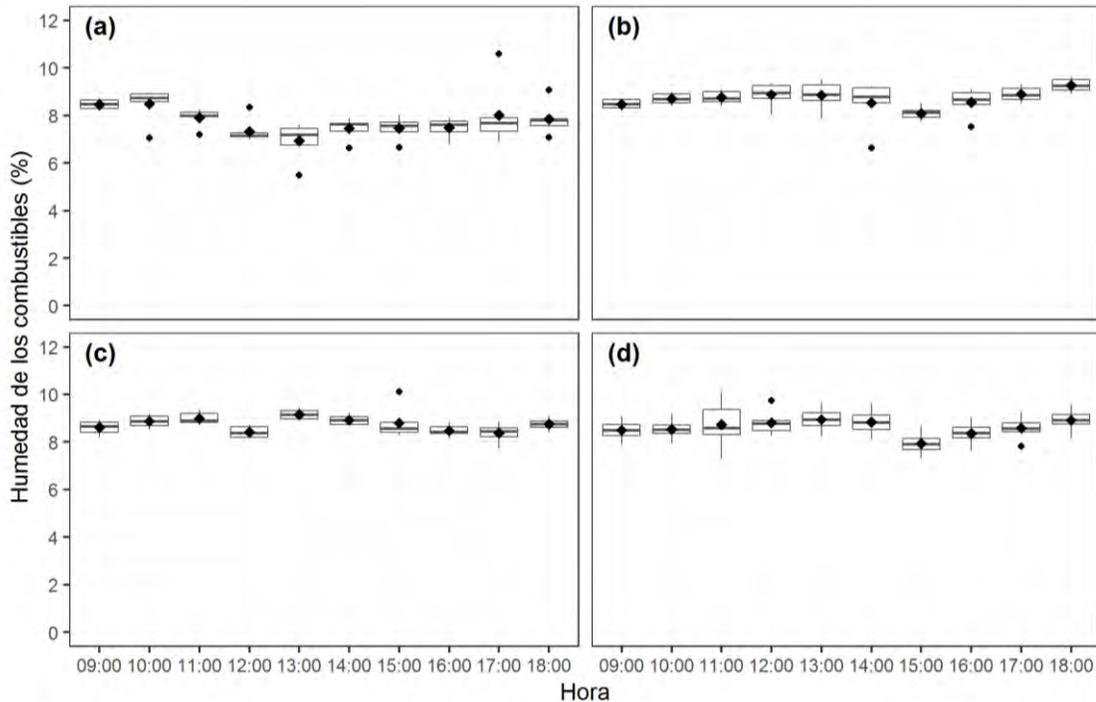


Figura 9. Variación promedio del contenido de humedad de los combustibles de 1 h de TR a lo largo del día durante los meses de enero, febrero y marzo.



**Figura 10. Variación promedio del contenido de humedad de los combustibles de 10 h de TR a lo largo del día durante los meses de enero, febrero y marzo.**

La humedad y temperatura relativa fueron diferentes en cada uno de los meses muestreados. Sin embargo, se encontró una relación inversa entre estas dos variables tanto para sitios expuestos como para sitios bajo sombra. Wong y Villers (2007) reportan este mismo comportamiento de las variables para un estudio realizado en el Parque Nacional Malinche en Puebla.

La relación anterior indica que conforme avanza el día, la temperatura aumenta mientras que la humedad relativa del ambiente disminuye, lo cual está relacionado directamente con el contenido de humedad de los combustibles ya que debido a las propiedades que poseen, estos absorben la humedad disponible si el ambiente es más húmedo, pero la pierden si el ambiente es más seco, y esto último incrementa la probabilidad de que pueda iniciarse un incendio (Agee, 1993).

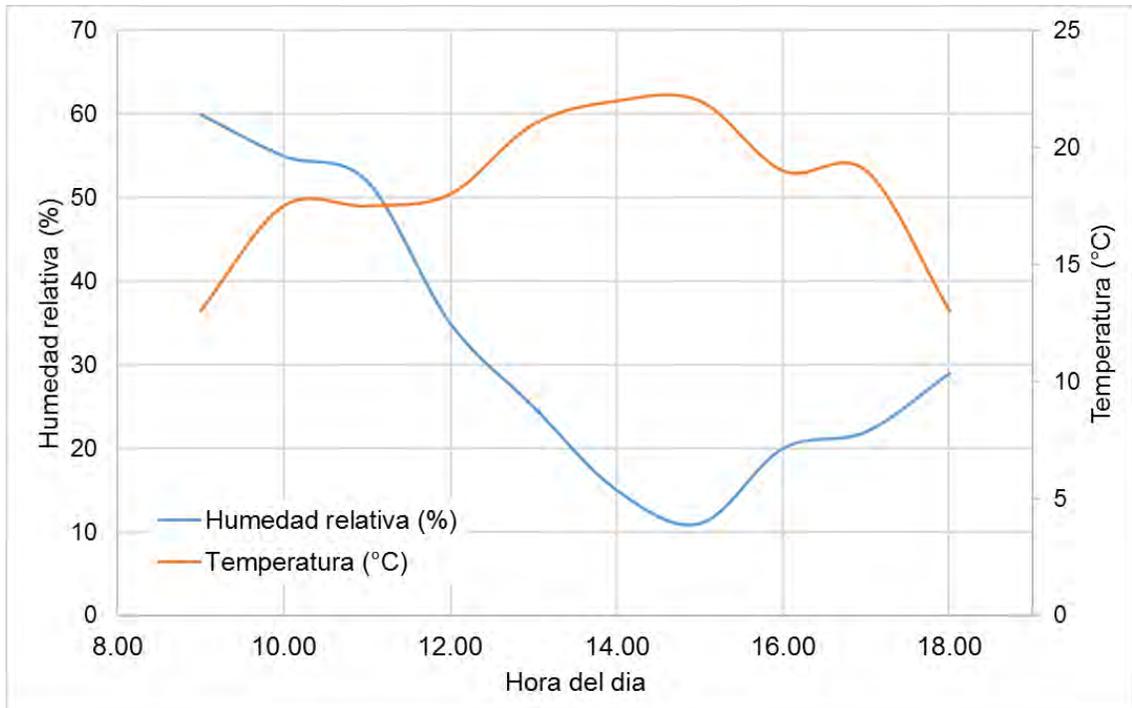


Figura 11. Humedad y temperatura de sitios expuestos en diferentes horas del día.

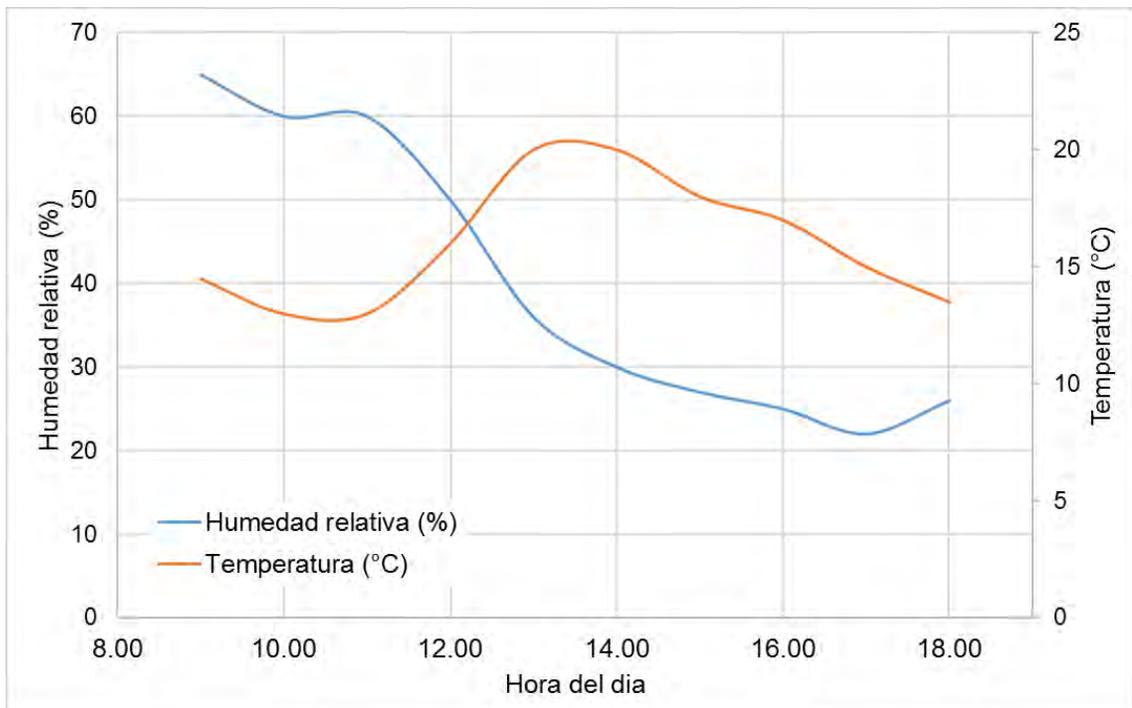


Figura 12. Humedad y temperatura de sitios bajo sombra en diferentes horas del día.

### 3.5.2 Relación superficie/volumen

Se realizó el cálculo de la relación superficie/volumen en las probetas de *Pinus patula* empleadas. El resultado se presenta en el Cuadro 4.

**Cuadro 4. Relación superficie/volumen de las probetas de 1h y 10h de TR**

Probetas	Datos	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Relación Superficie/Volumen (cm <sup>-1</sup> )
1 h	D: 0.4 cm L: 15 cm	S <sub>ca</sub> =.1256	1.884	10.1384
		S <sub>2c</sub> =.2513		
		S <sub>ci</sub> =18.8495		
		S=19.1008		
10 h	D: 2 cm L: 20 cm	S <sub>ca</sub> =3.1415	62.83	2.1000
		S <sub>2c</sub> =6.2831		
		S <sub>ci</sub> =125.6637		
		S=131.9468		

Se comprobó que las probetas de 1 h de TR tienen una mayor superficie de contacto (10.1384 cm<sup>-1</sup>) en comparación a las probetas de 10 h (2.1000 cm<sup>-1</sup>). Lo mismo sucede en el caso de los combustibles forestales, los más pequeños al ser calentados, tienden a arder con mayor facilidad, pues el calor puede acceder a la partícula combustible a través de una mayor superficie por cada unidad de volumen de la partícula (Rothermel, 1983; Scott *et al.*, 2014).

### 3.5.3 Cargas de combustibles

La evaluación de cargas de combustibles leñosos se realizó para las dos diferentes condiciones de los sitios fijos. Para ello se consideraron las frecuencias de intersección que aparecen a continuación. En el Cuadro 5 se encuentran registradas las intersecciones de los combustibles leñosos del sitio fijo ladera noroeste (húmeda) y en el Cuadro 8 las intercepciones encontradas en el sitio fijo ladera suroeste (seca).

**Cuadro 5. Frecuencia de materiales intersectados en sitio fijo ladera noroeste.**

Toma	Sitio	1h	10h	100h	1000h	Total
I (15 de enero)	a	12	6	0	0	18
	b	41	8	2	0	51
	c	23	2	1	0	26
II (12 de febrero)	a	15	7	0	0	22
	b	52	9	2	0	63
	c	22	2	2	0	26
III (10 de marzo)	a	17	7	0	0	24
	b	60	10	2	0	72
	c	20	2	2	1	25
<b>Total</b>		<b>262</b>	<b>53</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>327</b>

**Cuadro 6. Diámetro cuadrático promedio de materiales intersectados en sitio fijo ladera noroeste.**

Toma	Sitio	1h	10h	100h	1000h
I (15 de enero)	a	0.42	1.47		
	b	0.45	1.46	4.83	
	c	0.43	1.54	5.03	
II (12 de febrero)	a	0.41	1.40		
	b	0.44	1.34	5.17	
	c	0.40	1.68	4.87	
III (10 de marzo)	a	0.41	1.80		
	b	0.42	1.69	4.74	
	c	0.45	1.60	5.25	8.30
<b>Media</b>		<b>0.43</b>	<b>1.55</b>	<b>4.98</b>	<b>8.30</b>

**Cuadro 7. Cargas de materiales intersectados en sitio fijo ladera noreste.**

Toma	Sitio	1h	10h	100h	1000h	Suma	Carga (Mg/ha)
I (15 de enero)	a	0.733	2.246			2.980	<b>5.626</b>
	b	2.877	2.954	3.742		9.574	
	c	1.474	0.822	2.029		4.325	
II (12 de febrero)	a	0.874	2.377			3.251	<b>6.610</b>
	b	3.488	2.800	4.288		10.576	
	c	1.220	0.978	3.805		6.002	
III (10 de marzo)	a	0.990	3.929			4.920	<b>9.080</b>
	b	3.667	4.948	3.604		12.220	
	c	1.403	0.887	4.422	3.389	10.101	
<b>Media</b>		<b>1.859</b>	<b>2.438</b>	<b>3.648</b>	<b>3.389</b>	<b>7.105</b>	<b>7.105</b>

**Cuadro 8. Frecuencia de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste.**

Toma	Sitio	1h	10h	100h	1000h	Suma
I (15 de enero)	a	51	6	0	0	57
	b	41	8	1	0	50
	c	22	2	0	0	24
II (12 de febrero)	a	54	7	0	0	61
	b	40	8	1	0	49
	c	29	2	0	1	32
III (10 de marzo)	a	53	7	0	0	60
	b	44	10	2	0	56
	c	34	2	2	0	38
<b>Total</b>		<b>368</b>	<b>52</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>427</b>

**Cuadro 9. Diámetro cuadrático promedio de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste.**

Toma	Sitio	1h	10h	100h	1000h
I (15 de enero)	a	0.40	1.71		
	b	0.41	1.65	5.06	
	c	0.45	1.69		
II (12 de febrero)	a	0.41	1.32		
	b	0.40	1.37	4.92	
	c	0.41	1.35		8.10
III (10 de marzo)	a	0.43	1.44		
	b	0.42	1.47	4.93	
	c	0.44	1.62	4.84	
<b>Media</b>		<b>0.42</b>	<b>1.51</b>	<b>4.94</b>	<b>8.10</b>

**Cuadro 10. Cargas de materiales intersectados en sitio fijo ladera suroeste.**

<b>Toma</b>	<b>Sitio</b>	<b>1h</b>	<b>10h</b>	<b>100h</b>	<b>1000h</b>	<b>Suma</b>	<b>Carga (Mg/ha)</b>
I (15 de enero)	a	2.827	3.040			5.867	
	b	2.388	3.773	2.054		8.215	5.539
	c	1.544	0.990	0.000		2.533	
II (12 de febrero)	a	3.145	2.113	0.000		5.259	
	b	2.218	2.601	1.942		6.761	5.856
	c	1.689	0.632	0.000	3.228	5.548	
III (10 de marzo)	a	3.396	2.515			5.910	
	b	2.689	3.744	3.899		10.332	7.730
	c	2.281	0.909	3.758		6.948	
<b>Media</b>		<b>2.464</b>	<b>2.257</b>	<b>1.665</b>	<b>3.228</b>	<b>6.375</b>	<b>6.375</b>

Con base en el p-valor (Cuadro 11) y en las figuras derivadas del Cuadro 5 y del Cuadro 8 (Figura 13, Figura 14 y Figura 15) que correspondan, se hallaron diferencias significativas para los valores medios de las cargas por fecha de toma en ladera húmeda (p-valor=0.0133) y su interacción con el sitio (0.0059). En ladera seca el p-valor de 0.0977 denota diferencias moderadas en los sitios, similarmente que con la interacción Sitio-fecha. Los demás p-valores sugieren que no existen diferencias significativas entre las medias del grupo en que se encuentran.

De la misma manera, las áreas con orientación noroeste y de alta elevación tienen menor riesgo de presencia de incendios, mientras que aquellas con orientación suroeste generalmente son más susceptibles a la presencia de incendios (Fulé y Covington, 1999).

**Cuadro 11. P-valores de las comparaciones de medias de las cargas por condición.**

<b>Condición</b>	<b>Sitio (transecto)</b>	<b>Fecha</b>	<b>Sitio y Fecha</b>
<b>Ladera seca</b>	0.0977	0.4575	0.1356
<b>Ladera húmeda</b>	0.5272	0.0133	0.0059
<b>Ladera húmeda vs ladera seca</b>		I (0.9748)	
		II (0.7475)	
		III (0.6241)	

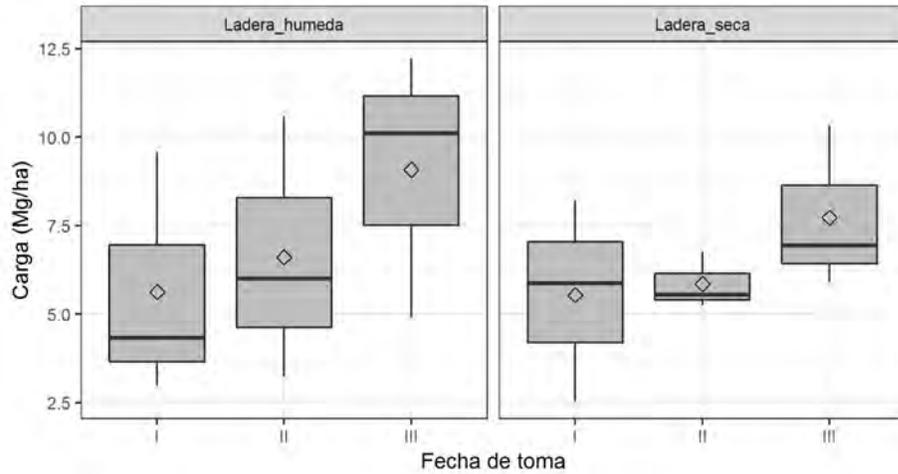


Figura 13. Carga de combustibles por fecha de toma de los datos, promediando por sitio.

