



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE ÁRBOLES DESÉRTICOS  
ANTE EL FUEGO PRODUCIDO POR ZACATE BUFFEL**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ESTEFANÍA CAROLINA ROLDÁN NICOLAU

**Asesora:**

DRA. CLARA TINOCO OJANGUREN

INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

**Comité tutor:**

DRA. MARGARITA NAVARRETE MONTESINOS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

DRA. TERESA TERRAZAS SALGADO

INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



# Resumen

Los incendios no han sido un factor común en las zonas desérticas, en parte debido a que en estas áreas no existe un dosel continuo que permita la expansión de fuegos a grandes áreas. Se dice que por ello las plantas nativas han evolucionado en ausencia de fuego, y por lo tanto no son resistentes al mismo. En el estado de Sonora, con la introducción e invasión del zacate buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link = *Cenchrus ciliare* L.), se ha modificado la estructura del matorral formándose una capa continua de material combustible. En la temporada de secas, cuando los fuegos son más propensos, la continuidad del mismo provoca la expansión a grandes áreas; como consecuencia mueren muchas especies nativas ya que la temperatura del fuego puede alcanzar hasta 900° C. Una vez establecido, puede crearse un ciclo de retroalimentación positiva entre el fuego y la pradera, debido la tolerancia al fuego del pasto. Esto provoca un desplazamiento de las plantas nativas, menos tolerantes al fuego, llegando a remplazarlas y creando, como resultado, una pradera tipo sabana. Los efectos de fuego producido por el zacate buffel sobre las especies nativas han sido poco documentados, a pesar de que han sido reconocidos. Aun menos investigaciones han abordado el estudio de los mecanismos a través de los cuales esta especie exótica afecta a las especies nativas. Realizar estudios sobre la susceptibilidad de las especies nativas al fuego es importante como base para enfrentar este problema y dar soluciones de restauración de las áreas afectadas.

El propósito de este trabajo fue evaluar que tan susceptibles son dos especies con cortezas contrastantes, nativas al Desierto de Sonora, ante el fuego producido por *P. ciliare*. Las dos especies arbóreas seleccionadas fueron *Bursera microphylla* (torote blanco) y *Olneya tesota* (palo fierro). La evaluación se llevó a cabo centrándose en la corteza de los árboles, ya que las características de ésta junto con las del fuego determinan el grado de daño que experimentan los árboles a nivel cambium vascular. Los tres enfoques

utilizados fueron: una caracterización física-ecológica, una anatómica y un análisis térmico.

La ecología del fuego es la rama de la ecología que se enfoca en los orígenes de los incendios forestales y su relación con el entorno biótico y abiótico, es por ello que la primer sección de la tesis tuvo como objetivo describir las características físicas generales tanto de los árboles como del pasto, su principal combustible. Los árboles, a pesar de ser combustibles por sí mismos, se trataron como una componente biótica afectada ante un régimen de fuego alterado por una especie invasora que genera una sobrecarga de combustible no existente previamente en este ecosistema. La caracterización del sistema árbol-combustible se realizó tanto de manera cuantitativa como cualitativa.

Para el análisis anatómico se muestrearon cortezas de las 2 especies en campo y se realizaron láminas delgadas de las mismas tanto en zonas dañadas como no dañadas por el fuego. Un objetivo fue obtener, a partir de muestras de cortezas teñidas, los porcentajes aproximados de las principales componentes químicas de los materiales lignocelulósicos: holocelulosa, lignina y extractivos (con el caso especial de la corteza externa de *B. microphylla* compuesta principalmente de suberina). Además se reportó la profundidad del daño mediante imágenes estereoscópicas y microscópicas.

Finalmente la última sección tuvo como objetivo caracterizar térmicamente las cortezas de los árboles y el pasto. Esto se llevó a cabo mediante un análisis térmico-simultáneo, el cual combina la calorimetría diferencial de barrido (DSC) con el análisis termogravimétrico (TGA). Esto nos permitió determinar la forma de degradación de las cortezas y la energía liberada tanto por las componentes de los árboles como por el pasto.

De manera general, entre las dos especies estudiadas encontramos que, *B. microphylla* tiene una serie de características tanto a nivel tallo, como de dosel que le permiten tener una resistencia mucho mayor ante los nuevos regímenes de fuego producidos por *P. ciliare*. *Olneya tesota*, contrario a lo que pensamos en el inicio de la investigación, tiene un gran nivel de susceptibilidad tanto por la cantidad de combustible potencial que acumula debajo del dosel, como por su composición y propiedades térmicas. A pesar de sus características benéficas o perjudiciales, en ambos casos, un factor

fundamental es que dependiendo de la intensidad del fuego el daño sí puede ser absoluto. Por otro lado, individualmente como combustible y como especie herbácea, la energía del fuego producido por el pasto no es tan intensa, comparada con los combustibles leñosos. Sin embargo observando los efectos en las especies estudiadas y el hecho de que el mismo funge como el medio y fuente de ignición, nos confirma que la introducción e invasión de esta especie exótica al Desierto de Sonora y su efecto en el régimen de fuego, es actualmente un factor determinante de la pérdida de diversidad biológica.



*A Avena, mi fiel compañera*



# Agradecimientos

Agradezco al Posgrado de Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo académico y administrativo para llevar a cabo mis estudios de posgrado. El proyecto de tesis fue financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT (IN206817). Agradezco al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP), el apoyo económico otorgado para realizar dos de los cursos de campo que realicé durante el posgrado. Agradezco la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) (registro 771577) durante el periodo 2016-2018.

Este trabajo no hubiera sido posible de completar sin la ayuda de muchas personas con las cuales tuve la fortuna de trabajar. Primeramente quisiera agradecer a mi comité tutor: la Dra. Clara Leonor Tinoco Ojanguren, la Dra. Margarita Navarrete Montesinos y la Dra. Teresa Margarita Terrazas Salgado. Las tres investigadoras fueron fundamentales ya que sus bagajes académicos tan distintos enriquecieron de manera increíble este estudio. A Clara, mi tutora principal, le agradezco por apoyarme en absolutamente todo, desde abrirme las puertas de su casa, contestarme el teléfono en momentos de crisis, hasta tener pláticas académicas sumamente enriquecedoras. A Margarita le doy gracias por su manera tan directa y objetiva de decir las cosas, centrarme y a pesar de no trabajar con asuntos biológicos, ayudarme a plantear experimentos que me brindaran información desde un punto de vista distinto. Tere es una persona a la cual admiro mucho, es asombrosamente eficiente y afortunadamente logró transmitirme esa eficiencia aterrizándome cuando mi mente se iba divagando por ahí. Más aún a pesar de que su línea de investigación principal se alejara del enfoque que tomé para el análisis térmico, siempre estuvo abierta a entenderme y ayudarme a ligarlo a procesos botánicos. También me gustaría agradecer al jurado para el examen de grado por tomarse el tiempo de leer esta tesis y retroalimentarla, en esta parte entran las anteriormente mencionadas, la

Dra. María del Rocío Cruz Ortega, el Dr. Diego R. Perez-Salicrup y la Dra. Teresa Pi Puig .

La investigación no pudo haberse realizado sin trabajo de campo y de laboratorio, para el cual me apoyaron los técnicos, colaboradores y encargados de los mismos. Por ello me gustaría agradecer a los miembros del Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional: el Quím. José F. Martínez Rodríguez y a la Lic. en Ecología Anabel Martínez Díaz, su valioso apoyo técnico y ayuda en los muestreos de campo y en el laboratorio. Para la parte anatómica agradezco al Laboratorio de Anatomía Funcional (Instituto de Biología) y a la técnica Alicia Rojas por su paciencia conmigo haciendo preparaciones anatómicas. Me gustaría agradecer al Laboratorio de Difracción de Rayos X parte del LANGEM (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía), y a su encargada, la Dra. Teresa Pi Puig la cual, a pesar de no ser de mi comité, me brindó muchísimo apoyo tanto institucional como moral y más importante, tuvo confianza en mí. Gracias a ella logré realizar yo misma los análisis térmicos y aprendí muchísimo.

Este trabajo fue el resultado final de una serie de pruebas y errores, en las cuales participaron doctores que fueron de gran ayuda. Por ello me gustaría agradecer al Dr. Antonio Carrillo Ledezma y al Dr. Carlos A. Ochoa Moya por sus consejos de modelación numérica y computadoras para un modelo que no fue incluido ya que no se tendría corroboración en campo. También al Dr. Jorge Luis Naude, por prestarnos el Laboratorio de Termodinámicos para realizar mediciones de conductividad térmica, las cuales, debido a dificultades en el procesamiento de las cortezas no utilizamos.

También quisiera agradecer a dos personas que, aunque no son familiares son mis papás adoptivos en la UNAM y grandes amigos, ellos son el Dr. Arturo Quintanar Isaías y el Dr. Lorenzo Vázquez Selem. Ambos me han apoyado de una forma excepcional. Arturo, desde que lo conocí ha confiado en mí, ha escuchado mis problemas, me ha brindado espacios en el CCA, me ha ayudado muchísimo académicamente, aparte de que siempre nos divertimos y reímos. Lorenzo ha sido una persona maravillosa conmigo desde que nos conocimos en un curso que impartió. Ha escuchado de mi proyecto, me ha dado ideas, hemos ido a campo juntos y me ha dejado aprender muchísimo de él, en un futuro muy cercano vamos a colaborar en un proyecto juntos, me ha tenido paciencia en largas pláticas (siendo que

ni siquiera soy su estudiante) y me comparte música excelente.