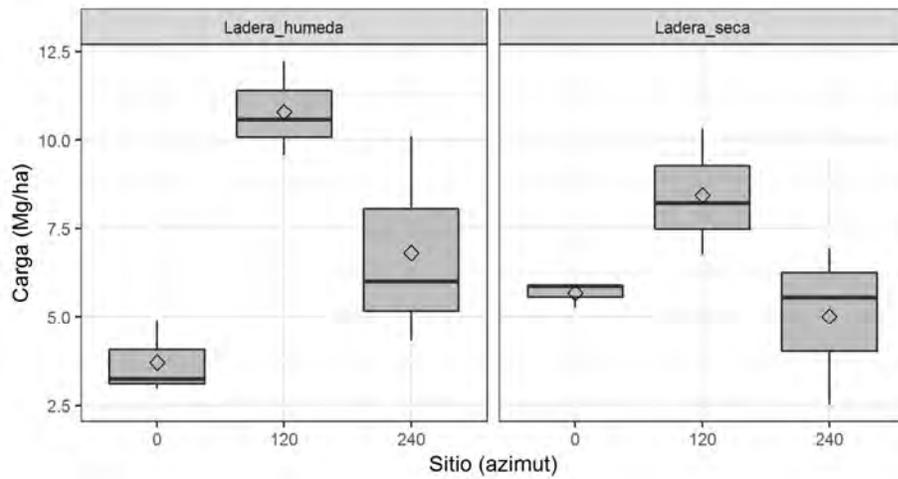


Figura 14. Carga de combustibles por sitio, promediando por toma.

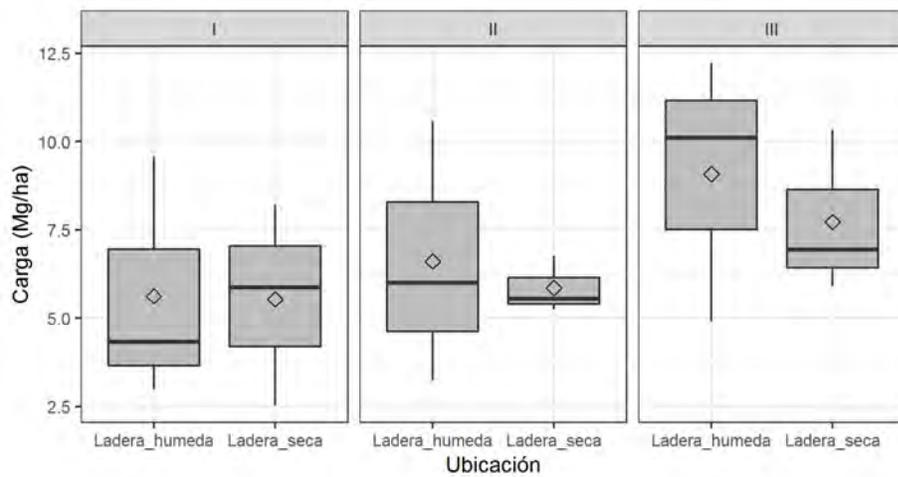


Figura 15. Carga de combustibles por condición (ladera húmeda y ladera seca) a través de las fechas de toma (I: 15 de enero, II:12 de febrero y III:10 de marzo), promediando por sitio.

### **3.6 Conclusiones**

Desde el establecimiento de la reforestación a la fecha, las plantaciones tanto sobre ladera NE como SO, de momento no han generado una carga acumulada de detritos leñosos diferente entre ambas exposiciones.

Los resultados indican que debido a la falta de actividades de manejo tales como podas, aclareos y recolección de leña la zona cuenta con una acumulación de combustibles forestales. Lo anterior contribuye al aumento de probabilidad de incendios.

Se recomienda continuar monitoreando la zona y establecer estrategias de manejo de combustibles forestales que ayuden a reducir la cantidad de combustibles forestales.

### **3.7 Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico dado durante los estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por todas las facilidades que les brinda a sus estudiantes para que puedan continuar con sus estudios.

Al Sr. Antonio Marquéz Hernández y su familia por el apoyo brindado en la realización del muestreo en campo.

### 3.8 Literatura citada

- Agee, J. K. 1993. Fire Ecology of Pacific Northwest Forests. Island Press. USA. 493 p.
- Brown, J. K. (1974). Handbook for Inventorying Downed Woody Material. General Technical Report INT-16. USDA Forest Service. Ogden, Utah.
- Castillo, M., Pedernera, P., y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA, XIX(1), 44–53. <http://doi.org/10.1002/hyp.9647>
- DOF, 1998. Decreto por el que se declaran zonas de restauración ecológica diversas superficies afectadas por los incendios forestales de 1998. Recuperado de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4893694&fecha=23/09/1998](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893694&fecha=23/09/1998)
- Flores Garnica, J. G., Rodríguez Chávez, O. G., Meléndez Gómez, M., y Rosas Aceves, O. G. (2008). Sitios de muestreo para monitoreo de combustibles forestales (SIMMCOF). Guadalajara, Jalisco, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Jardel Peláez, E. J. (2010). Planificación del Manejo del Fuego. Autlán, Jalisco, México.
- Martínez V., J. L., Rodríguez T., D. A., Borja de la R., A., Rodríguez Y., A. G. 2018. Propiedades físicas y dinámica de combustibles forestales. Madera y Bosques 24(2) e2421467.
- Morfin, R. J. E.; Jardel, P. E. J.; Alvarado, C. E. E. y Michel, F. J. M. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal- Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. Libro, ISBN: 978-607-450-544- 3. 59 p
- Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego: Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego. The Nature

Conservancy, 28.

Rodríguez T., D. A. 2015. Incendios de Vegetación. Su ecología, manejo e historia. Vol 1. Colegio de Postgraduados (Ed.). bba. 891 p.

Rodríguez T., D. A. 2015. Incendios de Vegetación. Su ecología, manejo e historia. Vol 2. Colegio de Postgraduados (Ed.). bba. 1,705 p.

Rodríguez T., D. A., Rodríguez A., M. Fernández, F., Pyne, S. J. 2001. Educación e Incendios Forestales. Mundi Prensa, UACH. México. 201 p.

Rothermel, R. C. 1983. How to predict the spread and intensity of of forest and range fires. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Gen. Tech. Rep. INT 143. Ogden, Utah. 161 p.

Scott, A. C., Bowman, D. M. J. S., Bond, W. J., Pyne, S. J., Alexander, M. E. 2014. Fire on Earth. An Introduction. Wiley Blackwell. U.K. 413 p.

Simard, A. J. y Main, W. A. 1982. Comparing methods of predicting Jack pine slash moisture. Can J. For. Res. 12:793-802

Wong, J. C, & Villers Ruiz, M. de L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. Investigaciones geográficas, (62), 87-103. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112007000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112007000100006&lng=es&tlng=es).

Xelhuantzi, C. J.; Flores, G. J. G. y Chávez, D. Á. A. 2011. Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 2(3):37-52.

## 4. EVALUACIÓN DE CARGAS COMBUSTIBLES BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS

Assessment of fuel loads under different silvicultural treatments

### 4.1 Resumen

El complejo de combustibles forestales difiere de bosques manejados a áreas con poca o nula intervención silvícola, sobre todo por los factores antropogénicos asociados. El presente trabajo se realizó en la zona de uso forestal del ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. El bosque se encuentra en ordenamiento bajo el esquema del Método de Desarrollo Silvícola (MDS), caracterizado por áreas homogéneas que son sujetas a preaclareos y podas, aclareos, cortas de regeneración y liberación; así como, método de regeneración por árboles padre. El trabajo en campo consistió en calcular cargas de los combustibles forestales mediante la técnica de intersecciones planares. De igual modo, se emplearon modelos de predicción para calcular cargas de combustibles vivos aéreos; volumen y biomasa del arbolado. Finalmente, se aproximó la distribución espacial de los combustibles con modelos de regresión y bandas satelitales Sentinel 2A. La carga promedio obtenida en combustibles leñosos de 1, 10, 100 y 1000 (firmes y podridos) h de tiempo de retardo (TR) fue de 0.876, 7.949, 5.413, 3.763 y 0.886  $\text{Mg ha}^{-1}$  respectivamente, con una media de 5.164  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Mientras que la carga en combustibles finos fue de 5.383 (Hojarasca) y 11.260 (Capa de fermentación)  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Por otro lado, la carga de combustibles vivos aéreos (biomasa) resultó ser de 176.5  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Las cargas de combustibles muertos no son tan altas comparadas con zonas en las que se excluyen las actividades silvícolas. No obstante, se recomienda que se siga dando continuidad a las actividades de prevención de incendios tales como la renovación de brechas corta fuego, podas y quema de residuos. En la elaboración de los mapas, los modelos de regresión que mejor describieron las cargas de combustibles aéreos tuvieron una forma exponencial y se usaron las bandas rojo e infrarrojo (NIR). Los modelos de los combustibles leñosos también tuvieron forma exponencial, pero usaron la banda azul y rojo. Se recomienda emplear estos modelos en condiciones similares para estimaciones de volumen y biomasa debido a que en las cargas de material leñoso hay más variación.

**Palabras clave:** fuego, incendios, manejo forestal, prevención de incendios, teledetección

## 4.2 Abstract

The forest fuel complex differs from managed forests to areas with little or no silvicultural intervention, mainly due to associated anthropogenic factors. The present work was carried out in the forest of the Ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. That forest is managed under the scheme of Método de Desarrollo Silvícola (MDS), characterized by homogeneous areas that are subject to pre-thinning and pruning, thinning, regeneration and release cuts; as well as, method of regeneration (seedling) by parent trees. The fieldwork consists of calculating forest fuel loads using the flat intersection technique. Similarly, prediction models were used to calculate aerial live fuel loads: full tree volume and biomass. Finally, the spatial distribution of fuels was approximated with regression models and Sentinel 2A satellite bands. The average load obtained in fuels of 1, 10, 100 and 1000 (firm and rotten) h of Delay Time (DT) was 0.876, 7.949, 5.413, 3.763 and 0.886 Mg ha<sup>-1</sup> respectively, with an average of 5.164 Mg ha<sup>-1</sup>. While the load in fine fuels was 5.383 (litter) and 11,260 (fermentation layer) Mg ha<sup>-1</sup>. On the other hand, the load of aerial live fuels (biomass) turned out to be 176.5 Mg ha<sup>-1</sup>. Dead fuel loads are not high compared to areas where forestry activities are excluded. However, it is recommended that fire prevention activities be continuous, such as the renovation of fire cuts, pruning and burning of residues. In the mapping task, the regression models that best described the aerial loads had an exponential form and the red and infrared (NIR) bands were used. The wood fuel models were also exponential in form but used the blue and red band. It is recommended to use these models under similar conditions for volume and biomass estimates because in the fuel loads there is more variation.

Key words: fire, forest management, fire prevention, remote sensing

### 4.3 Introducción

El manejo forestal es una estrategia de manejo de recursos naturales (Aguirre, 2015) que implica el conjunto de prácticas silvícolas que se ejecutan con el objetivo de incrementar la productividad del bosque de manera ordenada, referida básicamente a la parte maderable, condicionando su aprovechamiento bajo regulaciones (cuestiones legislativas) y tratamientos forestales (cuestiones técnicas, silviculturales y ecológicas).

El manejo de combustibles, como parte del manejo del fuego, es parte de las acciones encaminadas a reducir la posibilidad de que se presenten incendios forestales no deseados o, de hacerlo, que sean de menores intensidad y severidad y más fáciles de controlar. Tal manejo está insertado en el del bosque (Scott *et al.*, 2014).

El Manejo Forestal Sustentable en la Sierra de Huayacocotla, Veracruz es una pieza clave en la planeación estratégica para los programas de conservación y aprovechamiento en México. Mismo que se encuentra regida por el esquema del Método de Desarrollo Silvícola (MDS). El método surgió como una alternativa para la planeación del aprovechamiento de bosques de clima templado y frío de México, tratando de obtener el máximo potencial productivo mediante la secuencia cíclica de intervenciones silvícolas (Ramírez, 2017).

El objetivo principal del presente estudio fue relacionar las cargas de combustibles forestales con áreas bajo diferentes tratamientos silvícolas (regeneración por árboles padre, podas y preaclareos, aclareos, cortas se regeneración y cortas de liberación) y mapear su distribución en toda el área de estudio con técnicas de regresión como método de obtención de modelos y álgebra de imágenes satelitales como medio de extrapolación.

## 4.4 Materiales y métodos

### 4.4.1 Área de estudio

El trabajo de campo se llevó a cabo en el ejido Viborillas Ojo de Agua, localizado en el municipio de Huayacocotla (Estado de Veracruz). Tiene una población aproximada de 500 habitantes, considerado uno de los pueblos más poblados del municipio, ocupando el lugar número 9.

Su localización geográfica se encuentra en las coordenadas geográficas 20°29'20.4" de latitud Norte y 98°30'14.4" de longitud Oeste, referidas al meridiano de Greenwich, presenta un rango altitudinal de 2,280 a 2,300 msnm (Figura 16).

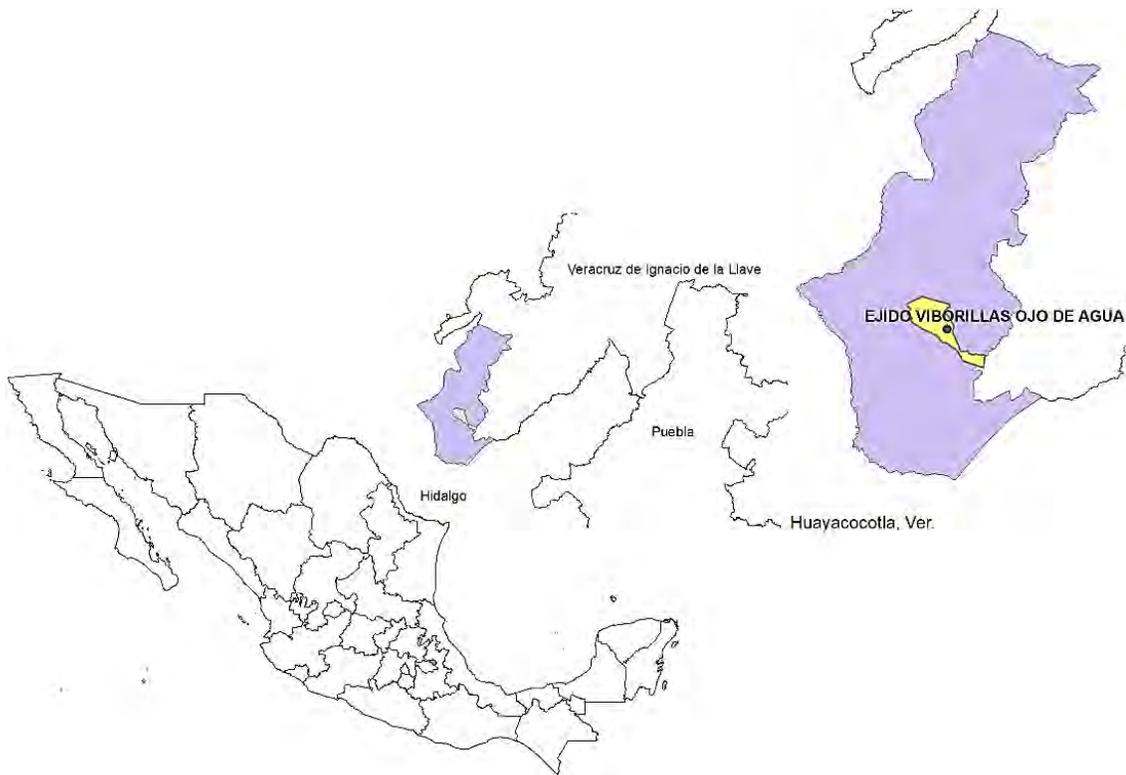


Figura 16. Localización del Ejido V. Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

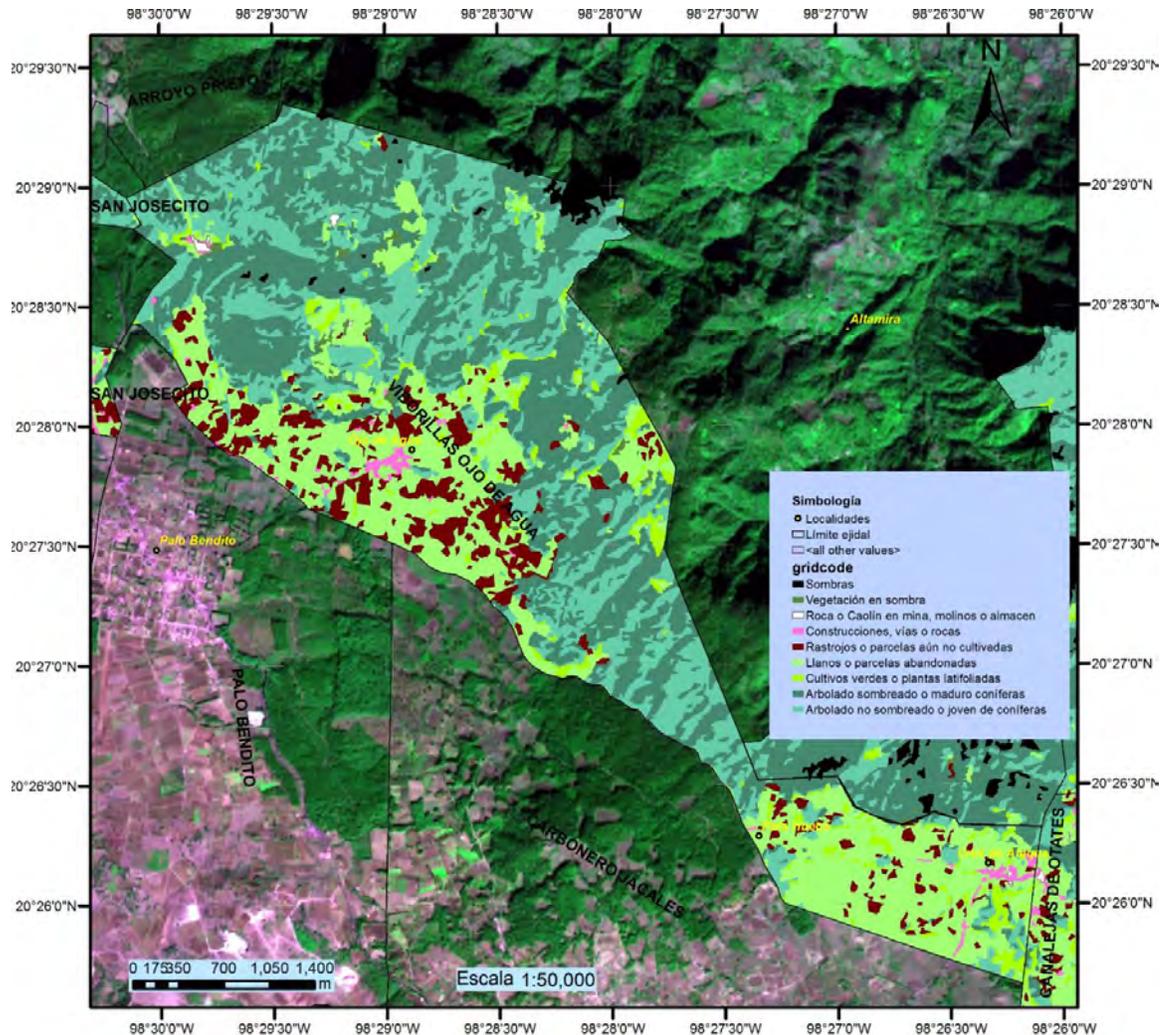


Figura 17. Uso del suelo y vegetación en el Ejido Viborillas Ojo de Agua con base en reclasificación supervisada por el método el vecino más cercano.

Fuente: Modificado de RAN (2017) y USGS (2018).

### Método de Desarrollo Silvícola

El área de estudio se encuentra bajo el esquema del Método de Desarrollo Silvícola (MDS), caracterizado por la rodalización de áreas homogéneas que son sujetas a diferentes tratamientos silvícolas, tales como preaclareos y podas, aclareos, cortas de regeneración y cortas de liberación; así como, método de regeneración por árboles padre. Este proceso es paulatino por lo que en la mayoría de los casos estos tratamientos no están tan remarcados, es decir, se encuentran en un punto intermedio de un tratamiento a otro.

## **4.5 Estimación de cargas de combustibles forestales**

El muestreo para calcular las cargas se realizó para los siguientes tipos de combustibles forestales: superficiales (leñas y hojarasca), subterráneos (capa de fermentación) y aéreos (biomasa).

### **4.5.1 Combustibles superficiales**

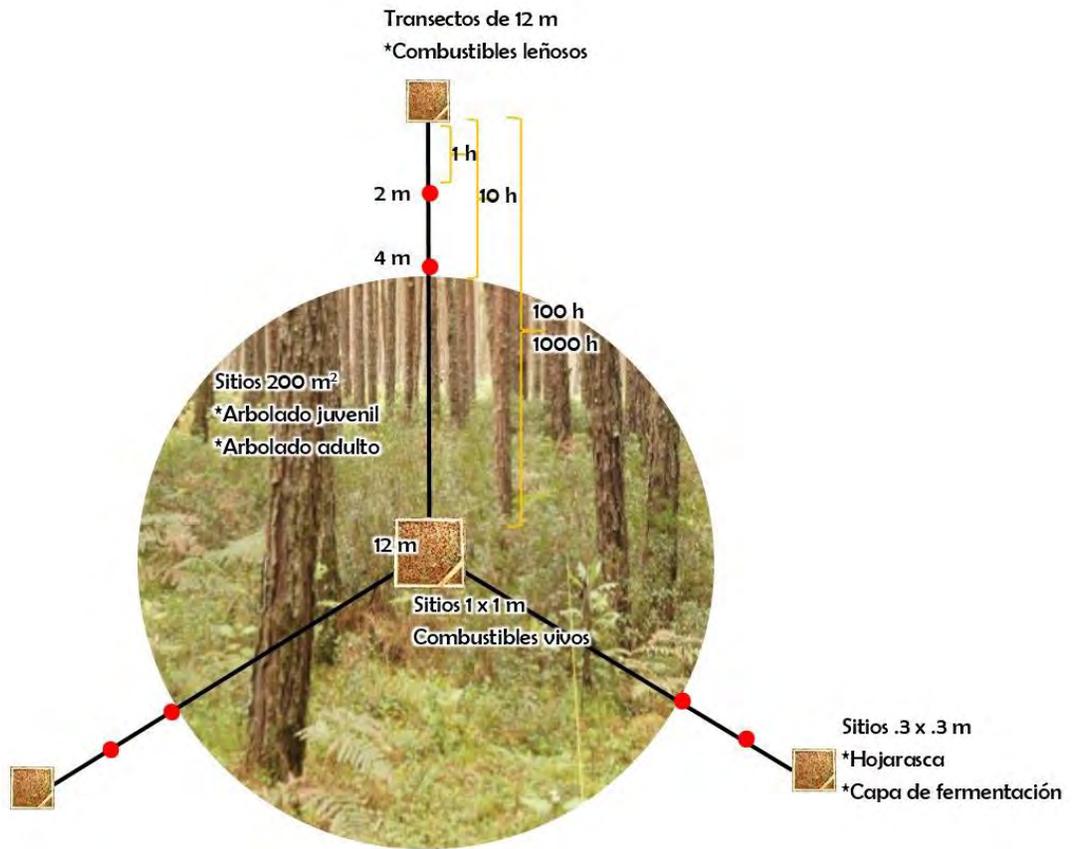
El muestreo *in situ* de la carga de combustibles leñosos se llevó cabo mediante la metodología de intersecciones planares descrita por Brown (1974) adaptado por Sánchez y Zerecero (1983) y Morfín-Ríos *et al.* (2012).

Se realizaron un total de 43 conglomerados que abarcaron los diferentes tratamientos silvícolas mencionados previamente.

Los conglomerados fueron diseñados tal y como se observa en la Figura 18 con el objetivo de captar la mayor variación posible en el sitio dado, estos sitios estuvieron conformados por tres líneas de muestreo de combustibles leñosos: la primera se orientó al norte franco ( $0^\circ$ ) y las otras dos se ubicaron a partir del final de la línea, con una separación de  $120^\circ$  cada una (a  $120^\circ$  y  $240^\circ$ ).

Las tres líneas del conglomerado fueron de 12 m, y cada una de ellas se marcó a 2, 4 y 12 m desde el punto extremo hacia la unión de las líneas. El conteo de frecuencias de los combustibles leñosos intersecados se clasificó según su tiempo de retardo (TR): para combustibles de 1 h TR se utilizó el segmento de 0-2m, para los de 10 h TR el segmento de 2-4 m, y en los 12 m se contabilizaron combustibles de 100 h TR y en caso de encontrar combustibles de 1000 h TR, se registraron sus diámetros, estos últimos clasificados por su estado de descomposición (firmes o podridos).

Al final de cada línea se instalaron cuadrantes de 30 x 30 cm, para la determinación de la carga de combustibles finos (hojarasca y capa de fermentación).



**Figura 18. Diseño de muestreo**

Como se mencionó anteriormente, para el muestreo de combustibles se deben de considerar ciertas características y unidades de muestreo específicas. El Cuadro 12, Cuadro 13 y Cuadro 14 sintetizan de manera breve y clara como hacer la correcta planificación del muestreo.

**Cuadro 12. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles superficiales (Rodríguez, 2015).**

<b>Tipo de combustible</b>	<b>Mediciones en campo</b>	<b>Estimaciones en laboratorio</b>	<b>Unidades de muestreo utilizadas</b>
Leñas	Número de intersecciones con líneas de muestreo y diámetros de materiales con 1000 h de TR	Submuestreo de materiales para determinar gravedad específica	Líneas de intersecciones planares
Hojarasca	Cobertura (%) y profundidad (m)	Peso seco	Cuadrantes de 0.3 m x 0.3 m
Tocones	Número de intersecciones con líneas de muestreo y diámetros de materiales con 1000 h de TR	Submuestreo de materiales para determinar gravedad específica	Líneas de intersecciones planares
Gramíneas	Cobertura (%) y altura (m)	Peso seco	Cuadrantes de 1 x 1m
Herbáceas dicotiledóneas	Cobertura (%) y altura (m)	Peso seco	Cuadrantes de 1 x 1m
Arbustos	Cobertura (diámetros mayor y menor, en m) y altura (m)	Peso seco	Cuadrantes de 1 x 1m
Renuevo	Cobertura (%) y altura (m)	Peso seco y submuestreo de materiales para determinar gravedad específica	Cuadrantes de 1 x 1m
Musgos	Cobertura (%) y profundidad (m)	Peso seco	Cuadrantes de 0.3 m x 0.3 m

**Cuadro 13. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles subterráneos (Rodríguez, 2015).**

<b>Tipo de combustible</b>	<b>Mediciones en campo</b>	<b>Estimaciones en laboratorio</b>	<b>Unidades de muestreo utilizadas</b>
Capa de fermentación	Cobertura (%) y profundidad (m)	Peso seco	Cuadrantes de 0.3 m x 0.3 m

**Cuadro 14. Síntesis de características de diversas unidades de muestreo para combustibles aéreos (Rodríguez, 2015).**

<b>Tipo de combustible</b>	<b>Mediciones en campo</b>	<b>Estimaciones en laboratorio</b>	<b>Unidades de muestreo utilizadas</b>
Arbolado juvenil	Cobertura (diámetros mayor y menor, en m) y altura (m)		Cuadrantes de 1 x 1m
Arbolado adulto	Cobertura (%) y altura (m)		Cuadrantes de 1 x 1m
Epífitas	Cantidad	Submuestreo para determinar peso seco	Cuadrantes de 0.3 m x 0.3 m

Para determinar la carga del combustible fino (hojarasca y capa de fermentación), se tomaron muestras de los cuadrantes de 30 x 30 cm y para cada una de ellas se registró el peso en campo y el peso seco, mismos que se utilizaron para obtener el peso anhidro. Cabe señalar que cada muestra contenía hojarasca o en el caso de la capa de fermentación residuos de material combustible, para ello, se eliminó cualquier exceso de tierra o combustibles leñosos. Para obtener el peso seco o anhidro, cada muestra se colocó en una bolsa de cartón y se introdujo en una estufa de secado casera que consistió en una caja de madera forrada de papel aluminio y una distribución lineal de focos incandescentes de 100 watts. Lo anterior se empleó de esta manera, debido al cierre de las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo derivado por la situación de emergencia sanitaria. Las muestras permanecieron ahí hasta que alcanzaron un peso constante.

Posteriormente se aplicó la siguiente fórmula para obtener el contenido de humedad base expresado en porcentaje de nuestras muestras:

$$CH_o = \frac{p_v - p_o}{p_o} \times 100$$

Donde:

CH = Porcentaje de humedad, expresado en porcentaje.

P<sub>v</sub> = Peso fresco del combustible obtenido en campo.

P<sub>o</sub> = Peso seco o anhidro obtenido por la desecación en estufa de secado casera.

El peso anhidro de la hojarasca y capa de fermentación de un sitio del conglomerado de (0.09m<sup>2</sup>) (g), se ponderó al área (m<sup>2</sup>). El valor obtenido fue la carga estimada en gm<sup>-2</sup>. Para calcular la carga del conglomerado, se promedió la carga de los tres cuadrantes de 0.3x0.3m, posteriormente se extrapolo a Mgha<sup>-1</sup>. Finalmente, el promedio de todos los conglomerados de muestreo correspondió a la carga de combustibles finos en el ejido de Viborillas Ojo de Agua, Veracruz.

Por otro lado, para poder efectuar los cálculos de la estimación de carga en materiales leñosos (Mg ha<sup>-1</sup>) por cada categoría, se utilizaron las fórmulas de

Brown (1974) adaptadas por Sánchez y Zerecero (1983). Como se mencionó anteriormente, las fórmulas de Brown (1974) son famosas en todo el mundo y muchos autores las emplean para la estimación de combustibles. Sin embargo, el método de Brown (1974) se basa en los fundamentos de Van Wagner (1968). Brown (1974) utilizó gravedades específicas enfocado a bosques de coníferas del noroeste de Estados Unidos y aunque el cálculo es aceptable, lo ideal sería obtener muestras de materiales leñosos y medir su volumen y peso inmediatamente. Con ello podríamos determinar la densidad de cada partícula al momento de muestreo dividiendo su peso en su volumen (Rodríguez, 2015).

Estas fórmulas se presentan en el Cuadro 15, solo con el objetivo de ilustrar al lector. Modelos de Brown, con base en Van Wagner (1982).

**Cuadro 15. Ecuaciones para estimar la carga de combustibles forestales (Brown, 1974).**

Clase	Diámetro (cm)	Ecuación
1 h (zacates, hojas, ramillas finas)	<0.6	$P = \frac{0.484 F C}{N l}$
10 h (ramillas)	0.6-2.5	$P = \frac{3.369 F C}{N l}$
100 h (ramas)	2.5-7.5	$P = \frac{36.808 F C}{N l}$
1000 h (ramas gruesas y troncos)	>7.5 (firme)	$P = \frac{1.46 \sum d^2 C}{N l}$
	>7.5 (podrido)	$P = \frac{1.21 \sum d^2 C}{N l}$

Donde:

P = Carga o peso seco de los combustibles, expresado en toneladas métricas por hectárea ( $Mg\ ha^{-1}$ ),

n = Frecuencia o número de intersecciones,

C = Factor de corrección por pendiente

$\sum d^2$  = Suma de los cuadrados de los diámetros,

NL = Longitud total de la línea de muestreo o suma de las longitudes de las líneas en pies lineales.

Es importante incluir la fórmula para calcular el factor de corrección por

pendiente, sea cual sea el método propuesto, será necesario calcular ese dato.

La fórmula es:

$$C = \sqrt{1 + \frac{\% \text{ de pendiente}^2}{100}}$$

Sim embargo, para agilizar el trabajo de los cálculos de estimación de cargas, también incluimos los factores de corrección por pendiente (Cuadro 3) para las líneas de muestreo de combustibles leñosos (Brown, 1974).

**Cuadro 16. Factores de corrección por pendiente para las líneas de muestreo de combustibles leñosos (Brown, 1974).**

Pendiente (%)	Factor de corrección
0	1.00
10	1.00
20	1.02
30	1.04
40	1.08
50	1.12
60	1.17
70	1.22
80	1.28
90	1.35
100	1.41
110	1.49

El método de Brown (1974) está cimentado en los fundamentos de Van Wagner (1968). Sin embargo, Brown (1974) utilizó gravedades específicas enfocadas a bosques de coníferas del noroeste de Estados Unidos y aunque el cálculo es aceptable, lo ideal sería obtener muestras de materiales leñosos y medir su volumen y peso inmediatamente. Con ello podríamos determinar la densidad de cada partícula al momento de muestreo dividiendo su peso en su volumen (Rodríguez, 2015).

El método de Van Wagner (1985) utiliza la siguiente ecuación para la evaluación de combustibles leñosos de 1 a 100 h de TR, su resultado lo arroja en toneladas

métricas (t=megagramos, Mg) (Morfín *et al.*, 2012):

$$C = \frac{k * DB * DCP * f * c}{NL}$$

Donde,

C = Carga o peso seco de los combustibles, expresado en toneladas métricas por hectárea (Mg ha<sup>-1</sup>),

k = Derivada de la gravedad específica del agua y de factores de conversión para obtener la carga en Mg ha<sup>-1</sup>, el factor es 1.234,

DB = Densidad específica o gravedad específica de la madera (g cm<sup>-3</sup>),

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

f = Frecuencia de los combustibles intersectados (Clasificados en 1, 10 o 100 h de TR),

c = Factor de corrección de la pendiente,

NL = Longitud de las líneas de muestreo (m).

Para el caso de los combustibles de 1000 h de tiempo de retardo se realiza una modificación a la ecuación que queda de la siguiente forma:

$$C = \frac{k * DB * \Sigma DC * c}{NL}$$

Donde,

ΣDC = Es la sumatoria de los diámetros cuadráticos obtenidos durante el muestreo.