Personalmente quiero agradecer a mis padres, Patricia y Ricardo, que me han apoyado para hacer todo lo que me he propuesto desde que tengo memoria. Ellos han confiado en mi y me han permitido dedicarme a lo que amo sin necesidad de preocuparme por obstáculos de índole no académica. Sin ellos no podría lograr ni una cuarta parte de lo que he hecho hasta ahora y siempre estaré infinitamente agradecida. Les agradezco su paciencia y amor hacia mi. También quisiera agradecerle a Mari Carmen, mi mejor amiga, la cual me ha aguantado desde que sabía que me gustaban las matemáticas y la ciencia pero también el arte y no tenía idea a que dedicarme. Más de 10 años de experiencias, pláticas, peleas pero sobre todo apoyo mutuo. A mi novio José (“Chepe”) por siempre apoyarme en todo. El ha sido técnico de campo, sherpa, escucha de problemas e intensidades que me emocionan y aquejan, una cordada increíble, un gran maestro de cómo hacer nudos y una gran pareja. El me ha dado algunos de los mejores consejos de vida que he recibido. Gracias a el he podido hacer este y otros muchos proyectos, incluyendo mejorar como persona. Finalmente a Avena, sí, dediqué esta tesis a un perro, pero no es cualquier perro es de mis mejores amigas jamás, ha viajado a buena parte de los estados de este país conmigo, ha hecho trabajo de campo, me espera a donde vayamos pacientemente, incluyendo a un café mientras trabajo o a dar clases a la Facultad de Ciencias, siempre está conmigo, en las buenas y en las malas.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Caracterización del sistema</b>	<b>7</b>
2.1. Zona de estudio . . . . .	7
2.2. Especies estudiadas . . . . .	9
2.3. Caracterización Física . . . . .	11
2.3.1. Metodología . . . . .	11
2.3.2. Resultados . . . . .	20
2.3.3. Discusión . . . . .	27
2.4. Caracterización Anatómica . . . . .	30
2.4.1. Metodología . . . . .	31
2.4.2. Resultados . . . . .	33
2.4.3. Discusión . . . . .	39
2.5. Caracterización térmica . . . . .	39
2.5.1. Metodología . . . . .	45
2.5.2. Resultados . . . . .	46
2.5.3. Discusión . . . . .	50
<b>3. Consideraciones finales</b>	<b>57</b>
3.1. Síntesis del trabajo . . . . .	57
3.2. Direcciones futuras . . . . .	60
<b>A. Manipulación de señales de STA</b>	<b>63</b>
<b>B. Difracción de Rayos X</b>	<b>69</b>
<b>Glosario</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>79</b>



# Capítulo 1

## Introducción

Desde finales del siglo XIX y principios del XX, diversos autores advirtieron del impacto del ser humano al entorno global [Crutzen, 2006]. Es en el año 2000 que Paul Crutzen y Eugene Stoermer proponen una nueva era geológica llamada el Antropoceno [Crutzen y Stoermer, 2000]. Esta se caracteriza por el impacto humano sobre los ecosistemas terrestres [Smith y Zeder, 2013]. El dominio del hombre ha ocasionado un impacto catastrófico en otras especies ocasionando su disminución y en muchas ocasiones su desaparición. Aunado al cambio climático [Pellegrini et al., 2017], las principales amenazas para las especies nativas son la destrucción del hábitat, las especies invasoras, contaminación, sobreexplotación y las enfermedades [Wilcove et al., 1998].

La ocupación por especies invasoras ocurre debido a que el hombre ha logrado romper las barreras biogeográficas, movilizandoo de forma acelerada, deliberada o accidentalmente especies [D'Antonio y Vitousek, 1992]. Las invasiones biológicas son la segunda causa de extinciones a nivel global, sólo después de la destrucción del hábitat [Bellard et al., 2016]. Son un proceso irreversible, ya que se auto-mantiene y evoluciona alterando los procesos, funcionamiento y composición en los ecosistemas [Miller et al., 2010].

Las invasiones por pastos exóticos son de particular interés en este trabajo. Dado que los pastos son movilizadoss activamente por el hombre, las invasiones son comunes. Debido a su gran adaptabilidad, los pastos exóticos son competidores agresivos y efectivos, alterando la disponibilidad de agua y nutrientes, modificando el microclima, la geomorfología e incluso

alterando o provocando nuevos regímenes de fuego [D'Antonio y Vitousek, 1992].

Una de las amenazas mas extensas y alarmantes a la región del Desierto de Sonora es el zacate buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link = *Cenchrus ciliare* L.) [Van Devender et al., 1997]. Este se introdujo a México por primera vez en 1956 [Alcalá, 1995], sin embargo su establecimiento a gran escala ocurrió en la década de los setentas en Sonora [Franklin et al., 2006]. Hasta finales de la década de los noventa y principios de los dosmiles se habían removido mas de un millón de hectáreas de matorral desértico y espinoso con el fin de sembrar esta especie exótica [Van Devender et al., 1997, Morales-Romero y Molina-Freaner, 2016]. En 2004 Arriaga y colaboradores advirtieron que *P. ciliare* tenía el potencial de cubrir el 53% de Sonora y el 12% de todo México [Arriaga et al., 2004]. El zacate buffel es un pasto invasor promovido por el gobierno federal y estatal [Alcalá, 1995, ?, SAGARHPA, 2009] debido a que es una especie de alto valor ganadero y económico. Posee un alto valor nutricional para el ganado y tiene una alta capacidad de carga ante pastoreo intenso [USDA, 2010].

Hasta antes de la década de 1960 se postuló que el fuego jugaba un papel insignificante en ecosistemas desérticos dado que las cargas de combustible eran inadecuadas para el sustento del mismo. Sin embargo también comenzó a advertirse el delgado balance del ecotono entre la vegetación desértica y los pastizales y su delicadeza ante la introducción de la ganadería. Cualquier perturbación conllevaría a un predominio de un ecosistema sobre otro [Phillips, 1962].

Existen múltiples evidencias del impacto del zacate buffel a la biodiversidad mediante alteraciones en la hidrología, propiedades edafocológicas (alelopatía) y ciclos de fuego [Friedel et al., 2006]. Puntualmente, la introducción del ciclo fuego-pasto en un ecosistema intolerante se ha vuelto una amenaza a las especies nativas del Desierto de Sonora [Burquez-Montijo et al., 2002, McDonald y McPherson, 2011, Morales-Romero y Molina-Freaner, 2016]. La eliminación de la vegetación original con el fuego ha permitido la expansión de *P. ciliare* a nuevas áreas induciendo praderas (“grasslandification”) [Van Devender et al., 1997, Titus, 2004] y creando un ciclo de retroalimentación positiva entre el fuego y el pastizal [McDonald y McPherson, 2013].

La superficie destinada hoy en día en el estado de Sonora para la ganadería es de 15.5 millones de hectáreas (85.14 % de la superficie total), de esta superficie 1.1 millones de hectáreas son praderas de zacate buffel (6.04 % de la superficie total), promoviéndose a ser 2 millones en los siguientes años [SAGARHPA, 2016] . Sin ser movilizado activamente por el hombre, el zacate buffel ha logrado establecerse en áreas urbanas como Hermosillo [Van Devender et al., 1997, De la Barrera, 2008]. Dado que *P. ciliare* produce una alta capacidad de carga que sostiene fuegos mas frecuentes e intensos [D’Antonio y Vitousek, 1992], su invasión en zonas urbanas y protegidas implica un riesgo inminente tanto en los ecosistemas desérticos como en las poblaciones cercanas aledañas.

Los pastos como combustibles se caracterizan por su alta flamabilidad, en el sentido de su rápida dispersión, particularmente con vientos fuertes [Keane, 2015]. Existen diversas razones por las cuales los combustibles herbáceos (particularmente pastos) son tan flamables. Primeramente, estos acumulan material muerto y se van secando conforme se acerca la temporada de incendios [Flavelle, 2003]. Morfológicamente propician los incendios ya que la mayor parte de las partículas de combustible son delgadas, pequeñas y su razón superficie volumen (SAVR) es alta, además los pastos generan capas contiguas superficiales no compactadas con una densidad aparente que alberga una rápida dispersión y alta intensidad del fuego [Keane, 2015]. La mayoría de los pastos poseen una rápida recuperación ante el fuego debido a que sus meristemas se encuentran bajo tierra [Hanselka, 1988, Van Devender et al., 1997]. Finalmente el reemplazamiento de la vegetación leñosa por pasto altera el microclima aumentando la temperatura superficial, haciendo menores las humedades relativas y por tanto favoreciendo el fuego [D’Antonio y Vitousek, 1992, Morales-Romero y Molina-Freaner, 2016].

De manera general la cantidad de combustible (peso de combustible por unidad de superficie  $\text{kg m}^{-2}$  o  $\text{ton ha}^{-1}$ ) presente en un lugar concreto determinará la intensidad del incendio y variará según el tipo de vegetación. En ecosistemas desérticos no perturbados se estima que la cantidad de combustible es entre 0-3  $\text{ton ha}^{-1}$  y en una vegetación con pastos y arbustos 2-12  $\text{ton ha}^{-1}$  [Porrero Rodriguez y EIMFOR, 2001]. Es claro que la cantidad de combustible aumentaría hasta 4 veces en un desierto

que ha sufrido perturbación, en particular invasión por pastos.

Butler y Fairfax sugieren que la cubierta de zacate buffel se duplica después del fuego [Butler y Fairfax, 2003]. McDonald y McPherson reportan cargas de combustible mas altas que las reportadas en estudios previos donde describen sitios dominados por pasto buffel en diferentes ecosistemas áridos. Encontraron que la variación interanual en la biomasa de *P. ciliare* fue mucho mas baja que la de otras especies de pastos invasores, incluyendo especies anuales y perennes, lo que hace que el zacate buffel resulte mas flamable que otros pastos anuales [McDonald y McPherson, 2013]. Existe evidencia que entre mas intenso sea el fuego mas rápida es la recuperación de la biomasa de pasto sobre el suelo [Miller et al., 2010].

El fuego reduce la competencia con la vegetación circundante previniendo la recuperación del paisaje y provocando una vulnerabilidad ante la rápida colonización de especies de rápido crecimiento como el buffel. Se sabe que especies como el Saguaro (*Carnegiea gigantea*), el eucalipto rojo (*Eucalyptus camaldulensis*) y otras leñosas no son capaces de soportar fuegos repetidos dado que tienen un crecimiento temprano lento comparado con el zacate buffel [Marshall et al., 2012]. Sin embargo existe una falta de investigación cuantitativa y objetiva ante los efectos adversos de la invasión del buffel a la biodiversidad [Marshall et al., 2012]. A pesar de esfuerzos considerables en investigación sobre fuego, nuestra habilidad para predecir su impacto es limitada, esto en parte, se debe a la gran variabilidad de este en distintas comunidades florísticas [Leroy et al., 2009, Archibald et al., 2018]. El conocimiento de como la vegetación está siendo afectada por los nuevos regímenes de fuego nos ayudaría a plantear políticas de manejo y conservación hasta ahora casi inexistentes en México [Koleff et al., 2010].

Esta tesis tuvo como objetivo determinar que tan susceptibles son dos especies endémicas al Desierto de Sonora, *Olneya tesota* y *Bursera microphylla*, ante los nuevos regimenes de fuego producidos por *P. ciliare*. Esto se logró mediante la caracterización ecológica, anatómica y térmica de las especies, incluyendo al principal combustible que es el zacate buffel. Caracterizar el combustible fue de particular importancia para este trabajo ya que no existe ningún trabajo previo en la zona y es fundamental conocer esta información para sitios donde este pasto comienza a dominar y alterar la vegetación.