La suma de la carga de los diferentes combustibles leñosos correspondió a la carga total por transepto, así mismo el promedio de las cargas de los tres transeptos de cada conglomerado correspondió a la carga total de cada sitio.

## 4.5.2 Combustibles aéreos

### Volumen

Con los datos de los atributos dendrométricos de diámetro normal ( $d$ ) y altura ( $h$ ) se procedió a calcular el volumen individual con base en el modelo de predicción provisto por Monroy Rivera (1997) para la especie dominante (*Pinus patula*) en la región de estudio (Huayacocotla, Veracruz), el cual relaciona las variables del producto del cuadrado del diámetro normal con la altura total ( $d^2h$ ), inicialmente el modelo estadístico fue propuesto por Sloboda (1984).

Modelo estadístico:  $V = \exp(\beta_0 + \beta_1 * \ln(d^2h)) = e^{\beta_0 + \beta_1 * \ln(d^2h)}$

Modelo de predicción:  $V = \exp(-9.80835 + 0.964638 * \ln(d^2h))$

Donde  $V$  es el volumen ( $m^3$ ),  $d$  es el diámetro (cm),  $h$  es la altura (m),  $\exp()$  y  $e$  es la función exponencial,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los parámetros del modelo y  $\ln$  es el logaritmo natural.

Para obtener lo anterior, Monroy Rivera (1997) obtuvo datos de la cubicación de la reconstrucción de 70 árboles dominantes (260 trozas) y ajustó 6 modelos para la elección posterior del más óptimo. Encontró evidencia altamente significativa de la relación existente entre el producto  $d^2h$  como predictores del volumen de árboles individuales, coeficiente de correlación ( $r$ ) de 96.46% y proporción de la varianza explicada de un de 93.08% (pseudor<sup>2</sup>).

No debe pasarse por alto que la suma del volumen de los árboles individuales representa el volumen por sitio, mismo que se escala al nivel de hectárea para que sea comparable con otros estudios.

### Biomasa

Para el cálculo de la biomasa individual se utilizó el modelo de predicción provisto por Soriano-Luna *et al.* (2015) para la misma especie de una zona contigua, semejante en todo sentido a la de estudio, Zacualtipán, Hidalgo.

Modelo de predicción:  $B_t = \exp(-4.554805) (d^2h)^{1.047218}$

Donde  $B_t$  es la biomasa aérea total (fuste, ramas, corteza y follaje, en kg),  $d$  es el diámetro (cm),  $h$  es la altura (m),  $\exp()$  y  $e$  es la función exponencial.

Para generar esta ecuación, Soriano-Luna *et al.* (2015) siguieron la siguiente metodología. Realizaron ajuste de datos provenientes de muestreo destructivo de 25 árboles de *Pinus patula*. Las muestras se deshidrataron en laboratorio hasta peso constante en una estufa con aire de circulación forzada a 70 °C. Con los datos de peso húmedo y peso seco se determinó el contenido de humedad y el factor de la relación peso seco de cada componente (fuste, ramas, corteza y follaje). La biomasa aérea total se estimó multiplicando el peso fresco por el factor peso seco. La biomasa aérea total de cada árbol se obtuvo como la suma de la biomasa de los componentes estructurales mencionados

#### **4.5.3 Mapeo de combustibles forestales**

Para el mapeo de los combustibles forestales se adquirió una imagen satelital de la misión Sentinel 2A a nivel de procesamiento L2A, de libre acceso (ESA, 2020a). La fecha de adquisición fue 28 de noviembre de 2020, lo ideal hubiera sido que fuera lo más inmediata posible con respecto a la fecha del muestreo. Sin embargo, las condiciones ambientales lluviosas y nubosas no lo permitieron puesto que las imágenes inmediatas posteriores incluían más del 60% de nubes.

Las imágenes provenientes de dicha flota presentan las especificaciones técnicas que se muestran en el Cuadro 17.

**Cuadro 17. Especificaciones técnicas de las imágenes satelitales Sentinel 2A.**

Nombre	Resolución (m)	Longitud de onda (nm)	Amplitud de onda (nm)	Propósito
B01	60	443	20	Detección de aerosoles
B02	10	490	65	Azul
B03	10	560	35	Verde
B04	10	665	30	Rojo
B05	20	705	15	
B06	20	740	15	Clasificación de vegetación
B07	20	783	20	
B08	10	842	115	Infrarrojo cercano (NIR)
B08A	20	865	20	Clasificación de vegetación
B09	60	945	20	Vapor de agua
B10	60	1375	30	Cirrus
B11	20	1610	90	Discriminación de nieve,
B12	20	2190	180	hielo y nubes

Fuente: ESA (2021b)

En resumen, poseen 13 bandas espectrales en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de longitud de onda corta. Además, el formato digital es JPEG2000. La resolución espacial varía de 10 a 60 metros mientras que la temporal es de 5 días. El tamaño de los mosaicos es de 100 km por 100 km con proyección UTM WGS84, los cuales ya están ortorectificados. Los valores de las imágenes (datos espectrales o números digitales) a este nivel de procesamiento son reflectancia de la parte inferior de la atmósfera (BOA, por sus siglas en inglés) (ESA, 2021a), por lo anterior, no es necesario realizar algún otro procesamiento previo a su empleo.

Se parte del hecho que Torres-Vivar *et al.* (2017) indican alta correlación de las variables dendrométricas (especies y zonas similares a las estudiadas) con la banda del infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés) en un sensor SPOT 6. También indican la utilidad de la inclusión de las bandas del espectro visible y del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés). En la búsqueda de modelos óptimos se utilizan sus modelos como punto de partida. El NDVI se define a su vez como:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

Donde NDVI es el índice de vegetación de diferencias normalizadas (1/1), Rojo es la banda visible roja y los demás términos ya han sido explicados.

Debido a que el trabajo se centró en una localidad muy particular y por consiguiente presenta una escala espacial pequeña, se consideró el uso de las bandas de mayor resolución espacial, esto es 10 m: bandas 02, 03, 04 y 06. Que también son las bandas que se han usado en estudios de naturaleza similar (Torres-Vivar *et al.*, 2017).

Por lo anterior, se probaron diferentes modelos de regresión lineal múltiple y no lineal que incluyeran las bandas anteriores para relacionar dicha información satelital con las cargas de combustibles forestales en mención. Las medidas de desempeño que se tomaron en cuenta fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que cuantifica la variabilidad en los datos que es explicada por el modelo, así como el error típico que es una expresión del error y la significancia estadística (modelo y coeficientes) que es la probabilidad de “equivocarse” al aceptar una hipótesis. El coeficiente de correlación ( $r$ ) se tomó en cuenta para expresar la relación lineal entre las variables. Los modelos que se probaron se encuentran en el Cuadro 18.

**Cuadro 18. Modelos probados para cartografiar los combustibles.**

<b>Cargas o atributos</b>	<b>Modelo</b>
y: Carga (C), Volumen total (V) o Biomasa total ( $B_t$ )	Lineal: $y = \beta_0 + \beta_1 B_i$ (lineal simple)
	No lineal: $y = \beta_0 B_i^{\beta_1}$ (potencial)
	$y = \beta_0 \exp(-\beta_1 B_i) = \beta_0 e^{(-\beta_1 B_i)}$ (exponencial)
	$y = \beta_0 \exp(-\beta_1 B_i) = \beta_0 e^{(-\beta_1 B_i^2 B_j^2)}$
	Lineal múltiple: $y = \beta_0 + \beta_1 B_{08} + \beta_2 NDVI + \beta_3 B_{04}$
	$y = \beta_1 B_{08} + \beta_2 NDVI + \beta_3 B_{04}$
	$y = \beta_1 B_{08} + \beta_2 NDVI + \beta_3 B_{04} + \beta_4 B_{02}$
$y = \beta_0 + \beta_1 B_{08} + \beta_2 NDVI + \beta_3 B_{04} + \beta_4 B_{02}$	

**Fuente: Modificaciones a los trabajos de Torres-Vivar *et al.* (2017) y aportes propios.**

Dónde:

$C$  = Carga (Mg/ha)

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

$B_t$  = Biomasa total (Mg o t)

NDVI = Índice de vegetación de diferencias normalizadas.

$\beta_0, \dots, \beta_j$  = Parámetros de los modelos, la designación  $B_i$  y  $B_j$  y un código adicional designa al nombre de la banda de la imagen satelital considerada (02, 03, 04 y 08).

Una vez que se seleccionó el modelo con el mejor desempeño, se usó la herramienta Calculadora ráster de ArcMap (ESRI, 2019) para mapear los combustibles forestales al realizar la respectiva álgebra de mapas con las estimaciones de los parámetros, así como con las bandas satelitales. No sin antes escalar los valores de los combustibles al tamaño de pixel utilizado (10 m de lado, 100  $m^2$  de área) para una representación adecuada de los atributos. Finalmente, los usos de suelo que eran diferente al forestal se recortaron de los mapas anteriores debido a que presentaban valores inexistentes e incoherentes (Torres-Vivar *et al.*, 2017).

## 4.6 Resultados y discusión

### Tratamientos silvícolas

De manera ilustrativa se incluyen los tratamientos silvícolas encontrados en la zona de estudio (Figura 19).



Figura 19. Tratamientos silvícolas. (a) Regeneración. (b) Preaclareo, poda y chaponeo (próximo a corta de liberación). (c) Primer aclareo. (d) Segundo aclareo. (e) Corta de regeneración. Fotos: Claudia Ortega, 2020.

La estructura de los rodales con diferentes tratamientos silvícolas (anteriormente mencionados) se presenta en la Figura 20. En ella se observa que la vegetación predominante en el estrato superior es *Pinus patula*. Además, se tiene que las dimensiones del arbolado van en aumento conforme avanza el ciclo de corta, mientras que la densidad de arbolado disminuye. Este comportamiento es consistente para bosques bajo manejo de tipo coetáneos y regulares (Clutter, *et al.*, 1983).

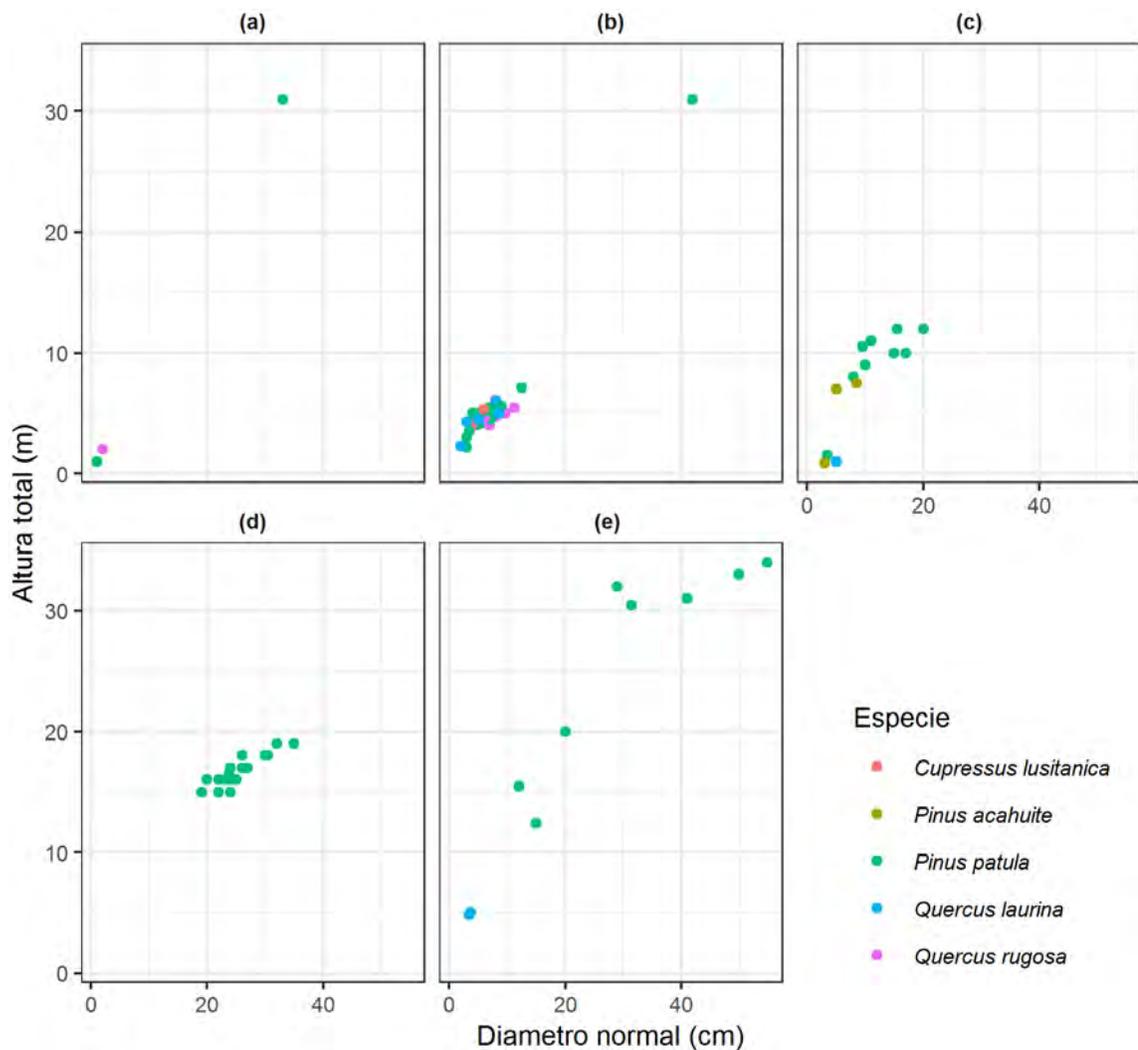


Figura 20. Diagramas de dispersión de altura y diámetro de los diferentes tratamientos silvícolas. (a) Regeneración. (b) Preaclareo, poda y chaponeo (próximo a corta de liberación). (c) Primer aclareo. (d) Segundo aclareo. (e) Corta de regeneración.

#### 4.6.1 Combustibles superficiales

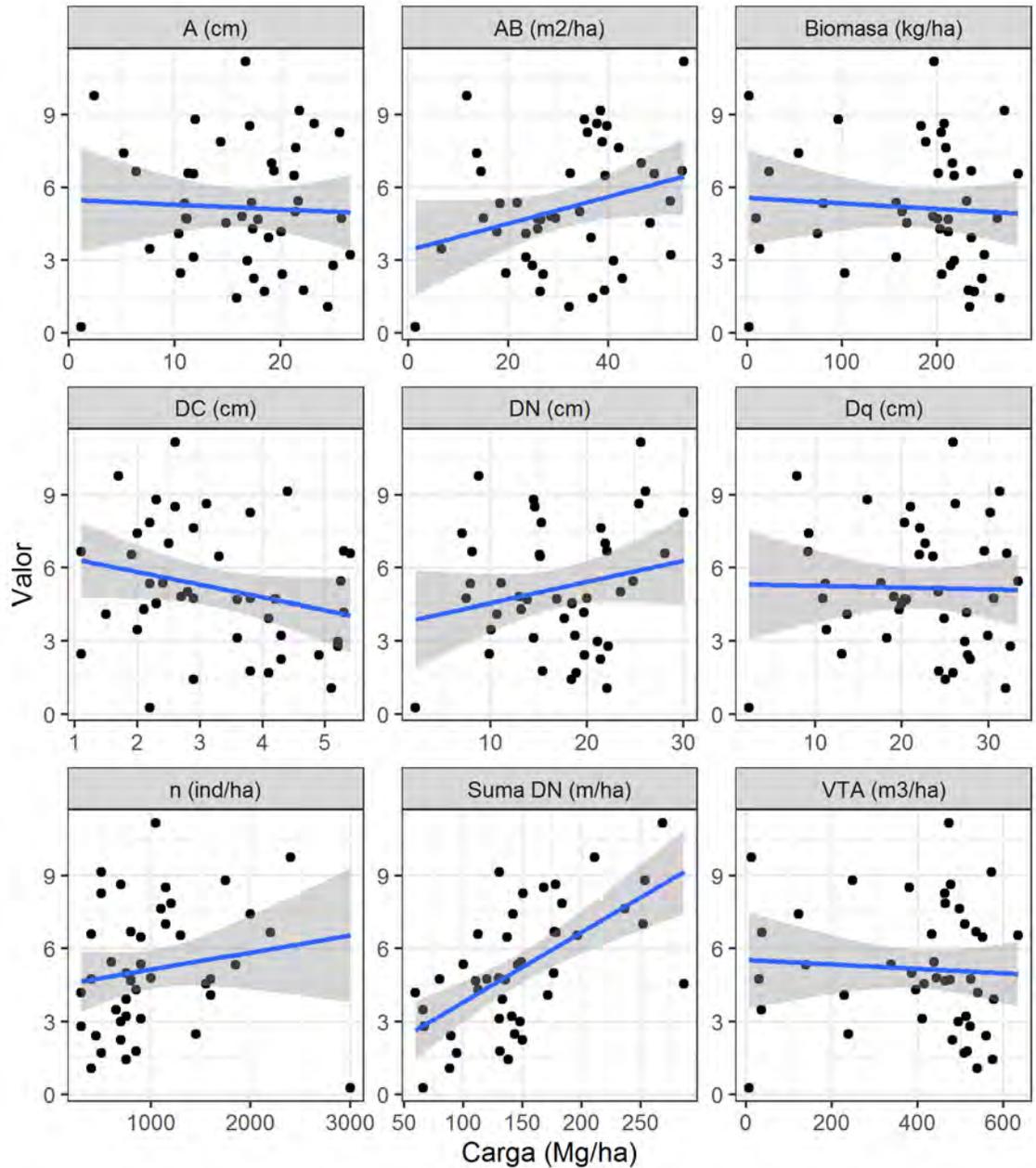
##### Combustibles leñosos

Se buscaron cuáles relaciones son mejores para predecir las cargas (Figura 21), esto es, atributos dendrométricos que más se relacionan con la carga. Se encontró que la suma del diámetro tiene una relación lineal moderada con la carga (Figura 22)

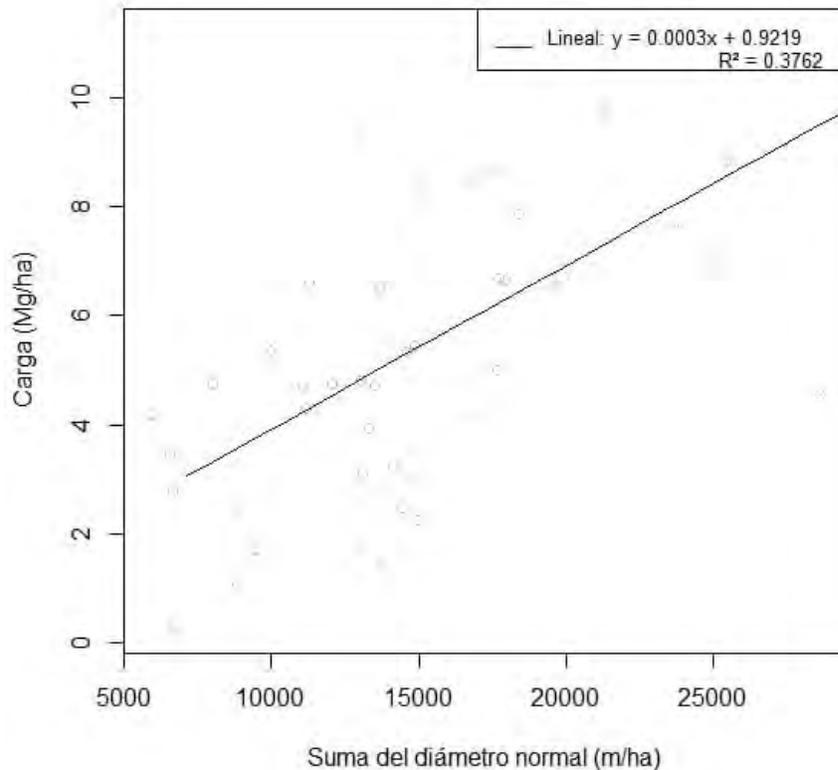
Villers *et al.* (1998) y Muñoz *et al.* (2005) reportaron en promedio una disponibilidad de 0.04 a 0.70 Mg ha<sup>-1</sup> de 1 h en bosques templados, específicamente con *Abies* sp., *Pinus montezumae* Lamb y *Pinus patula* Schltdl et Cham. Mientras que en este estudio se registró una disponibilidad de 0.121 a 0.757 Mg ha<sup>-1</sup>, con una carga promedio de 0.292 Mg ha<sup>-1</sup> para bosque de *Pinus patula* Schltdl et Cham, por lo que los resultados son equiparables.

En cuanto a los combustibles de 10 h, el rango de disponibilidad que se registró fue de 0 a 7.683 Mg ha<sup>-1</sup> con una carga promedio de 2.65 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que Villers *et al.* (1998) obtuvo que la carga promedio de combustibles de esta categoría resultó ser de 0.68 ton ha<sup>-1</sup>, esta diferencia se le atribuye a que en el estudio de Villers *et al.* (1998) las comunidades de bosque evaluadas correspondieron a un Área Natural Protegida: Parque Nacional Nevado de Toluca, en tanto que, en este estudio, la variación de cargas está dada por los diferentes tratamientos silvícolas.

La carga promedio del ejido Viborillas Ojo de Agua fue de 5.64 Mg ha<sup>-1</sup> con una desviación estándar de 2.582 Mg ha<sup>-1</sup>. Esto indica que la carga promedio es baja, sin embargo, el extremo superior fue de 11.175 Mg ha<sup>-1</sup> que corresponde a un sitio ubicado en un rodal que próximamente se someterá a un tratamiento silvícola: corta de regeneración, cuyos arboles presentan los atributos de mayores dimensiones medias que se observaron en campo.



**Figura 21. Diagramas de dispersión de la carga con atributos dendrométricos del arbolado.** En la Figura 21 se observa que la mayor relación encontrada fue con la suma de diámetro cuadrático, no tanto con la densidad (árboles por ha) debido a que para algunos sitios, por ejemplo, el tratamiento silvícola: 1) regeneración y 2) preclareo, poda y chaponeo a veces coincidían en el número de árboles por ha pero los valores de sus cargas diferían entre sí. Lo anterior se atribuye a la intervención antropogénica de la zona.



**Figura 22. Relación de la carga calculada con el método de Van Wagner con la suma del diámetro normal por hectárea.**

Carga ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) como función de la suma del diámetro normal.

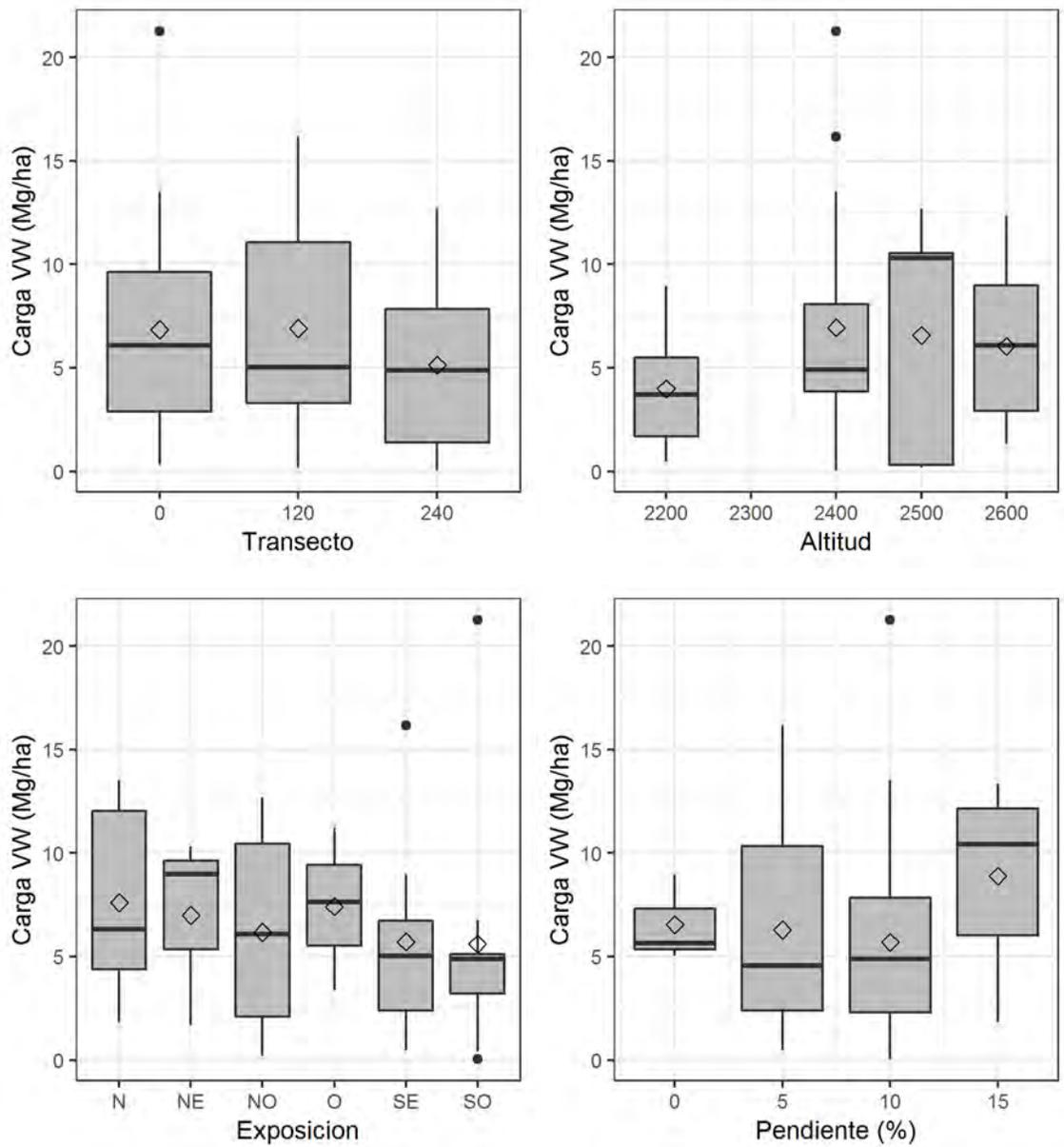
Se obtuvieron las siguientes estadísticas de la regresión: coeficiente de correlación múltiple ( $r$ ) de 0.613, coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.376,  $R^2$  ajustado de 0.361 y un error típico ( $S_x$ ) de 2.064. El ANOVA se presenta a continuación.

**Cuadro 19. Análisis de varianza del modelo**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Regresión	1	105.3266	105.3266	24.7215	0.000012
Residuos	41	174.6814	4.2605		
Total	42	280.008026			

**Cuadro 20. Estimaciones, significancia e intervalos de confianza de los parámetros del modelo**

$\widehat{\beta}_i$	<b>Estimación</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>p-valor</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
$\widehat{\beta}_0$	0.9219	0.9093	1.0139	0.3166	-0.9145	2.7583
$\widehat{\beta}_1$	0.00029	5.78E-05	4.972	1.2E-05	0.00017	0.0004



**Figura 23. Gráficos de cajas de la carga con respecto a transecto, altitud, exposición y pendiente.**

## Combustibles finos

Esta sección incluye información de la carga de combustibles de la hojarasca y capa de fermentación (Figura 24, Figura 25 y Figura 21). Cabe señalar que la humedad fue relativamente alta (138.36%) debido a los meses en que se realizó el muestreo, agosto-septiembre, caracterizados por lluvias constantes y abundantes aunado a que la zona se encuentra en una región de barlovento.

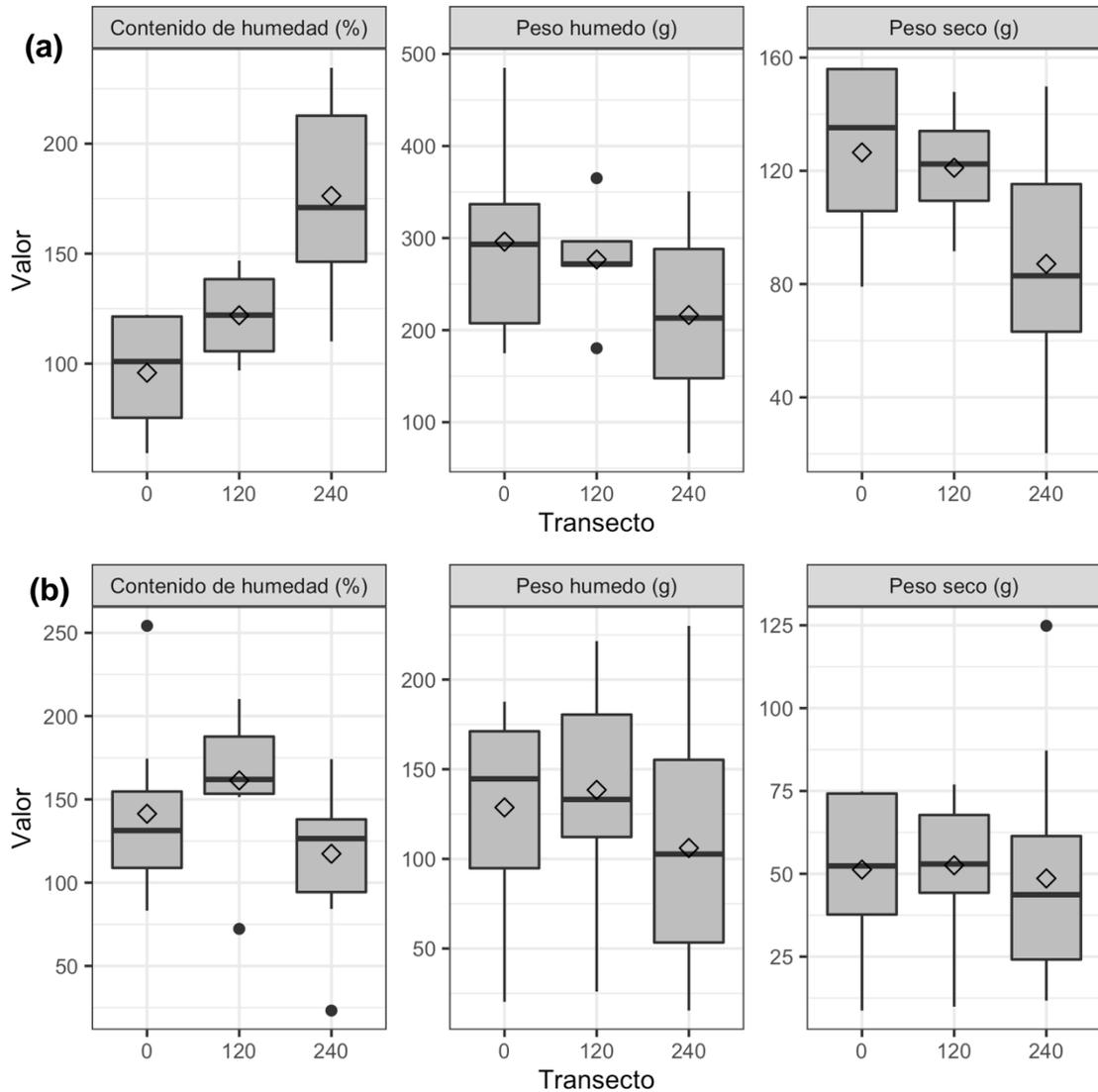
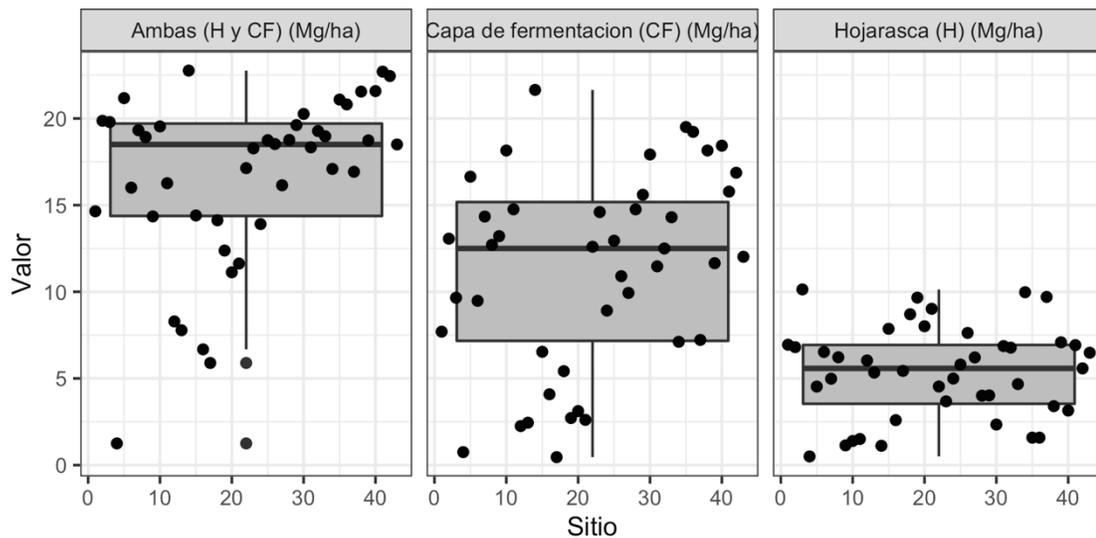


Figura 24. Gráficos de cajas del contenido de humedad, peso húmedo y peso seco de (a) la hojarasca y (b) la capa de fermentación.