La pregunta a responder en este trabajo fue **¿Presentan algunas especies de matorral desértico cierta resistencia ante el fuego a pesar de no haber evolucionado para ello?** Para lograr responder esta pregunta se estudiaron 2 especies de árboles nativos representativas de la región de las planicies centrales del desierto de Sonora durante el periodo de sequía, que ocurre de marzo a junio. Estas se eligieron ya que poseen cortezas contrastantes con características que podrían hacerlas resistentes al fuego.

La ecología del fuego es la rama de la ecología que se enfoca en los orígenes de los incendios forestales y su relación con el entorno biótico y abiótico, es por ello que la primer sección del segundo capítulo tuvo como objetivo describir las características físicas generales tanto de los árboles como del zacate buffel. Los árboles, a pesar de ser combustibles por sí mismos, se trataron como una componente biótica afectada ante un régimen de fuego alterado por una especie invasora que genera una sobrecarga de combustible no existente previamente en este ecosistema. Se caracterizó el sistema árboles-zacate buffel cuantitativa y cualitativamente. Primeramente se presentan las medidas hechas en el campo y las pruebas no térmicas realizadas con el material colectado. Dentro de esta sección entra la caracterización en forma y tamaño. Se midieron propiedades físicas como densidad de las cortezas, contenido de humedad y porcentaje mineral. Se estimó cantidad de combustible potencial debajo del dosel a partir de la cantidad de combustible calculada para cuadros experimentales. También se describen las características cualitativas de los individuos y del daño provocado por el fuego.

En la siguiente sección se presentan las pruebas y medidas anatómicas. Para este análisis se muestrearon cortezas de las 2 especies en campo y se realizaron láminas delgadas de las mismas tanto en zonas dañadas como no dañadas por el fuego. Un objetivo fue obtener, a partir de muestras de cortezas teñidas, los porcentajes aproximados de las principales componentes químicas de los materiales lignocelulósicos: holocelulosa, lignina y extractivos (con el caso especial de la corteza externa de *B. microphylla* compuesta principalmente de suberina). Por otro lado se observó la respuesta celular de ambos árboles, aspecto que ayuda a determinar la respuesta de ambas especies.

En la tercer sección se determinaron los efectos de la temperatura en los materiales en cuestión. Esto se llevó a cabo mediante un análisis térmico simultáneo (STA) que incorpora dos técnicas de análisis térmico que permiten determinar cambios en las propiedades de cierto material con la temperatura. La primer técnica es la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC: Differential Scanning Calorimetry), este es el método mas utilizado para pruebas de análisis térmico. La DSC mide el flujo de calor en los materiales y provee información sobre los cambios químicos (degradación o reacciones) y de fase. El Análisis Termogravimétrico (TGA: Thermogravimetric Analysis) es una técnica que permite cuantificar los cambios de masa asociados a eventos térmicos. Este método, es comunmente utilizado para realizar análisis composicionales pero también es útil para la determinar la estabilidad térmica[Foreman et al., 1993]. Esto nos permitió determinar la forma de degradación de las cortezas y la energía liberada tanto por las componentes de los árboles como por el pasto.

# Capítulo 2

## Caracterización del sistema

### 2.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en el Centro Ecológico de Sonora (  $29^{\circ} 01' N$ ;  $110^{\circ} 57' W$ ; 245 m de elevación), una reserva natural de 188 ha establecida en 1984 y localizada en el límite sur de la ciudad de Hermosillo, Sonora [De la Barrera, 2008]. Este sitio hasta finales de la década de los noventa, contenía 300 especies de plantas vasculares, las cuales no incluían al zacate buffel como parte de la vegetación nativa [Molina-Freaner y Tinoco-Ojanguren, 1997]. Hoy en día el panorama es diferente, siendo *P. ciliare* una componente prioritaria del paisaje. La cobertura vegetal en 2008, dentro del Centro Ecológico, era del  $72 \pm 3\%$  en las partes planas y  $47 \pm 3\%$  en las laderas, siendo el zacate buffel una especie dominante en ambas con  $22 \pm 4\%$  y  $31 \pm 4\%$  respectivamente [De la Barrera, 2008].

Sonora ha sido en los últimos seis años el primer o segundo estado, según el año en cuestión, con mayor superficie afectada por biomasa de tipo herbáceo (Tabla 2.1). Por ello, debido a reportes locales y observaciones de especies quemadas, sabemos que el Centro Ecológico de Sonora es el sitio ideal para estudiar la interacción entre especies nativas y una especie invasora capaz de alterar los regimenes de fuego.

Las colectas se realizaron a partir de mediados del mes de Marzo hasta Mayo del año 2018. Estos meses corresponden a la temporada de secas en la ciudad de Hermosillo (figura 2.1). Las especies a evaluar en este estudio fueron dos especies de árboles y una de pasto, *Olneya tesota*, *Bursera*

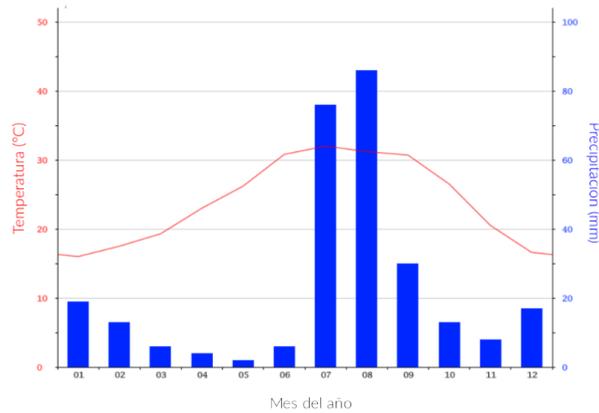


Figura 2.1: Climograma de la Ciudad de Hermosillo. La menor cantidad de lluvia ocurre en mayo con un promedio de 2 mm. Agosto es el mes con mayores precipitaciones, teniendo un promedio de 86 mm. Los meses entre Noviembre y Febrero son moderadamente secos pero a partir de Marzo comienza la temporada mas seca con precipitaciones menores a los 10 mm.

*microphylla*, y *Pennisetum ciliare* (L.) Link. (= *Cenchrus ciliaris* L.). Los métodos variaron según la especie y el estudio a realizar, por ello las colectas y metodologías particulares se describirán, según sea el caso, en la sección correspondiente.

Tabla 2.1: Datos resumidos para el estado de Sonora a partir de los reportes finales de incendios forestales, CONAFOR (<http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/las-demas/reportes-de-incendios-forestales>)

Año	Número de incendios acumulados	Superficie afectada de tipo herbáceo (ha)	Superficie afectada de tipo arbolado adulto (ha)	Superficie afectada de tipo renuevo (ha)	Superficie afectada de tipo matorral (ha)	Superficie afectada total (ha)	Lugar en lista nacional de superficie afectada
2010	21	5136.2	0	0	170	5306.2	10
2011	66	60533.5	1265	0	1438.5	63237	4
2012	53	75002	200	0	0	75202	1
2013	51	66461.8	2394	0	1000	69855.8	1
2014	35	46155.09	1542.1	0	1663.1	49781.09	1
2015	31	1946.8	787.46	0	12.9	1959.7	0
2016	77	37649.65	0	420.8	834.12	39271.23	2
2017	76	89688.22	4230.97	0	10405.03	104324.22	2

## 2.2. Especies estudiadas

El Desierto de Sonora cubre mas de 300,000 km [Felger et al., 2001] y se caracteriza por tener la mayor diversidad y endemismos (un tercio de las 2500 especies lo son) entre las comunidades desérticas del mundo [Durand, 1996]. En particular existen registradas alrededor de 97 árboles en el estado de Sonora y dentro de ellas se encuentran las dos especies endémicas estudiadas en esta tesis: *Olneya tesota* (Familia: Fabaceae) y *Bursera microphylla* (Familia: Burseraceae). La primera, popularmente conocida como palo fierro, es una especie arbórea que alcanza alturas entre 5 y 10 metros, con uno o mas troncos masivos y follaje denso. El árbol es perenne pero pierde algunas hojas conforme baja la humedad en el suelo [Shreve y Wiggins, 1964, Nilsen et al., 1984]. Su madera es de extrema dureza y de grano fino, no flota en agua y es un excelente combustible ya que quema con una llama intensa “hot-flame” [Felger et al., 2001, Turner et al., 2005]. Posee una corteza gris y deleznable. Es uno de los pocos árboles que ofrece sombra en el desierto y muchos animales y plantas encuentran asilo por debajo de su dosel. Así el palo fierro sirve de planta nodriza, identificándose un poco mas de 77 especies perennes que se establecen bajo las copas de esta especie [Mayoral, 1994]. Usualmente crece junto con el mezquite y el palo verde para formar bosques de galería xeroriparia [Felger et al., 2001]. Muchas de las grandes comunidades de palo fierro han sido devastadas para la producción de carbón y reemplazadas por zacate buffel [Nabhan y Carr, 1994]. Sus límites geográficos corresponden cercanamente a la frontera del Desierto Sonorense [Shreve y Wiggins, 1964]. Esta especie se encuentra enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo la categoría de riesgo ‘Sujeta a protección especial’ (Pr) y es una especie prioritaria. Por otra parte, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) seleccionó 51 especies a las que denominó como especies prioritarias, para las cuales se están desarrollando Programas de Acción y Conservación de las Especies (PACE) entre las especies seleccionadas se encuentra *Olneya tesota*.

El torote blanco o *Bursera microphylla*, es un arbusto o arbol pequeño de tronco corto que llega a alcanzar alturas entre los 2 y 6 u 8 metros, sus ramas son bajas. Su corteza y miembros de abajo son semisuculentos con madera suave, la corteza de las ramas superiores es café rojiza y la del tallo es blancuzca y se descarapela (en especial en la temporada seca), la mayoría de las hojas se encuentran en la zona apical de ramas cortas



Figura 2.2: (a) *Olneya tesota* ; (b) *Bursera microphylla*; (c) *Pennisetum ciliare*

[Felger y Moser, 1985]. Su extensión coincide con la del Desierto Sonorense [Turner et al., 2005]. Esta especie se ha utilizado con varios fines prácticos incluyendo la fabricación de herramientas y para producir fuego. Con frecuencia crece en los microhabitats mas cálidos, usualmente encarando al sur. El contenido de humedad de la corteza es alto [Nilsen et al., 1984] y contiene taninos [Kearney y Peebles, 1960].

El zacate buffel es un pasto nativo de África, Asia y Europa (árida y semi-árida) [Chambers y Hawkins, 2002] y es una seria amenaza a la biodiversidad a nivel mundial, particularmente en climas áridos. Este pasto requiere control activo por invasión en Australia, Estados Unidos (incluyendo Hawaii e Islas Vírgenes), México, Centro y Sudamérica [centre for arid zone research, 2001, Marshall et al., 2012]. Tolerla la sequía y responde rápido a eventos de lluvia[Ward et al., 2006]. Sus semillas apomícticas(clones a partir de la semilla) se dispersan fácilmente (por viento, agua, animales o humanos) lo cual permite su producción agrícola, mas aún algunas variedades poseen reproducción vegetativa (através de rizomas o estolones) [Winkworth, 1963, Marshall et al., 2012]. Ha logrado adaptarse a ecosistemas áridos alrededor del mundo dado que tiene un sistema radicular profundo, capacidad de competencia y acumula carbohidratos para asegurar su supervivencia [Halvorson, 2003]. En las últimas décadas se ha utilizado para control de cárcavas y como rehabilitador de sitios minados [Guevara et al., 2009, McKenna et al., 2017].

## 2.3. Caracterización Física

Al encontrarnos frente a una invasión biológica, un reto es entender los nuevos regímenes de fuego, mas aún en sistemas que raramente se han quemado históricamente como lo es el desierto de Sonora [Yetman y Búrquez, 1994]. Aumentos o decrementos en la frecuencia o intensidad del fuego amenazan seriamente o mantienen la biodiversidad, dependiendo si el ecosistema en cuestión evolucionó con o sin fuegos frecuentes [Fuentes-Ramirez et al., 2016].

Una forma de analizar o predecir el fuego es através de los combustibles vegetales. La cantidad y tipo de combustible que se quema durante un incendio forestal, dicta la intensidad, riesgo, cantidad de humo generado y cómo responden los ecosistemas ante el mismo [Keane, 2015]. Es por ello que en esta sección se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de los combustibles presentes y de las especies de interés. El contenido local de humedad en el tallo afecta la densidad, la capacidad calorífica, la conductividad térmica y el mismo fenómeno de desecación [Jones et al., 2004]. De esta manera se cuantificaron características físicas como la densidad de la corteza y madera, los contenidos de humedad y la cantidad de combustible bajo la copa de cada especie. También se determinó el contenido mineral ya que éste tiene un profundo impacto en el comportamiento del fuego [Philpot, 1970].

### 2.3.1. Metodología

#### Densidad, contenido de humedad y contenido mineral

Se seleccionaron 6 individuos de cada una de las especies, es decir *Olneya tesota* y *Bursera microphylla*. Para cada uno de estos ejemplares se retiró una cuña directamente del tronco. Esta se realizó haciendo una incisión horizontal con el serrote y otra incisión a 45 ° (figura 2.3(b),(c),(d)). La altura de corte fue entre los 30 y 50 cm. La muestra se refrigeró inmediatamente después de la extracción para posteriormente ser llevada al laboratorio y procesarla.

Se documentó el diámetro del tronco y de la copa de los árboles colectados (figura 2.3(a)) y se midieron los grosores promedio de la corteza

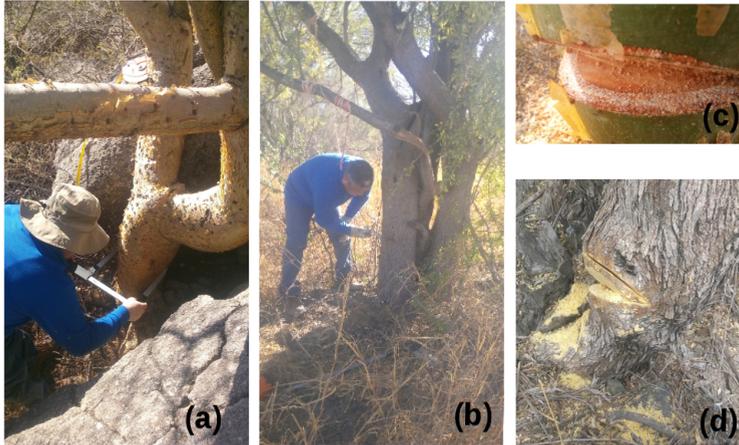


Figura 2.3: (a) Medición del diámetro con un vernier, debido a la irregularidad del perímetro del tronco se midió el diámetro mayor y el menor; (b) Colecta en un tronco de palo fierro; (c) Cicatriz tras extracción de cuña en tronco de *B. microphylla*; (d) Cicatriz tras extracción de cuña en tronco de *O. tesota*

interna y externa. Se intentaron seleccionar individuos con diámetros similares para estandarizar la colecta. También se midió la altura promedio de las ramas colgantes al piso, esto es una característica morfológica de suma importancia ya que el fuego superficial es capaz de volverse fuego de copa dependiendo de la forma de crecimiento del árbol. Los diámetros de los árboles se midieron con un vernier de escala centimétrica, las alturas de las ramas al piso se midieron con una cinta, mientras que los grosores de las distintas partes de la corteza con un vernier de escala milimétrica. Las medidas se promediaron a partir de todos los individuos muestreados.

Una vez en laboratorio se procesaron las muestras en un cuarto frío para disminuir la pérdida de humedad. Primeramente se dividió cada cuña en corteza externa, corteza interna y madera (figura 2.4). Esto se realizó con un bisturí y una navaja. Todo el material de cada sección se pesó en fresco. Posteriormente se obtuvo el volumen a partir del cambio de masa de un volumen conocido de agua destilada. Debido a que la densidad del agua es  $1\text{g cm}^{-3}$ , el cambio en la masa del agua al agregar el material, fue equivalente al volumen desplazado por el agua.

Una vez realizado esto se colocaron las muestras al horno a  $103^{\circ}\text{C}$  para

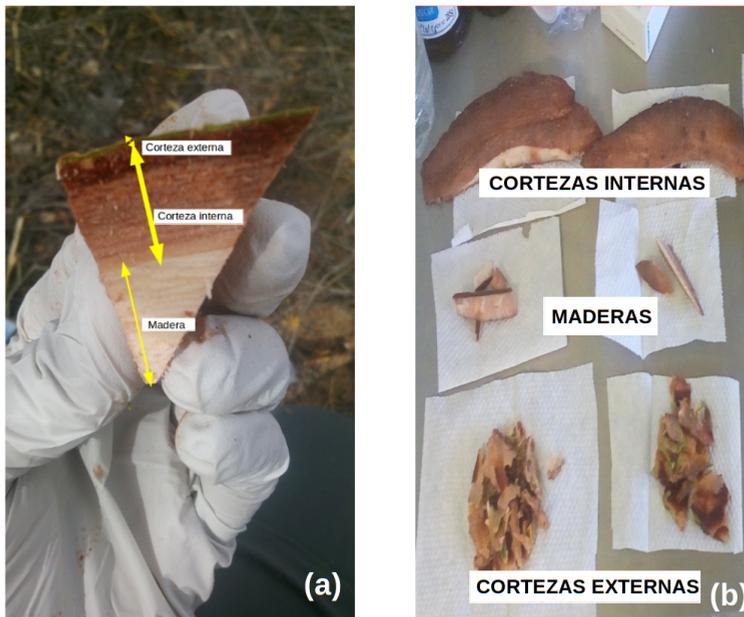


Figura 2.4: (a) Cuña recién extraída de *B. microphylla* con las secciones que posteriormente se separaron; (b) Secciones ya separadas con bisturí, estas partes posteriormente se pesaron, desecaron y molieron.

desecharlas y obtener el contenido de humedad en la muestra [Siau, 1983]. Las muestras se pesaron cada 2 días hasta obtener una masa constante. El contenido de humedad (M) se determinó a partir de la siguiente ecuación :

$$M = \left( \frac{\textit{masa.fresca}}{\textit{masa.seca.unitaria}} \right) - 1 * 100 \quad (2.1)$$

Este porcentaje nos indica la proporción entre el contenido de agua y el material sólido. Si hay la misma cantidad de agua y de corteza M tendrá un valor del 100 %, si hay mas agua que contenido sólido, el porcentaje será mayor al 100 % y si hay menos agua menor al 100 % [Reeb et al., 1995]. La densidad específica [Perez-Harguindeguy et al., 2013] se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\textit{masa.seca}}{\textit{volumen}} \quad (2.2)$$

Parte de las muestras que se dividieron en corteza externa, corteza interna y madera (figura 2.4) y se desecaron a  $103 \pm 3$  °C hasta obtener masa constante, fueron transportadas de Sonora a la Ciudad de México. Debido a que probablemente recuperaron humedad del ambiente, estas se volvieron a colocar en un horno a  $103 \pm 3$  °C por un una hora y media. Las muestras nuevamente desecadas se mantuvieron en un desecador y se pesaron para posteriormente meterse a una mufla. Las muestras se colocaron en crisoles de porcelana.

Segun la norma experimental, se debe pre-ignicionar el material [Sluiter et al., 2004]. Sin embargo se utilizó una modificación a esta norma ya que no contábamos con una mufla programable, de esta manera se utilizó el siguiente programa de calentamiento: de  $105 \pm 3$  °C se elevó la temperatura a  $225 \pm 25$  °C a una razón aproximada de  $15$  °C  $\text{min}^{-1}$  y las muestras permanecieron a esa temperatura por 40 minutos. La muestra volvió a calentarse hasta los  $575 \pm 25$  °C y se dejó as esa temperatura por 180 minutos. Concurrido el tiempo se volvió a disminuir la temperatura hasta los 105

°C. Se transfirieron las muestras al desecador y se dejaron enfriar. Una vez frías se pesaron.

Finalmente las muestras se volvieron a meter a la mufla a  $575 \pm 25$  °C hasta que se alcanzó una masa constante. Los cálculos pertinentes se realizaron a partir de la siguiente ecuación:

$$\%_{\text{mineral}} = \frac{mc}{MSH} * 100 \quad (2.3)$$

Dónde:

- % mineral: Contenido mineral de la muestra
- mc : Masa medida de ceniza
- MSH : Masa secada al horno

### **Biomasa combustible**

Para el muestreo se tomó la cantidad de biomasa debajo del diámetro de la copa con el fin de estimar el combustible potencial bajo el dosel. Dentro de la misma se seleccionaron áreas de 50 cm x 50 cm (0.25 m<sup>2</sup>) en cuadrantes aleatorios a lo largo de cuatro líneas en forma de radios provenientes del tronco como centro (una cruz). Estos cuadrantes se generaron aleatoriamente mediante un algoritmo realizado en el lenguaje de programación python. Dentro de los cuadros se colectó la biomasa y se dividió en: zacate buffel, ramas y hojarazca (figura 2.5). Todo se guardó en bolsas de papel y se transportó al laboratorio para su procesamiento.