**Cuadro 21. Resumen de la hojarasca y capa de fermentación.**

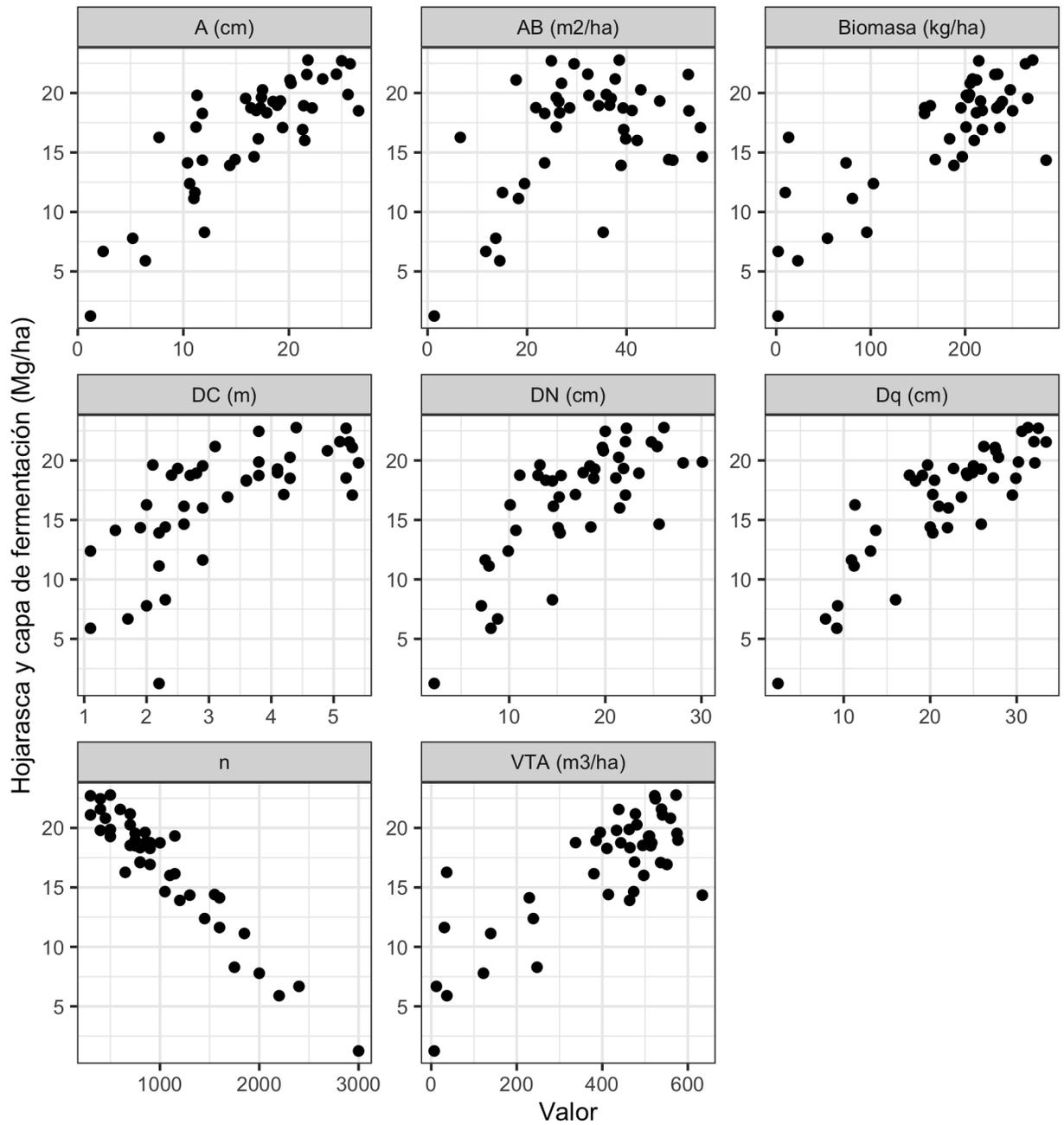
	Hojarasca (Mg/ha)	Capa de fermentación (Mg/ha)	Hojarasca y capa de fermentación (Mg/ha)
Media	5.383	11.260	16.643
S <sub>x</sub>	2.656	5.707	4.925
Mínimo	0.500	0.458	1.250
Mediana	5.580	12.500	18.502
Máximo	10.137	21.650	22.764

**Sx: desviación estándar muestral.**



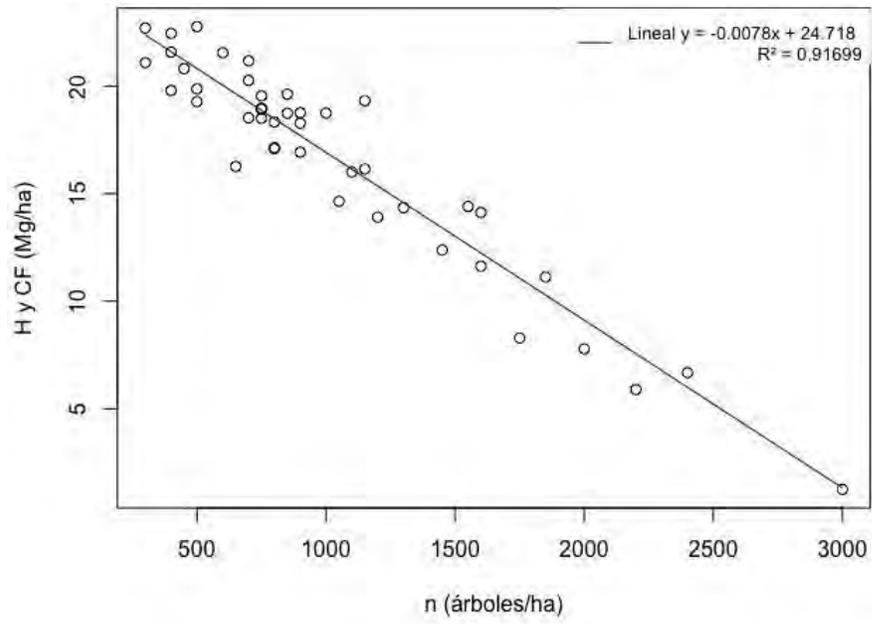
**Figura 25. Gráfico de cajas de la hojarasca y capa de fermentación.**

De la Figura 26 se puede observar que la relación lineal más evidente de la hojarasca y la capa de fermentación fue con el número de árboles por hectárea (n), seguido del diámetro cuadrático promedio (Dq).



**Figura 26. Diagramas de dispersión de la hojarasca y la capa de fermentación con respecto a atributos dendrométricos medidos y calculados.**

Debido a lo anterior, se ajustó un modelo lineal para ilustrar la primer condición mencionada (Figura 29). El modelo ( $y=-0.0078x+24.718$ ) presentó un  $R^2$  de 0.91699 y coeficientes altamente significativos.



**Figura 27. Diagrama de dispersión de la hojarasca y la capa de fermentación con la densidad de árboles**

#### 4.6.2 Combustibles aéreos

En el siguiente gráfico se incluye la relación del número de árboles por hectárea con su respectivo atributo dendrométrico, en otras palabras, la densidad de los atributos encontrados (Figura 28). Los cuales, fueron los insumos para poder calcular el volumen y la biomasa total.

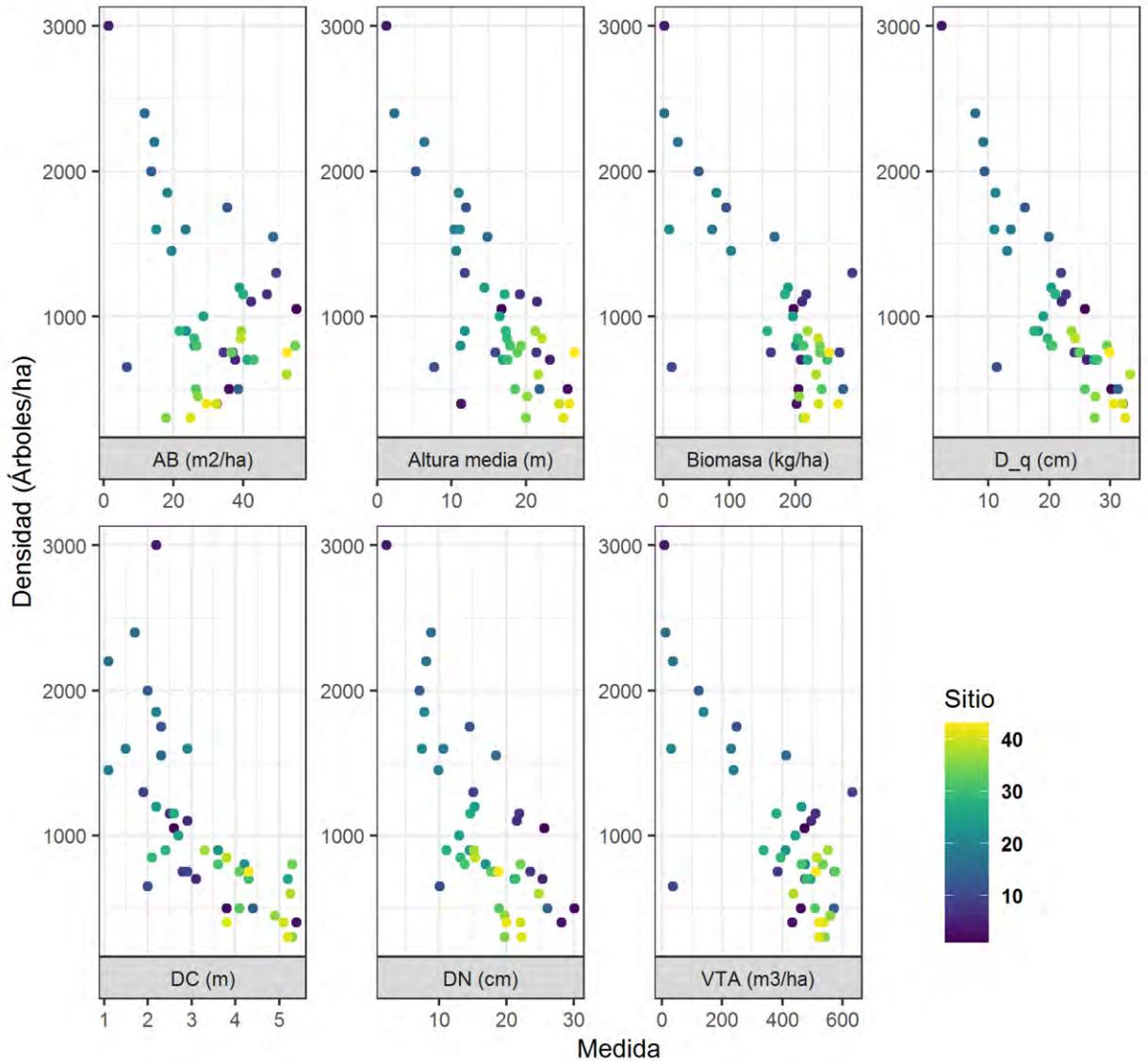


Figura 28. Densidad de los atributos dendrométricos medidos y calculados.

#### Volumen

En la Figura 28 se incluye el gráfico de volumen total. Se encontró un valor medio de 400.1 m<sup>3</sup>/ha con una desviación estándar de 177.6 m<sup>3</sup>/ha.

## Biomasa

En la Figura 28 se incluye el grafico de biomasa total. Se encontró un valor medio de 176.4 m<sup>3</sup>/ha con una desviación estándar de 80.2 m<sup>3</sup>/ha.

Se encontró que el volumen y la biomasa totales estaban altamente correlacionados (Figura 29,  $r=0.9756$ ), lo cual es bastante razonable pues mayor cantidad de volumen implica mayor carga. Por su puesto, los valores más grandes de estos atributos se encontraron en rodales de desarrollo avanzado, próximos a ser intervenidos con cortas de regeneración y en casos excepcionales, con aclareos.

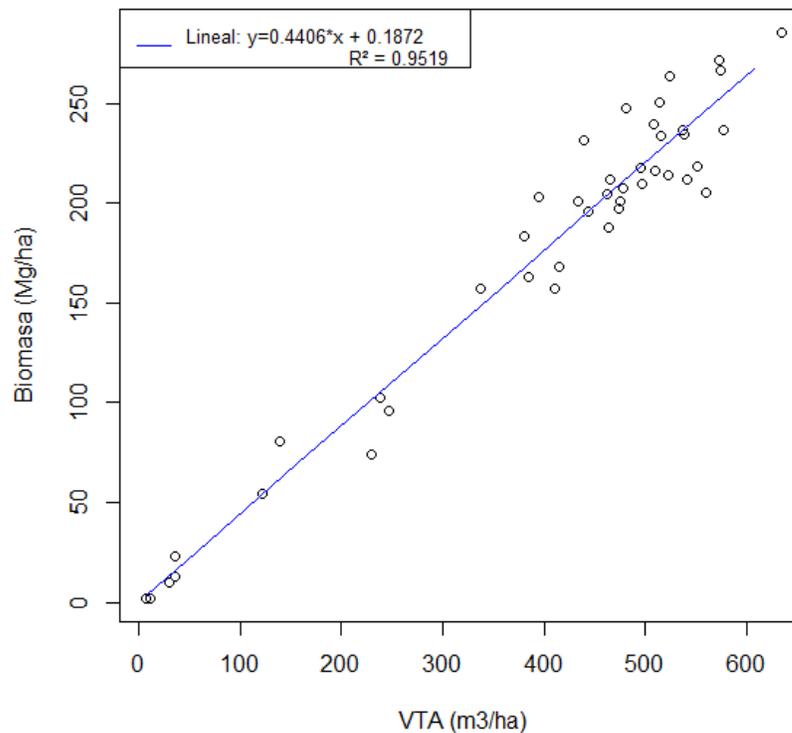


Figura 29. Relación entre el volumen total con la biomasa total

### 4.6.3 Mapeo de combustibles forestales

Actualmente existen múltiples métodos para extrapolar variables continuas en el espacio, algunos de ellos se basan netamente en superficies geométricas como lo son el IDW y Kriging (ESRI, 2019), los cuales han sido utilizados en estudios similares (Flores y Moreno, 2005). Sin embargo, tienen la desventaja que no consideran las características de la cubierta vegetal existente, solo la geometría con base en cierta fórmula matemática (ESRI, 2019), esa fue la razón por la se optó por el método descrito previamente. Algunos métodos que resultan prometedores para esta labor son Random Forests (múltiples árboles de regresión o clasificación, según corresponda) (Breiman, 2001) y similares que se basan en métodos de aprendizaje de máquina, aunque su implementación e interpretación es más complejas que en regresión (Liaw, A. y Wiener, 2018).

El uso de este tipo de modelos, de tipo exponencial, parece ser muy adecuado para esta labor pues representaron mejor los datos inferiores de la variable de interés al comenzar desde 0, y no desde números negativos como sucedió con los modelos regresión lineal (simple y múltiple), razón por la que se optó por los de este tipo para las tres variables mapeadas. Pues al usar modelos de regresión lineal, a pesar de no haber considerado en los mapas a aquellas áreas de uso diferente al forestal, se presentaban valores negativos en los lugares con cubierta forestal nula, en donde deberían representarse valores cercanos al cero. Un inconveniente que se notó al emplear los modelos de tipo exponencial fue que, debido a su naturaleza, los valores más altos no se acotan como sucede con los inferiores, por lo que deberán acotarse de forma independiente, con base en los valores máximos (de la variable de interés) obtenidos en campo. Con lo cual se obtienen mapas más apegados a la realidad.

#### Combustible superficial leñoso

El modelo seleccionado para mapear la carga de combustible leñoso fue:

$$\text{Carga} = \beta_0 e^{-\beta_1 B02^2 + B04^2}$$

Donde Carga es la carga de combustible leñoso (kg/pixel), B02 y B04 las bandas de satélite 2 y 4 (azul y rojo) respectivamente,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  los parámetros del modelo.

El cual tuvo los valores siguientes ( $R^2_{aj}$ : 0.7226,  $F=37.5$ ,  $p\text{-valor}<0.001$ , coeficientes altamente significativos):

$$\text{Carga}_{\text{kg/pixel}} = 81.5379e^{-6.3586 \times 10^{-10} B02^2 + B04^2}$$

En los términos han sido definidos previamente. El mapa resultante se muestra en la Figura 30.

Es destacable que, para el mapeo del combustible leñoso, la banda infrarrojo cercano (NIR) no tuvo correlación considerable a diferencia de con el mapeo de biomasa y volumen en donde incluso hubieron mejoras en las medidas de desempeño y los coeficientes resultaron altamente significativos tras su inclusión. Debido a lo anterior, la banda NIR no fue incluida en los modelos candidatos de combustible leñoso. Por su parte, Torres-Vivar *et al.* (2017) también encontraron útil a la banda NIR en el mapeo de la biomasa y el volumen, además de otros atributos dendrométricos. La razón principal de que el modelo elegido para el mapeo de las cargas de combustible leñoso incluyera bandas del espectro visible (azul y rojo) radica en el hecho de que estas bandas no reflejan la vigorosidad de la vegetación (expresión de la fotosíntesis) como lo hace la banda de NIR; dichas bandas del espectro visible reflejan lo que nuestros ojos ven, tal como lo indica su nombre (NASA, 2021). Entonces, debido a que el combustible leñoso es material inerte que no refleja ningún grado de fotosíntesis, es la razón de estos resultados. Aunado a que los combustibles leñosos forman un estrato inferior (superficial y subterráneo, según sea el caso) e independiente al que se observa en las imágenes satelitales, es decir, al estrato aéreo.

Torres-Vivar *et al.* (2017) no modelaron la carga de combustibles forestales debido a que su estudio se enfocó en atributos del arbolado, muchos de los cuales fueron modelados de forma exitosa. Por ejemplo, pudieron modelar con precisión el diámetro normal, el cual en el presente estudio tuvo relación lineal moderada con el combustible leñoso, por su puesto, en forma de suma. Por lo que, existe la posibilidad de aproximar el diámetro para posteriormente modelar la carga, aunque sería necesario explorar su factibilidad de forma minuciosa.