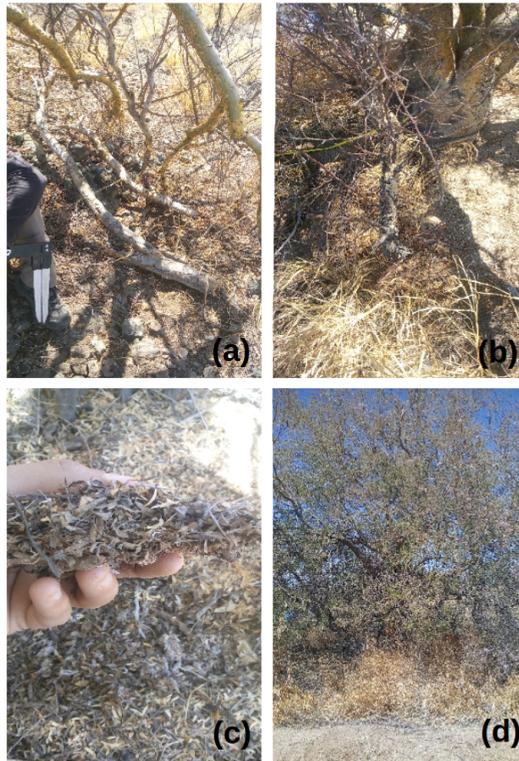


Figura 2.5: (a) ramas muertas de *B. microphylla* y de otras especies, además se observan pastos nativos ; (b) Biomasa densa debajo de *B. microphylla*, se observan macoyos de *P. ciliare* y otras especies vivas y muertas; (c) Mantillo debajo de *O. tesota*, el grosor en algunos árboles alcanzaba los 2 cm; (d) Macoyos de *P.ciliare* debajo de *O. tesota*

Una vez en el laboratorio todas las colectas se reclasificaron. Las muestras de hojarazca se dividieron manualmente, eliminando lo leñoso y las piedras de cada grupo. Posteriormente la materia restante se hizo pasar por tres tamices, de 2 mm, 1 mm y  $840\ \mu\text{m}$ , para eliminar la arena y suelo fino que pudiera estar presente. Una vez eliminado el suelo y componentes minerales, las muestras se secaron en un horno a  $70^\circ\text{C}$  por 48 horas y se pesaron en una balanza granataria.

Adicionalmente se clasificó el tamaño del combustible leñoso (ramas) utilizando 3 clasificaciones:

- Clase 1:  $< 0.6\ \text{cm}$
- Clase 2:  $0.6\ \text{cm} \leq, 2.5\ \text{cm} \geq$
- Clase 3:  $2.5\ \text{cm} \leq$

### **Análisis cualitativo de daño a especies**

Se seleccionaron individuos vivos con algún tipo de daño por el fuego producido por *P. ciliare* (figura 2.10), el principal combustible en la zona de estudio. A estos ejemplares se les hizo un análisis cualitativo sobre el daño ocurrido, documentando el porcentaje de ramas secas conservadas, asociaciones con otros individuos, cicatrices, si mantiene hojas vivas, tipo y lugar de rebrote y daño por algún otro agente además del fuego, e.g. descortezadores o termitas (figura 2.6). Este daño se clasificó según un índice visual de quema implementado por Miller y colaboradores para evaluar el daño de 10 especies de Australia central (principalmente individuos del género *Acacia*) ante el fuego producido por *P. ciliare* [Miller et al., 2010]. También se documentó a grandes razgos la distribución de zacate buffel alrededor de las especies (figuras: 2.7 y 2.8).

Índice visual ([Miller et al., 2010]):

- 0: sin quema aparente reciente
- 1:  $<25\%$  de hojas chamuscadas, algo de quema, planta  $< 1\text{m}$

- 2: >25 % de hojas chamuscadas, todo el follaje  $\leq 1$  m chamuscado
- 3: todo el follaje por encima de 1m chamuscado, mucho follaje faltante, combustible < 3 mm quemado  $\leq 1$  m de altura, corteza con marcas de carbonización
- 4: combustible entre 3 mm y 1 cm consumido  $\leq 1$  m, la mayor parte del combustible fino  $\leq 3$ mm quemado por encima de 1 m de altura, corteza parcialmente consumida
- 5: quema intensa, la mayoría de tallos pequeños  $\leq 2$  cm por debajo de 1 m de altura consumidos o severamente quemados, algunos tallos  $\leq 2$  cm consumidos a mas de 1m de altura, quema penetrante, cicatrices hasta la madera.
- 6: quema muy intensa, ramas >2 cm por encima de 1 m consumidas, quema severa de tronco principal
- 7: >25 % de tronco principal (>5 cm de profundidad) consumido.

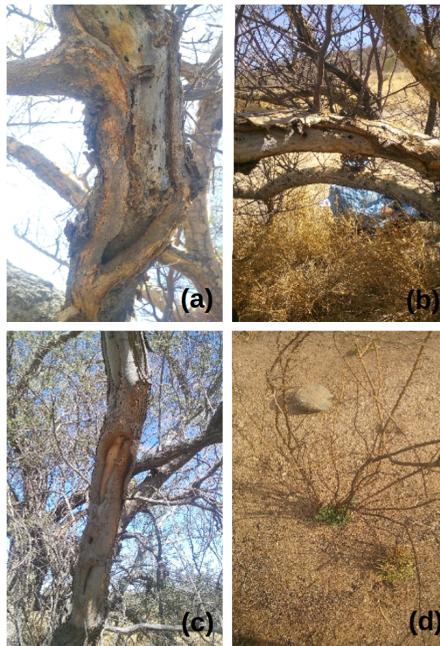


Figura 2.6: Entre paréntesis se indica el daño según el índice visual propuesto por Miller et.al (a) Cicatriz en parte ventral de rama de *B. microphylla* se observa la presencia de termitas en la madera dañada (5); (b) Misma imagen que (a) pero otro ángulo, en la parte superior de la rama se observan los rebrotes (5); (c) Cicatriz en parte ventral de rama de *O. tesota* se observa la presencia de termitas en la madera dañada (5); (d) Rebrotos en individuo completamente quemado de *O. tesota* (7).

### 2.3.2. Resultados

#### Densidad, contenido de humedad y contenido mineral

El diámetro de tronco promedio de los individuos seleccionados fue de 31 cm para ambas especies. Es interesante contrastar el diámetro de las copas, los grosores de la cortezas y las densidades ya que son diferentes entre sí. El diámetro de copa promedio de *B.microphylla* fue de 5.5 m, poco menos de la mitad de *O.tesota* con 9.51 m (Tabla 2.2). El follaje de la primera es escaso poseyendo una cantidad mínima de hojas en la época de colecta, además la altura promedio de las ramas inferiores hacia el piso fue de 69.5 cm. Por otro lado *O.tesota* posee un follaje abundante, tiene una altura promedio de las ramas inferiores al suelo de 20 cm, teniendo muchas de ellas al raz del piso. Esto influye en la generación de biomasa debajo del árbol y en el potencial de convertir un fuego superficial de buffel en fuego de copa.

De igual manera el grosor de la corteza, la densidad y el contenido de humedad variaron. La densidad de la corteza y de madera de *O.tesota* duplica la densidad de las respectivas secciones de *B.microphylla*. Sin embargo el grosor de la corteza y el contenido de humedad de la segunda sobrepasó por mucho a las medidas para el palo fierro. En algunas secciones, por ejemplo en la corteza externa, la humedad de la bursera fue seis veces mayor (Tabla 2.6).

Tabla 2.2: Propiedades físicas de las especies en cuestión

Característica	<i>Bursera microphylla</i>	<i>Olneya tesota</i>
DIÁMETRO DE TRONCO PROMEDIO (cm)	31.18 ± 2.08	31.11 ± 3.95
GROSOR DE CORTEZA EXTERNA (cm)	0.19 ± 0.06	0.93 ± 0.23
GROSOR DE CORTEZA INTERNA (cm)	1.94 ± 0.54	0.38 ± 0.06
DIÁMETRO DE COPA PROMEDIO (m)	5.56 ± 0.98	9.51 ± 1.11
	69.52 ± 0.05	20.71 ± 0.05
DENSIDAD DE CORTEZA (Kg m <sup>-3</sup> )	311.36 ± 74.27	707.68 ± 147.80
DENSIDAD DE MADERA (Kg m <sup>-3</sup> )	555.89 ± 39.99	828.34 ± 165.09
CONTENIDO DE HUMEDAD CORTEZA EXTERNA (%)	97.48	16.13
CONTENIDO DE HUMEDAD CORTEZA INTERNA (%)	268.21	78.74
CONTENIDO DE HUMEDAD MADERA (%)	100.34	15.84

Tabla 2.3: Contenido mineral

Sección	Porcentaje mineral (%)
<i>B. microphylla</i> madera	0.73
<i>B. microphylla</i> corteza interna	5.42
<i>B. microphylla</i> corteza externa	12.00
<i>O. tesota</i> madera	0.86
<i>O. tesota</i> corteza interna	3.62
<i>O. tesota</i> corteza externa	11.39
<i>P. ciliare</i>	3.50

Tabla 2.4: Cantidad de combustible potencial debajo de los árboles.

	Cantidad de ramas ( $Kgm^{-2}$ )	Cantidad de hojarazca ( $Kgm^{-2}$ )	Cantidad buffel ( $Kgm^{-2}$ )
<i>Bursera microphylla</i>	0.155	0.175	0.213
<i>Olneya tesota</i>	0.639	1.205	0.258

Además de la cuantificación del porcentaje mineral se determinó la composición de los compuestos cristalinos presentes en las cenizas. Para ello se corrió un análisis de Difracción de Rayos X en polvo (DRX). La metodología empleada, los difractogramas y las fases cristalinas identificadas se encuentran en el apéndice B (Tabla B.1 y figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7). La fase predominante en todas las fue el óxido de calcio, CaO. Además el apatito,  $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$ , estuvo presente en todas las secciones exceptuando la corteza externa de *O. tesota*.

## Biomasa combustible

Como se mencionó en la metodología, la biomasa se dividió en pasto buffel, hojarazca y ramas. Cabe notar que en todos los casos, la mayoría del zacate buffel crecía en la periferia de la copa (figuras 2.7, 2.8) esto hay que tenerlo en cuenta ya que no hay tanto buffel debajo de la copa como alrededor. Sin embargo, la energía de la biomasa directamente abajo de los árboles afecta intensamente al tallo y por tanto al cambium vascular.

Estos valores son potenciales ya que no todo el combustible se quema con el fuego. Si todo fuese consumido y si la biomasa se encontrara distribuida de manera homogénea tendríamos un máximo de energía. Se calculó el área bajo el dosel asumiendo la copa en forma de elipse y considerando los diámetros (mayor y menor) medidos para cada individuo (mismos que los utilizados para calcular el diámetro promedio en la Tabla 2.2). Así, se obtuvo la carga potencial de combustible debajo de los árboles. De esta manera, se tendría  $\approx 16$  kg de ramas,  $\approx 18$  kg de hojarazca y  $\approx 21$  kg de buffel en caso de *Bursera microphylla* y  $\approx 181$  kg de ramas,  $\approx 342$  kg de hojarazca y  $\approx 73$  kg de buffel para el caso de *Olneya tesota*.

En cuanto a la clasificación del combustible leñoso mencionada en la metodología, para *B. microphylla*, de las 17 ramas medidas, el 50 % corres-

ponde a la clase 2, 31 % a la clase 1 y el 19 % a la clase 3. De las 195 ramas encontradas en debajo de *O. tesota* el 52 % pertenece a la clase 2, 46 % a la clase 1 y tan sólo el 2 % corresponde a la clase 3. Es decir, en ambos casos el combustible fino es el predominante, lo cual favorece la iniciación y propagación del fuego. En el caso del palo fierro es sumamente notorio que el combustible fino ( $\leq 2.5$  cm), en ramas, es extremadamente predominante con un 98 %.

### **Análisis cualitativo de daño a especies**

En esta sección se presentan las características cualitativas de los árboles dañados (Tabla 2.5) y dos diagramas con las distribuciones de buffel alrededor del dosel (figuras 2.7, 2.8). Se utilizó la clasificación visual de Miller y colaboradores [Miller et al., 2010], agregando caracteres considerados de importancia para evaluar el daño a los individuos seleccionados como lo son los rebrotes, las cicatrices, los daños por otro agente y la retención de ramas secas o dañadas.

Primeramente, documentamos sí había rebrotes y de dónde provenían. En todos los individuos muestreados para *B.microphylla* hubo rebrotes en las ramas dañadas por fuego, principalmente en aquellas que presentaban cicatrices. Para *O. tesota*, no todos los árboles que presentaban quema sobrevivían, sin embargo, aquellos que sí, presentaban rebrotes directamente del tallo o de ramas grandes. Otras dos características que consideramos importantes fue la presencia de ramas secas o quemadas y daño relacionado a descortezadores o algún otro tipo de plaga.

Tabla 2.5: Características de las especies en cuestión

Individuo	Índice*	Conserva hojas vivas	Brote/sitio brote	Retención de ramas quemadas/secas	Cicatrices	Daño por otro agente	Información de combustible (no buffel)
B1	3	Sí	Sí/ Parte no dañada de ramas quemadas	Sí ( $\approx 3\%$ )	No, corteza descarpelada	No	Arbustos y enredaderas secas, <i>Cercididium microphyllum</i> muerto (palo verde), <i>Acacia willardiana</i> muerta, <i>Jatropha cordata</i>
B2	5	Sí	Sí/ Parte no dañada de ramas quemadas	Sí ( $\approx 40\%$ )	Sí, cara norte completamente quemada	Sí, en ramas secas	<i>Jatropha cardiophylla</i>
B3	3	Sí	Sí/ Parte no dañada de ramas quemadas	Sí ( $< 20\%$ )	No, corteza descarpelada y rama muerta.	No	<i>Encelia farinosa</i> , dos especies de <i>Opuntia</i> y pasto nativo.
B4	5	Sí	Sí/ Parte no dañada de ramas quemadas (40% con rebrotes)	Sí ( $\approx 20\%$ )	Sí, parte baja de ramas, $>50\%$ muerto	Sí en ramas muy dañadas	Pastos nativos, <i>Acacia</i> y buffel.
B5	2	Sí	Sí/ Parte no dañada de ramas quemadas	Sí ( $\leq 5\%$ )	Sí, una rama	No	<i>Encelia farinosa</i> , <i>Opuntia</i> , enredadera y pasto nativo.
O1	6	Sí	Sí, de parte dañada de tallo principal y de ramas muertas	Mantiene 25% de ramas secas	Sí, 5 de buen tamaño	Sí, en todas las ramas secas	<i>Justicia californica</i> , <i>Encelia farinosa</i> . Cerca una <i>Barsera laziflora</i> , <i>cyndropuntia bigelovii</i> , enredaderas, restos de cactáceas, macoyos de buffel quemados cercano.
O2	0	Sí	No	Sí, $\leq 5\%$ de ramas secas	No	No	<i>Opuntia fulgida</i> , una especie de <i>Mimosa</i> , <i>Guaiaacum coulteri</i> .
O3	0	Sí	Sí, brotes en ramas secas	Sí, $\approx 10\%$ de ramas secas	No	Sí, en ramas secas, hay parásitas	<i>Jatropha cardiophylla</i> , una especie de <i>Mimosa</i> , <i>Guaiaacum coulteri</i> , <i>Acacia</i> , <i>Cardiospermum coindium</i> , pasto nativo, especie de <i>Opuntia</i> y <i>Justicia</i> .
O4	0	Sí	No	Sí, $\approx 35\%$ de ramas secas	No	Sí, en ramas secas	<i>Jatropha cardiophylla</i> , especie de <i>Chenopodium</i> y <i>Abutilon</i> .
O5	3	Sí	Sí, 5 o 6 brotes subterráneos de ( $\approx 15$ cm de diámetro), hay otros brotes a nivel copa provenientes de ramas centrales que sobrevivieron.	Sí, $\approx 40-50\%$ de ramas secas	Sí, carbón y cicatrices en ramas muertas	Sí, en ramas secas	una especie de <i>Abutilon</i> y <i>Prosopis</i>

\* Nota: según el índice visual de Miller et.al [Miller et al., 2010].

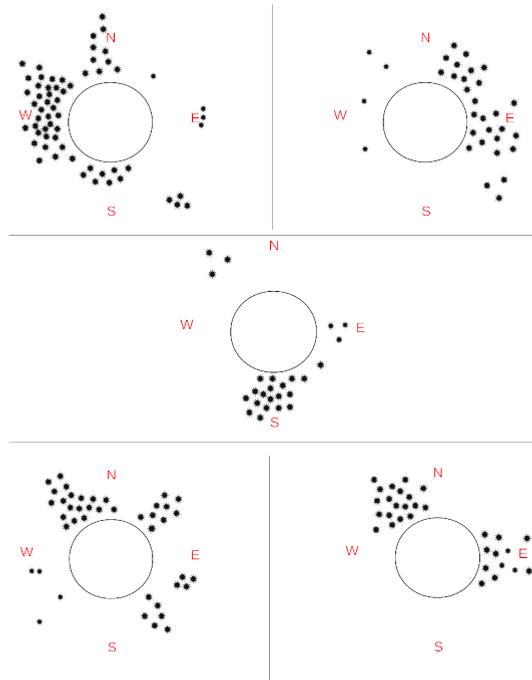


Figura 2.7: Distribución aproximada de buffel alrededor del dosel de algunos árboles de *B. microphylla* estudiados. El dosel se indica por el círculo central, los puntos negros representan macoys de buffel.

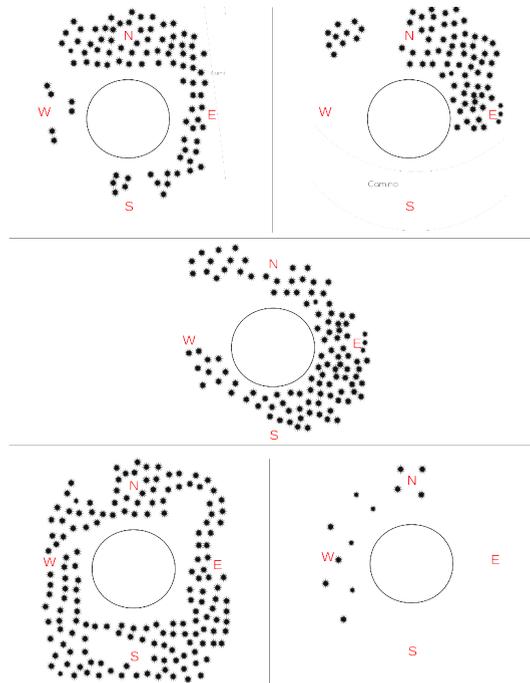


Figura 2.8: Distribución aproximada de buffel alrededor del dosel de algunos árboles de *O. tesota* estudiados. El dosel se indica por el círculo central, los puntos negos representan macoyos de buffel.

### 2.3.3. Discusión

Los resultados en esta sección sintetizan algunas características básicas que se miden para clasificar combustibles. Estos valores se utilizan generalmente como componentes de ecuaciones que modelan el comportamiento del fuego [Keane, 2015]. No obstante, ciertos valores por sí mismos nos proporcionan información relevante, en particular para el enfoque de esta tesis.

La primer relación interesante, que ya se ha observado en otros estudios, es la dependencia del grosor de la corteza con el diámetro del tronco. La gráfica 2.9 demuestra que entre mayor es el diámetro del tronco, el grosor de la corteza también lo fue. En ciertos casos la forma alométrica de esta relación refleja el régimen de fuego bajo el cual evolucionó una especie [Poorter et al., 2014]. En presencia de fuego recurrente, las plantas deben de invertir en cortezas gruesas al ser jóvenes y pequeñas, contrariamente, si la recurrencia es poco periódica, la inversión en protección a través de la corteza ocurre cuando son adultos [Jackson et al., 1999]. Sin embargo en nuestro caso no podemos hablar de una característica evolutiva ante daños por fuego, ya que no solían existir incendios recurrentes en la región [McDonald y McPherson, 2011, Humphrey, 1974, McLaughlin y Bowers, 1982]. Este efecto ha sido examinado previamente y se afirma que el grosor de la corteza es una característica evolutiva afectada por el tamaño de la planta y las funciones particulares, tanto de corteza interna como externa, por ejemplo traslocación de fotosintetatos, protección a herbivoría y por supuesto en ciertos casos protección al fuego [Rosell et al., 2015, Ferrenberg y Mitton, 2014].