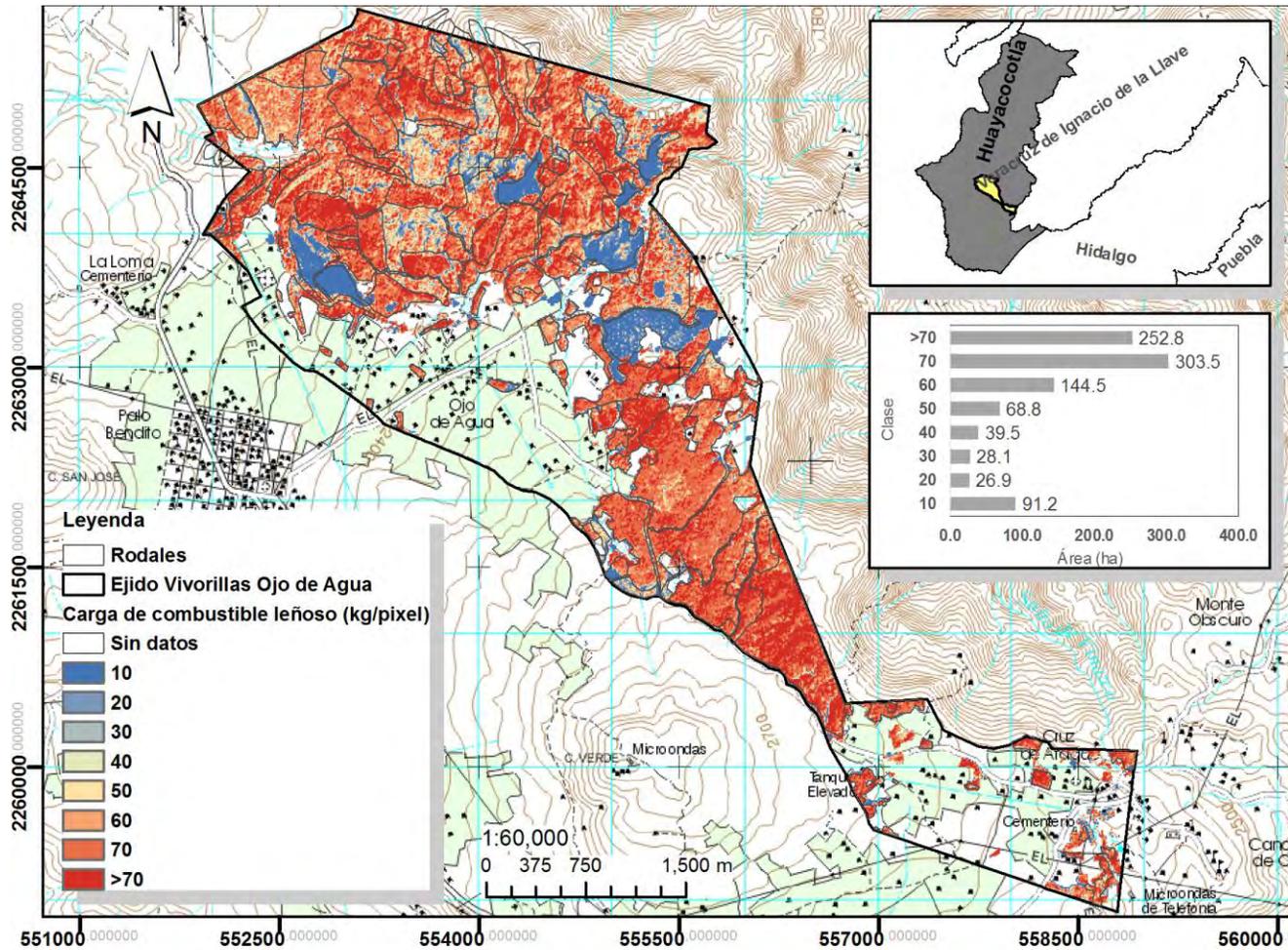


Figura 30. Mapa de combustibles leñosos en el Ejido Vivorillas Ojo de Agua.

## Volumen

El modelo que se seleccionó en un principio para mapear el volumen fue:  $VTA = \beta_1 B03 + \beta_2 B08 + \beta_3 NDVI$ . Donde VTA es el volumen total árbol ( $m^3/\text{pixel}$ ), B03 y B08 las bandas de satélite 3 y 8 (verde e infrarrojo cercano) respectivamente y NDVI el índice de vegetación de diferencias normalizadas. El cual tuvo los valores siguientes:  $VTA_{\text{kg/pixel}} = 0.063808 * B03 - 0.012483 * B08 + 12.35447 * NDVI$ . En el cual todos los términos han sido definidos previamente. Los valores de sus estadísticos desempeño fueron buenos ( $R^2_{aj}=0.8825$ ,  $F=132.7$ ,  $p\text{-valor}<0.001$ , coeficientes altamente significativos). Sin embargo, este no es relista, da buenos ajustes en los lugares donde se muestreó, pero no da valores plausibles en áreas diferentes. Por lo que se utilizó el siguiente:

$$VTA = \beta_0 e^{\beta_1 N08^2 NDVI^2}$$

El cual tuvo los valores siguientes ( $R^2_{aj}=0.9045$ ,  $F=133.6418844$ ,  $p\text{-valor}<0.001$ , coeficientes altamente significativos):

$$VTA = 18.4405 e^{-7.74 \times 10^{-7} N08^2 NDVI^2}$$

El mapa resultante se muestra en la Figura 31.

Merecen una mención especial los modelos:  $V = \beta_1 B04 + \beta_2 B08 + \beta_3 NDVI + y$   $V = \beta_0 e^{(-\beta_1 B08)}$  que también representaron de manera adecuada al volumen.

Torres-Vivar *et al.* (2017) también encontraron útiles para su estudio, para el mapeo del volumen, a las bandas aquí usadas al igual que la banda azul, en un modelo de regresión lineal múltiple. Lo anterior puede deberse a diferencias entre las fechas (distantes entre sí) en que fueron realizados ambos estudios, la flota a la que pertenecieron los productos satelitales empleados e incluso a las diferencias entre la vegetación a pasar ser de regiones continuas y similares en composición, aunque en el caso del estudio de Zacualtipán, el estudio se encontraba más hacia la influencia del bosque mesófilo de montaña. En tanto que, en este estudio, la influencia del bosque mesófilo de montaña está más cargada hacia la parte noroeste del área de estudio según el INEGI (2016).

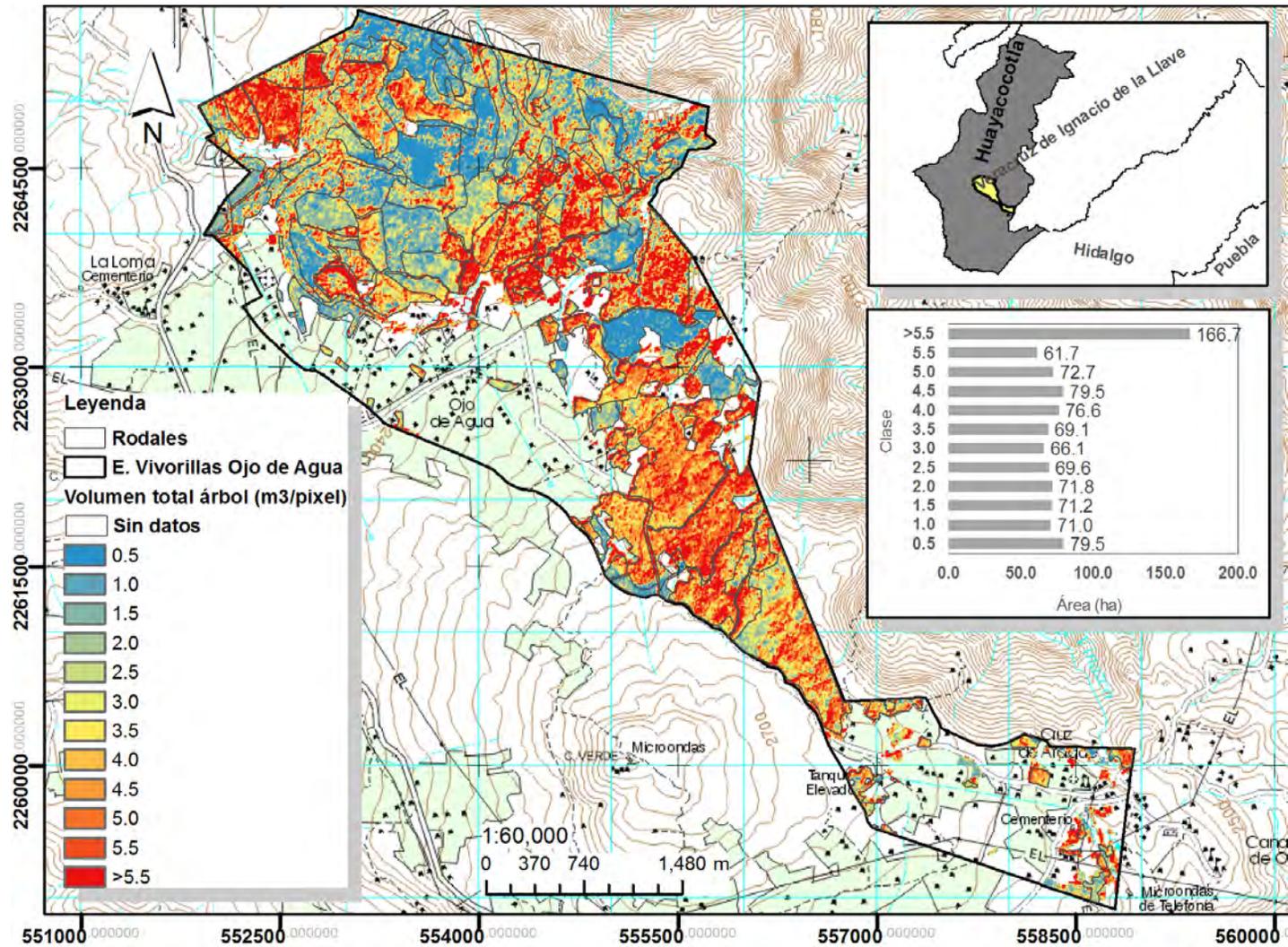


Figura 31. Mapa de volumen total en el Ejido Viborillas Ojo de Agua.

## Biomasa

El modelo que se seleccionó en un principio para mapear la biomasa fue:  $B_t = \beta_1 B_{04} + \beta_2 B_{08} + \beta_3 NDVI$ . Donde  $B_t$  es la biomasa total (kg/pixel),  $B_{04}$  y  $B_{08}$  las bandas de satélite 4 y 8 (rojo e infrarrojo cercano) respectivamente y NDVI el índice de vegetación de diferencias normalizadas. El cual tuvo los valores siguientes:  $B_t = 0.0194B_{04} - 0.0032B_{08} + 4.6517NDVI$ . En el cual todos los términos han sido definidos previamente. Los valores de sus estadísticos desempeño fueron buenos ( $R^2=0.952$ ,  $R^2_{aj}=0.8856$ ,  $F=146$ ,  $p\text{-valor}<0.001$ , coeficientes altamente significativos). Sin embargo, no es relista, da buenos ajustes en los lugares donde se muestreó, pero no da valores plausibles en áreas diferentes. Por lo que se utilizó el siguiente:

$$\text{Biomasa}_{\text{Mg/pixel}} = \beta_0 e^{\beta_1 N_{08}^2 NDVI^2}$$

Este modelo tomó los siguientes valores ( $R^2_{aj}=0.908$ ,  $F=139.191$ ,  $p\text{-valor}<0.0001$ , coeficientes altamente significativos):

$$B_{t\text{kg/pixel}} = 9.3534e^{-8.55 \times 10^{-7} N_{08}^2 NDVI^2}$$

El mapa resultante se muestra en la Figura 32.

El hecho de que mayoría de modelos que tenían buen desempeño con el volumen también lo tenían con la biomasa es debido a que estos se encuentran altamente correlacionados como se muestra en gráfico correspondiente.

Merecen una mención especial el modelo  $V = \beta_0 e^{(-\beta_1 B_{08})}$ , que también representó de manera adecuada a la biomasa total.

El modelo elegido para el mapeo de biomasa fue el mismo que el que se usó para el volumen. Por su puesto, los coeficientes variaron, pero se mantuvieron altamente significativos como en el caso del volumen. Lo anterior debe tener fundamento en que hubo alta correlación ( $r=0.9756$ ) entre ambos atributos, por ende, los análisis referidos para el mapeo del volumen también son válidos aquí. Es importante destacar que Torres-Vivar *et al.* (2017) también usaron el mismo modelo tanto para biomasa como para volumen.

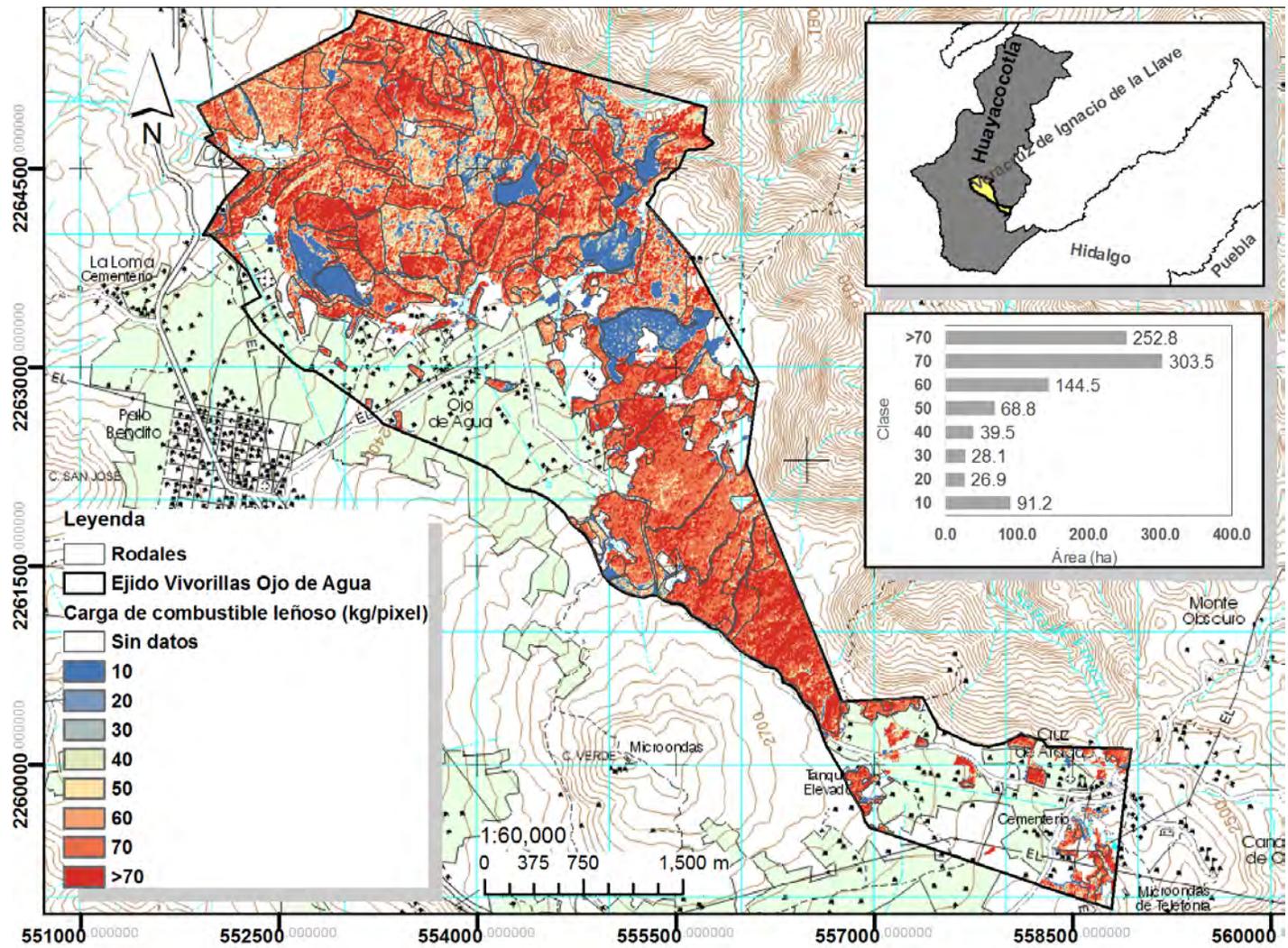


Figura 32. Mapa de biomasa total en el en el Ejido Viborillas Ojo de Agua..

#### 4.6.4 Recomendación de los sitios deberán ser intervenidos

Finalmente, se creó una gráfica que relaciona el número de árboles por hectárea y el diámetro cuadrático promedio (Figura 33). Con el fin de explorar la competencia interespecífica a la cual se encuentran sujetos los sitios explorados. De igual modo, se agregó la ecuación de Reineke (1933), usada comúnmente para el manejo de la densidad, que relaciona el número máximo de árboles por hectárea y el diámetro del área basal del rodal o diámetro cuadrático promedio. Esta grafica ilustra que algunos sitios muestreados requieren pronta intervención silvícola.