Entender la diversidad de la cortezas, en sistemas libres de fuego es crucial para entender las estrategias ecológicas de las mismas [Rosell, 2016], particularmente, como fue objetivo en este estudio, hablar de una posible defensa ante el fuego aunque su estrategia inicial fuese otra. Los árboles con troncos suculentos fotosintéticos poseen la habilidad para almacenar agua y reasimilar el  $CO_2$  producto de la respiración con ningún costo hídrico [Aschan y Pfanz, 2003]. Estas características son ventajosas en ecosistemas estacionalmente secos, donde las plantas están expuestas a periodos limitados de agua, y como consecuencia, al aumento de carbono [Ehleringer et al., 1987]. En la mayoría de este tipo de especies, el agua almacenada en el tallo no se usa para el amortiguamiento diario de déficit hídrico, si no que se utiliza para promover el crecimiento de hojas antes del inicio de

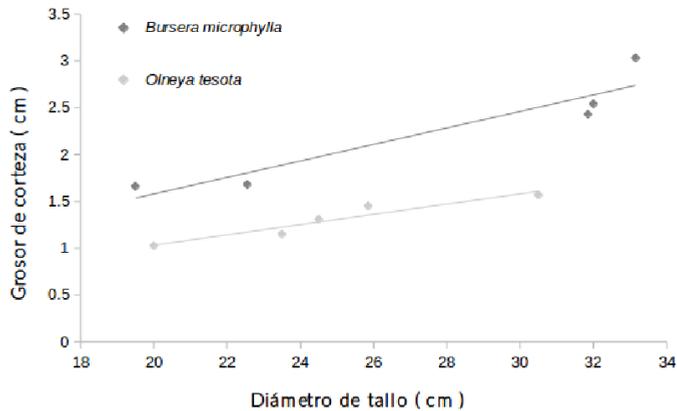


Figura 2.9: Relación entre el grosor del tallo y de la corteza para ambas especies. Se muestra una línea de tendencia con pendiente positiva. Los puntos gris oscuro corresponden a *Bursera microphylla* y los gris claro a *Olneya tesota*

la temporada de lluvias. También ayuda a mantener procesos fisiológicos y de crecimiento durante la sequía [Ávila-Lovera y Ezcurra, 2016]. De manera general se ha notado que el desarrollo de este tipo de cortezas y de otros tipos, está estrechamente ligado a las condiciones ambientales donde se desarrolla la especie en cuestión [Rosell et al., 2014]. Es así que, *B. microphylla* evolucionó una corteza con las características recién mencionadas que recientemente le han beneficiado en respuesta a los nuevos regímenes de fuego.

En cuanto al contenido de humedad, es importante tener en cuenta que al medir mediante el método de secado al horno, es probable que se obtengan valores mayores al contenido real para maderas o cortezas que poseen extractivos volátiles [Handbook, 2010]. Esto ocurre con *B. microphylla* ya que su contenido de resinas y otros extractivos es alto (tabla 2.6, siguiente sección). En un estudio para árboles tropicales en Bolivia, se midieron árboles con características similares de grosor de corteza y con contenidos de humedad muy por encima del 100% [Pinard y Huffman, 1997]. Los valores no se consideran comparables ya que la disponibilidad de recursos es muy diferente en un bosque tropical estacionalmente seco y en un desierto.

Como mencionamos con anterioridad, el contenido mineral es de suma

importancia como retardante de fuego. Existen pocos estudios que cuantifiquen este valor para corteza interna y externa. Algo fundamental que era de esperarse, ya que es una primer barrera contra el exterior, es que la corteza externa tenga un valor mineral más alto. Se sabe que la madera contiene a lo más 1 % mineral, sin embargo la corteza puede contener hasta 10 veces esa cantidad [Keane, 2015]. De manera general los valores para la madera son concordantes con valores de la literatura que varían entre 0.1 y 0.8 % [Dzurenda y Pnakovic, 2014, Demirbaş y Demirbaş, 2004], llegando hasta 5 % en ciertas regiones tropicales [Fengel y Wegener, 1984]. Se han reportado valores para el contenido mineral entre 1 y 13 % [Demirbaş y Demirbaş, 2004, Barta-Rajnai et al., 2017, Şen et al., 2014], particularmente los valores más altos se obtuvieron para el único estudio en el que se dividió la corteza externa de la interna, pero los valores de 13 % de contenido mineral ocurrieron para la corteza interna a diferencia de nuestro estudio.

Szemmelveisz y colaboradores reportan fases para la ceniza de especies herbáceas con cloruros, carbonatos y óxidos [Szemmelveisz et al., 2009]. Para la materia mineral de la madera y corteza del álamo, encino y olmo, se han encontrado principalmente sales de calcio, potasio y magnesio. Estas sales se forman con componentes de las paredes celulares mientras que otras ocurren como carbonatos, fosfatos, sulfatos, silicatos y oxalatos [Ragland et al., 1991]. En los resultados de la DRX, para todas las secciones y para el pasto, se obtuvieron principalmente fases de óxidos de calcio y apatitos (fosfatos), esto está de acuerdo con la literatura. Se ha reportado que la ceniza de la madera típicamente incluye 40-70 % de óxidos de calcio y 10-30 % de óxidos de potasio [Ragland et al., 1991]. Un resultado interesante es para la corteza externa de *O. tesota* donde hay presencia de silicatos. Los silicatos suelen encontrarse en trazas pequeñas en la madera y adoptan valores entre 0.05 % y 0.11 % en cortezas de diversas especies de angiospermas y gimnospermas [Harder et al., 1980, Pettersen, 1984]. Pese a lo anterior también se ha reportado que la presencia en la corteza, puede deberse a contaminación aérea por suelo aledaño [Ragland et al., 1991], se cree que ese es el caso de este estudio. Coincide con el tipo de suelo y rocas (granito), presentes en el sitio de estudio y con la principal erosión que hay en los desiertos, eólica.

A partir de la Tabla 2.4, se determina que debajo de *B. microphylla* la biomasa que predomina es el buffel. Esto se debe a que, a pesar de ser

una especie caducifolia, la cantidad de hojas acumulables no es suficiente (en tamaño y cantidad) para generar un mantillo, además esta especie no se deshace de ramas y no suele promover el crecimiento de otras especies leñosas debajo de ella (Tabla 2.5)[Felger et al., 2001]. Por otro lado en el caso de *O. tesota* la biomasa general es mayor que para la otra especie, en esta predomina la hojarazca, seguida por ramas y dejando al buffel en un tercer plano debajo del dosel. La acumulación de biomasa debido a una alta producción y desprendimiento de hojas y ramas aumenta la carga de combustible por unidad de área [Brooks et al., 2004]. El palo fierro, a pesar de ser perennifolio, tiene un desprendimiento y producción de hojas continuo, por tanto la acumulación de las mismas es considerable [Felger et al., 2001]. También promueve la producción y acumulación de ramas secas y de ritidoma. Finalmente al ser una planta nodriza [Durand, 1996], contribuye al crecimiento de otras especies tanto arbóreas, como arbustivas y herbáceas, las cuales también son combustibles potenciales (Tabla 2.5).

Este capítulo se dedicó a la caracterización del sistema árbol-pasto con las propiedades combustibles de los mismos. Los elementos mencionados en este capítulo, potencialmente pueden hacerlos susceptibles o resistentes al fuego. Hasta este punto podemos concluir que ciertas características, como el contenido de humedad, grosor y poca acumulación de biomasa de *Bursera microphylla* o el porcentaje mineral elevado en las cortezas externas de ambas, pueden contribuir como defensa en contra del fuego. Sin embargo, será cuando se presenten todos los enfoques que se de una síntesis más completa de estas características.

## 2.4. Caracterización Anatómica

En esta sección se realizó una descripción microscópica de las cortezas de estas especies para determinar a partir de sus estructuras anatómicas una posible resistencia debido a efectos térmicos. Se analizaron muestras tanto sanas como dañadas. A partir de las muestras sanas y con análisis de imágenes se determinó el contenido de holocelulosa, lignina y extractivos. Con las muestras dañadas se caracterizó anatómicamente el daño producido por el fuego.



Figura 2.10: (a) Tronco quemado de *B. microphylla*; (b) Tronco quemado de *O. tesota*

### 2.4.1. Metodología

De los árboles seleccionados, se extrajeron cuñas para realizar cortes anatómicos. Se seleccionaron árboles que hubiesen sufrido algún tipo de daño por fuego (figura 2.10). La cuña extraída se dividió en dos, fijándose en FAA (Formaldehído, Alcohol, Ácido Acético) una de las secciones. Las muestras se almacenaron en frío hasta ser transportadas a la Ciudad de México y una vez ahí también se almacenaron en frío para evitar la pérdida de humedad y facilitando el corte.

Para todas las muestras se cortó la cuña en un paralelepípedo que incluyese tanto la corteza como la madera. Estos pequeños bloques se colocaron de tal forma que se pudiesen realizar los cortes radiales y transversales. En este punto se realizaron dos procesos, el primero consistió tomar una imagen con un microscopio Olympus BX51, para ver el daño previo a realizar cualquier tratamiento o corte a la madera. El segundo proceso fue cortar láminas delgadas con un micrótopo, hacer el tratamiento de aclarado y teñido correspondiente, montar las muestras en un porta objetos y secar.