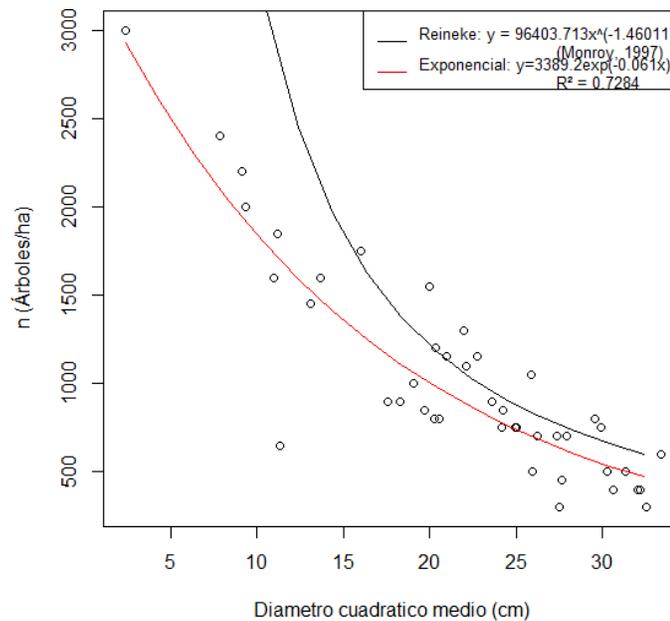


Figura 33. Relación entre el número de árboles por hectárea y el diámetro cuadrático medio con tendencia central de tipo exponencial y su comparativa con la línea de Reineke.

#### **4.7 Conclusiones**

Las cargas de combustibles leñosos resultaron ser de bajas (5.3 Mg/ha en promedio) y su variación correspondió con el tratamiento silvícola en el que se muestrearon los sitios, es por ello que se encontró correlación significativa y positiva con la suma del diámetro normal.

En cuanto a las cargas de combustibles vivos aéreos, se obtuvo que también correspondieron con el tratamiento silvícola, debido a que el Método de ordenación busca tener áreas productivas y que correspondan a un solo tratamiento.

Debido a que el ejido se encuentra bajo un programa de manejo, las cargas de combustibles muertos no son tan altas comparadas con zonas en las que se excluyen las actividades silvícolas. No obstante, se recomienda que se siga dando continuidad a las actividades de prevención de incendios tales como la renovación de brechas corta fuego, podas y quema de residuos. Lo anterior debido a que se observó que en rodales de aprovechamiento reciente aún hay leña en acomodo para su extracción.

#### **4.8 Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico dado durante los estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por todas las facilidades que les brinda a sus estudiantes para que puedan continuar con sus estudios.

A Antonio Fidel Santos Hernández y su familia por todo el apoyo en campo para la colecta de datos.

#### 4.9 Literatura citada

Aguirre-Calderón, Oscar Alberto. (2015). Manejo Forestal en el Siglo XXI. *Madera y bosques*, 21(spe), 17-28. Recuperado en 11 de junio de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712015000400002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000400002&lng=es&tlng=es).

Breiman, L. (2001) Random Forests. Statistics Department, University of California. Berkeley, CA 94720. Recuperado de <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf>

Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienaar, L. V; Brister, G. H.; Bailey, R. L. (1983) Timber management: a quantitative approach. New York, USA. John Wiley & Sons, Inc. ISBN:0471029610

ESA (2020). Copernicus Open Access Hub. Agencia Espacial Europea. Recuperado de: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

ESA (2021a). Sentinel 2. Agencia Espacial Europea. Recuperado de: [http://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain/SENTINEL\\_2](http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2).

ESA (2021b). Sentinel-2. Agencia Espacial Europea. Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

ESRI. (2019). ArcGis, ver. 10.3. Environmental Systems Research Institute. Redlands, California, United States.

Flores G., J.G. y Moreno G., D.A (2005). Modelaje espacial de la influencia de combustibles forestales sobre la regeneración natural de un bosque perturbado. *Agrociencia* 39 (3): 339-349. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.

INEGI (2016) Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Capa Unión. Archivo Shapefile. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>

Liaw, A. y Wiener, M. (2018) Package 'randomForest'. Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. Version 4.6-14 (25 de marzo de 2018). R Core Team, CRAN Repository. Recuperado de

<https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/randomForest.pdf>

Merino, I. y Segura, G. (2002). El Manejo de los Recursos Forestales en México (1992-2002). Procesos, tendencias y políticas públicas. En Leff, E., E. Ezcurra, I. Pisanty y P. Romero L.. La transición hacia el Desarrollo Sustentable. Perspectivas para América Latina. SEMARNAT, INE, UAM. México.

Monroy Rivera, C.R. (1997). Evaluación de crecimiento y productividad de *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Huayacocotla, Veracruz, México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Subdirección de Postgrado. Tesis de Maestría: Maestro en Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

Muñoz R., C. A., J. Treviño G. E., C. Verástegui J., P. Jiménez, J., Aguirre C. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la sierra Madre Oriental de México. Investigaciones Geográficas "Boletín del Instituto de Geografía". UNAM. ISSN 0188n-4611, Núm. 56 pp 101-117.

NASA. (2021). Landsat Science. Landsat 8 bands. National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C., USA. Recuperado de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands>

Ramírez, M. H. (2017). Manual para la elaboración de programas de Manejo Forestal maderable en clima templado frío. CONAFOR. Zapopan, Jalisco. 134 pp. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314226/Manual\\_para\\_la\\_Elaboracion\\_de\\_PMFm.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314226/Manual_para_la_Elaboracion_de_PMFm.pdf)

Reineke, L. H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. Journal of Agricultural Research 46:627-638.

Sloboda, B. (1984). Grundlagen zur Biomathematik und forstlichen Biometrie. Göttingen. 178 p.

Soriano-Luna, M. de los A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O.

Plascencia-Escalante, y R. Razo-Zárate. (2015). Estimación de biomasa aérea por componentes estructurales en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.

Torres-Vivar, E.; Valdez-Lazalde, J.R.; Ángeles-Pérez, G.; De los Santos-Posadas, H.M. y Aguirre-Salado, C.A. (2017). Inventario y mapeo de un bosque bajo manejo de pino con datos del sensor SPOT 6. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(39): 25-44. DOI: 10.29298/rmcf.v8i39.41

Villers Ruiz, Lourdes, García del Valle, Laura, & López Blanco, Jorge. (1998). Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones geográficas*, (36), 7-19. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111998000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111998000200002&lng=es&tlng=es)

## 5. ANEXOS

Anexo 1. Cuadro resumen del muestreo llevado a cabo en el Ejido Viborillas Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz.

Sitio	$\overline{DN}$ (cm)	$D_q$ (cm)	$\overline{A}$ (m)	n	AB (m <sup>2</sup> /ha)	$\overline{DC}$ (m)	VTA (m <sup>3</sup> /ha)	Biomasa (kg/ha)	Carga VW (Mg/ha)	Carga ZyC (Mg/ha)
1	25.6	25.9	16.7	1050	55.238	2.6	473.350	196.979	11.175	7.148
2	30.1	30.2	25.6	500	35.928	3.8	462.868	204.642	8.273	5.389
3	28.1	32.1	11.3	400	32.447	5.4	433.290	201.289	6.592	13.102
4	2.2	2.4	1.2	3000	1.330	2.2	7.033	1.876	0.259	0.470
5	25.4	26.2	23.2	700	37.713	3.1	477.271	207.840	8.633	5.906
6	21.5	22.1	21.5	1100	42.135	2.9	496.871	209.641	7.636	5.208
7	21.9	22.7	19.2	1150	46.667	2.5	510.205	216.316	6.997	8.999
8	23.5	24.2	21.4	750	34.381	2.8	385.425	163.130	4.999	2.573
9	15.1	22.0	11.8	1300	49.302	1.9	633.878	285.741	6.548	4.071
10	18.4	25.0	15.9	750	36.903	2.9	574.555	266.264	1.438	0.944
11	10.1	11.3	7.7	650	6.570	2	36.142	13.109	3.470	2.452
12	14.5	16.0	12.0	1750	35.304	2.3	247.385	95.890	8.805	6.598
13	7.1	9.3	5.2	2000	13.702	2	122.062	54.241	7.413	5.283
14	26.1	31.3	21.8	500	38.533	4.4	572.438	271.496	9.152	10.682

15	18.5	20.0	14.9	1550	48.470	2.3	414.192	168.331	4.546	2.788
16	8.8	7.9	2.4	2400	11.708	1.7	12.071	2.054	9.765	11.095
17	8.1	9.2	6.4	2200	14.511	1.1	36.627	22.880	6.666	6.035
18	10.7	13.7	10.4	1600	23.524	1.5	229.303	73.886	4.099	3.812
19	9.9	13.1	10.6	1450	19.487	1.1	238.655	102.862	2.478	2.556
20	7.9	11.2	11.0	1850	18.269	2.2	139.027	80.655	5.339	4.076
21	7.5	10.9	11.1	1600	15.051	2.9	30.629	9.547	4.743	4.142
22	16.9	20.3	11.2	800	25.875	4.2	475.462	200.960	4.713	2.931
23	14.5	18.3	11.8	900	23.548	3.6	410.870	157.029	3.124	0.905
24	15.3	20.3	14.4	1200	38.896	2.2	463.842	188.140	7.863	6.778
25	13.0	19.1	16.4	1000	28.553	2.7	443.294	195.589	4.800	3.422
26	21.1	27.3	16.9	700	41.098	5.2	494.452	218.086	2.990	2.074
27	14.6	21.0	17.1	1150	39.832	2.6	380.385	183.596	8.517	6.551
28	11.1	17.6	17.3	900	21.771	2.4	337.566	157.130	5.361	2.945
29	13.2	19.7	17.4	850	25.874	2.1	395.140	203.446	4.301	2.177
30	21.4	27.9	17.5	700	42.860	4.3	480.604	247.752	2.245	1.217
31	13.8	20.5	17.9	800	26.532	3.6	464.502	211.936	4.682	3.069
32	18.9	25.9	18.5	500	26.383	4.1	508.075	239.334	1.707	0.959
33	17.7	24.9	18.9	750	36.598	4.1	576.767	236.716	3.923	3.150
34	22.1	29.5	19.4	800	54.850	5.3	536.337	236.745	6.680	3.411

35	19.7	27.5	20.1	300	17.792	5.3	540.651	212.073	4.182	1.302
36	19.8	27.6	20.2	450	26.925	4.9	559.354	205.367	2.415	2.442
37	15.2	23.6	21.3	900	39.426	3.3	551.170	218.194	6.477	4.271
38	24.8	33.4	21.7	600	52.412	5.25	438.590	231.458	5.446	3.206
39	15.4	24.3	22.2	850	39.301	3.8	515.577	233.530	1.763	2.707
40	22.1	32.0	24.5	400	32.214	5.1	538.253	234.477	1.072	0.863
41	22.2	32.5	25.0	300	24.880	5.2	522.395	214.453	2.786	2.774
42	20.0	30.6	25.8	400	29.457	3.8	524.134	263.837	4.742	5.281
43	18.8	29.9	26.6	750	52.553	4.3	513.316	250.259	3.219	2.190

Donde  $\overline{DN}$  es el diámetro normal promedio del sitio en cm,  $D_q$  el diámetro cuadrático promedio en cm,  $\overline{A}$  la altura media en m, n es el número de árboles por hectárea, AB el área basal en m<sup>2</sup>/ha,  $\overline{DC}$  el diámetro de copa promedio en m, VTA el volumen total árbol o volumen del fuste completo del árbol (en pie o sin arribo) en m<sup>3</sup>/ha, Biomasa es la cantidad de materia seca (libre de humedad) del fuste del árbol en kg/ha, Carga VW y SyZ la carga de combustibles forestales leñosos finos o el peso de su materia seca (libre de humedad) en Mg (Megagramos) o toneladas métricas por ha calculada con la fórmula de Van Wagner (1982) y Sánchez y Zerecero (1983). En la siguiente hoja se encuentran algunas fórmulas básicas.

Sitio	Hojarasca (Mg/ha)	Capa de fermentación (Mg/ha)	Hojarasca y capa de fermentación (Mg/ha)
1	6.945	7.699	14.644
2	6.804	13.064	19.869
3	10.137	9.658	19.795
4	0.500	0.750	1.250
5	4.532	16.643	21.175
6	6.529	9.480	16.009
7	4.983	14.340	19.324
8	6.221	12.708	18.929
9	1.137	13.212	14.349
10	1.389	18.153	19.542
11	1.505	14.760	16.265
12	6.038	2.252	8.289
13	5.338	2.445	7.783
14	1.114	21.650	22.764
15	7.866	6.537	14.403
16	2.593	4.086	6.679
17	5.435	0.458	5.893
18	8.705	5.419	14.124
19	9.665	2.715	12.380
20	8.012	3.116	11.128
21	9.019	2.611	11.630
22	4.535	12.600	17.135
23	3.676	14.600	18.276
24	4.993	8.915	13.908
25	5.800	12.947	18.747
26	7.627	10.900	18.527
27	6.212	9.935	16.147
28	4.004	14.758	18.762
29	4.021	15.600	19.621
30	2.340	17.923	20.263
31	6.869	11.467	18.336
32	6.777	12.500	19.277
33	4.673	14.300	18.973
34	9.975	7.115	17.090
35	1.584	19.509	21.093
36	1.584	19.229	20.813
37	9.703	7.222	16.925
38	3.398	18.154	21.552
39	7.087	11.650	18.737
40	3.149	18.431	21.580
41	6.923	15.780	22.703
42	5.580	16.870	22.450
43	6.482	12.020	18.502

## Anexo 2. Fórmulas básicas

### Diámetro normal promedio:

$$\overline{DN} = \frac{\sum_{i=1}^n DN_i}{n'}$$

Donde  $\overline{DN}$  es el diámetro normal promedio,  $\sum_{i=1}^n DN_i$  es la suma de los diámetros normales individuales y  $n'$  es el número total de registros en i-ésimo sitio.

### Diámetro cuadrático promedio

$$D_{\bar{q}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n DN_i^2}{n}}$$

Donde  $D_{\bar{q}}$  es el diámetro cuadrático promedio y los demás términos ya han sido definidos.

### Altura total promedio

La altura media  $\bar{A}$  se calcula de forma similar que el  $\overline{DN}$ .

### Re escalado al nivel de ha

Se aplica una regla de tres.

$$\begin{aligned} n' &\rightarrow \text{tamaño del sitio } m^2 \\ n &\rightarrow 10\,000 \text{ } m^2 \\ n &= \frac{n' * 10\,000 \text{ } m^2}{\text{tamaño del sitio } m^2} \end{aligned}$$

Donde  $n$  es el número de árboles por hectárea y los demás términos ya han sido definidos.

### Área basal

$$\begin{aligned} AB_i &= \frac{\pi}{4} DN_i^2 \\ AB &= \sum_{i=1}^n AB_i \end{aligned}$$

Donde  $AB_i$  es el área basal individual del i-ésimo árbol y  $AB$  el área basal del sitio, que posteriormente debe re escalarse al nivel de ha.

Se pueden demostrar las siguientes equivalencias:

$$AB = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n DN_i^2 = \frac{\pi * n * D_q^2}{4}$$

### **Diámetro de copa promedio**

El diámetro de copa promedio  $\overline{DC}$  se calcula de forma similar que el  $\overline{DN}$ .

### **Volumen total**

$$VTA = \sum_{i=1}^n VTA_i$$

Donde VTA es el volumen total árbol por sitio y  $VTA_i$  es el volumen individual del i-ésimo árbol, el cual fue calculado con un modelo de predicción de doble entrada (DN y A, para más detalles ver el texto), posteriormente es re escalado al nivel de ha.

### **Biomasa total**

La biomasa total por sitio es la suma de suma de la biomasa individual del i-ésimo árbol, al igual al volumen total, fue calculada con un modelo de predicción de doble entrada (DN y A, para más detalles ver el texto), posteriormente es re escalada al nivel de ha.

### **Carga de combustibles forestales leñosos**

La carga de combustibles forestales leñosos finos se calculó con la fórmula de Van Wagner (1982) y Sánchez y Zerecero (1983). Ver el texto principal de la tesis para más detalles

### Anexo 3. Transformación lineal de algunas funciones no lineales

#### Modelo lineal

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon_i$$

Donde  $y$  es la variable dependiente,  $x$  la variable independiente,  $\beta_i$  los coeficientes del modelo y  $\varepsilon_i$  los residuales o la incertidumbre asociada a este.

#### Potencial

$$y = \beta_0 x^{\beta_1}$$

$$\ln y = \ln \beta_0 x^{\beta_1} = \ln \beta_0 + \ln x^{\beta_1} = \beta_0' + \beta_1 \ln x$$

$$\ln y = \beta_0' + \beta_1 \ln x$$

Donde  $\beta_0' = \ln \beta_0$ ;  $e^{\beta_0'} = e^{\ln \beta_0} = \beta_0$

#### Exponencial

$$y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$$

$$\ln y = \ln \beta_0 e^{\beta_1 x} = \ln \beta_0 + \ln e^{\beta_1 x} = \beta_0' + \beta_1 \ln e^x = \beta_0' + \beta_1 x$$

$$\ln y = \beta_0' + \beta_1 x$$

Donde  $\beta_0' = \ln \beta_0$ ;  $e^{\beta_0'} = e^{\ln \beta_0} = \beta_0$

Al hacer estas transformaciones a los modelos no lineales, es posible resolverlos por el método de regresión lineal simple. Se debe tener precaución en la interpretación de los errores calculados con estas transformaciones debido a la naturaleza propia de los logaritmos, puesto que una multiplicación se transforma en una suma y una división en una resta. De forma alternativa, para resolver estos modelos sin realizar ningún tipo de transformación se emplea el método de los mínimos cuadrados, específicamente los mínimos cuadrados ordinarios. Aunque estos últimos también tienen detalles asociados, por ejemplo, el hecho de que se deben dar números iniciales a los coeficientes para llegar a la minimización real del error, puesto que es común que se llegue a minimizaciones parciales donde, de ninguna manera los coeficientes estimados no resultarán significativos.