### Teñido y montaje de muestras

Dependiendo de la madera se realizaron cortes con un micrótopo de deslizamiento entre  $20\ \mu\text{m}$  y  $45\ \mu\text{m}$  de grosor. Se obtuvieron aproximada-

mente 10 cortes por cada plano (transversal y radial) para cada especie. Los cortes se empaquetaron por especie y se introdujeron en alcohol hasta el tratamiento. Cada grupo de cortes se dividió en dos partes iguales. Posteriormente se aplicó un tratamiento previo al teñido en donde se sometió a una de las partes a un tratamiento con clorox comercial al 50 % con el fin de aclarar la muestra, es decir eliminar los contenidos celulares. Los cortes se dejaron entre 3-5 minutos en cloro. Posteriormente se enjuagaron con agua 3 veces (1 min cada una). A esto siguió un tratamiento de deshidratación con: alcohol al 50 % por 5 minutos, alcohol al 70 % por 5 minutos y alcohol al 96 % por 5 minutos. Se procedió con el teñido dejando las muestras en safranina ( $C_{20}H_{19}N_4^+Cl^-$ ) alrededor de una hora. Se enjuagaron en alcohol al 96 % y alcohol al 100 %. Se agregaron unas gotas de verde rápido y se enjuagaron casi inmediatamente. Para concluir la deshidratación se enjuagaron una última vez en alcohol al 100 %. Finalmente, con el objetivo de aclararlas, las muestras se introdujeron en xilol ( $C_6H_4(CH_3)_2$ ) por 15 minutos. Para el montaje se tomaron una a una las muestras del xilol colocándolas con cuidado en un porta objetos. Las muestras se acomodaron de derecha a izquierda. Posteriormente se agregó resina sobre los cortes y se colocó con cuidado un cubreobjetos con el fin de no dejar burbujas atrapadas. Las preparaciones se dejaron en reposo por una semana hasta que la resina secase.

### **Análisis de imágenes**

Como se mencionó previamente obtuvimos dos tipos de imágenes, las primeras con una escala milimétrica a partir de un corte macroscópico tomadas con un microscopio estereoscópico Axio Zoom.V16, Zeiss conectado a AxioCam MRc 5, Zeiss. Las segundas fueron las imágenes microscópicas. Una vez listas las preparaciones se tomaron imágenes en un microscopio Olympus BX51 con una cámara digital Infinity I (figuras: 2.12, 2.11, 2.13).

Para estimar los contenidos de holocelulosa, lignina y extractivos, se tomaron imágenes de 5 individuos sanos por especie. Las imágenes fueron analizadas con el programa de procesamiento de imagen digital, Image J. Para calcular numéricamente áreas, es necesario conocer la escala de la imagen y a partir de la misma, y su equivalencia en pixeles, se estiman las diferentes componentes. Todas nuestras imágenes tuvieron una escala de 300  $\mu\text{m}$ . Las células con coloración verde, en sus distintos matices, son

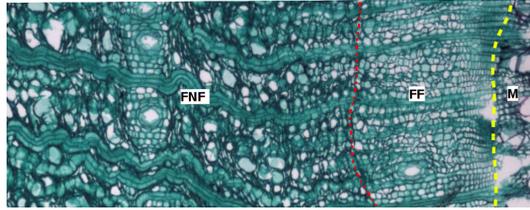


Figura 2.11: Sección de la corteza interna de *B. microphylla*. Sólo se muestra una parte, ya que el grosor de la corteza es bastante considerable con respecto a la escala que se utilizó. La línea punteada amarilla indica la división entre el xilema y el floema (madera y corteza), corresponde a la región de cambium vascular. La línea roja, es la división que ocurre entre el floema funcional y no funcional, esta división no fue considerada en el análisis, sin embargo vale la pena hacer la distinción anatómica (escala:  $300\mu\text{m}$ ).

la holocelulosa y así se cuantificó. Las secciones rojas, desde rojo claro a oscuro, se tomaron como material lignificado, y en nuestra estimación, compuestas en un cien por ciento de lignina y suberina en el caso de la corteza externa de *B. microphylla*. Finalmente, dado que trabajamos con imágenes aclaradas, los espacios en blanco se consideraron extractivos (figuras: 2.12, 2.11, 2.13). A partir del promedio de cada sección de cada uno de los individuos se estimaron los porcentajes de las tres principales componentes.

Las imágenes adquiridas para los individuos quemados 2.10 mediante las dos técnicas (microscopio estereoscópico y óptico), fueron analizadas de manera cualitativa para observar los daños a nivel anatómico que produce el fuego.

## 2.4.2. Resultados

### Componentes

En la Tabla 2.6 se reportan los porcentajes de lignina, holocelulosa y contenidos estimados mediante el análisis de imágenes microscópicas. Es importante tener en cuenta los grosores de cada sección para considerar la corteza como un todo (Tabla 2.2) ya que, a pesar que unas secciones aparentan tener un alto porcentaje en alguna componente, en realidad es un porcentaje pequeño en comparación a todo. Un claro ejemplo es *B. microphylla* con 63 % de suberina en la corteza externa, sin embargo, esta sección mide 2 mm, un poco menos de la décima parte del grosor total de

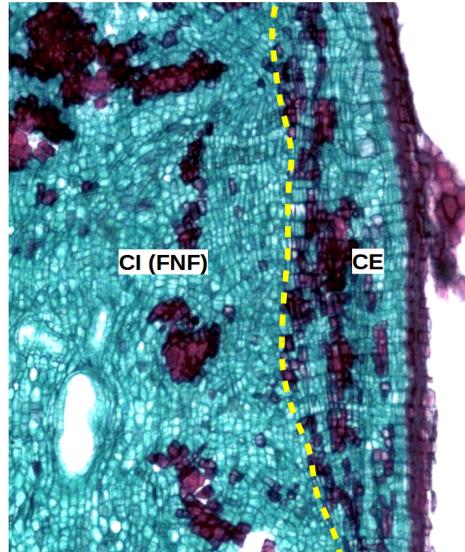


Figura 2.12: Corteza externa de *B. microphylla*. Sólo se muestra una sección al igual que en la imagen 2.11. Las células con coloración roja, predominantes en la corteza externa corresponden a la suberina. La línea punteada amarilla indica la división entre la corteza interna y la corteza externa, la corteza interna incluye e floema funcional y no funcional y la externa las células de felema, felodermis y felógeno que el árbol suele reciclar (escala:  $300\mu\text{m}$ ).

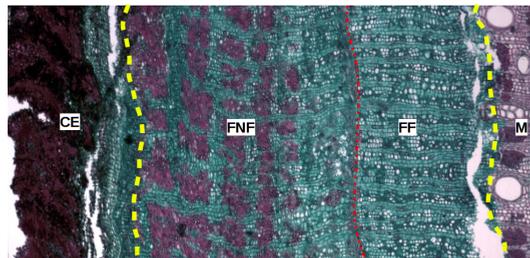


Figura 2.13: Corteza interna, externa y parte de madera de *O. tesota*. La coloración roja corresponde a células lignificadas. Las líneas amarillas indican la separación entre madera-corteza interna y corteza interna-externa. Una vez más la línea roja es una división no utilizada en el estudio pero sí existente entre las células de la corteza interna (escala:  $300\mu\text{m}$ ).

la corteza.

En ambos casos, la componente predominante en la corteza interna es la celulosa con 80.57 % en *B. microphylla* y 59.45 % en *O. tesota*. En cambio la lignina predomina en la corteza externa de *O. tesota* con 69.49 %. Para *B. microphylla* tenemos que la sustancia mas abundante es la suberina conformando el 62.70 %. Es importante notar que a pesar de que las células presentes, tienen la misma coloración que la lignina (figura 2.12), en el caso de esta especie es suberina. Los extractivos fueron considerablemente mas abundantes en la corteza interna de la *Bursera*, esto tiene sentido ya que existen muchos canales resiníferos con sustancias como los germacrenos [Noge y Becerra, 2009].

Tabla 2.6: Porcentajes de composiciones para ambas especies y sus respectivas secciones.

Sección	Extractivos (%)	Holocelulosa (%)	Lignina (%)
Bursera corteza externa	0	37.30	62.7 *
Bursera corteza interna	14.65	80.57	4.77
Olneya corteza externa	3.90	26.61	69.49
Olneya corteza interna	5.36	59.45	35.20

\* Nota: en el caso de la corteza externa de *Bursera microphylla* tenemos suberina.

## Daño por fuego

En las figuras 2.14, 2.15 se sintetizan las vistas macroscópicas y microscópicas de las cortezas dañadas. En *B. microphylla* fuimos capaces de encontrar individuos con daño que continuaron su crecimiento, para *O. tesota* no (Tabla 2.5). Los cortes anatómicos nos dieron una idea de por que ocurrió este fenómeno.

Para la *Bursera* observamos que el daño directo ocurrió en los primeros milímetros, esto ocurrió igualmente en otros individuos muestreados. En las imágenes podemos ver una capa delgada blanca que corresponde a la capa límite y a la peridermis de daño (figura 2.14). La formación de la peridermis de daño o necrofiláctica es precedida por el sellado de la superficie expuesta por un conjunto de células conocidas como la capa límite. Esta capa se deriva de células presentes cuando ocurre el daño. Se desarrolla inmediatamente bajo las células necrosadas en la superficie de la herida [Evert, 2006]. Esta barrera ligno-suberizada funge como una barrera a la

pérdida de humedad y a la invasión microbiana del tejido vivo y promueve la formación por debajo de la peridermis de daño [Nicholson y Hammerschmidt, 1992]. En los incisos (a), (b) y (c) de la figura 2.14, podemos notar además una región de respuesta (flecha 2) correspondiente al felógeno de daño. Su iniciación corresponde a una serie de divisiones periclinales debajo de la capa límite. Las células de corcho recién formadas se pueden distinguir debido a su arreglo radial respecto a la peridermis de daño [Evert, 2006]. La fecha 3 indicada en los incisos (a) y (b) de la figura 2.14, señala un daño en la madera. Cuando se provoca un daño, el cambium vascular sobreviviente produce una barrera anatómicamente distintiva que puede aparecer como un falso anillo en la madera [Shigo, 1984]. Esta respuesta puede deberse a cambios en los reguladores de crecimiento de la planta [Smith y Shortle, 1990]. La zona de barrera se define como un tejido de protección que consiste en células no conductoras producidas por el cambium vascular en respuesta a un daño mecánico, una infección o ambos [Armstrong et al., 1981]. Esta aísla o separa la madera infectada en el interior de la que se continúa formando hacia el exterior. La zona en que se presenta puede ser amplia y circunvalar el tallo, o puede extenderse en una distancia limitada en el momento de la herida [Moore, 1978, Mulhern et al., 1979]. En olmos atacados por *Graphium ulmiae* han descrito células parenquimáticas en el último anillo de crecimiento llenas de almidones y nuevas capas de madera posteriores al daño [Buisman, 1935]. En encinos se ha encontrado suberina en la paredes de estas células y en coníferas presencia de ductos resiníferos traumáticos [Pearce y Rutherford, 1981, Schuck, 1982, Tippet y Shigo, 1981]

En la figura 2.15 se observan los cortes de secciones dañadas y uno de la madera sana (2.15 (b)). La región sana se muestra ya que en los casos quemados es imposible fotografiar. La madera se separa de la corteza en cuanto ocurre el daño y el tejido cambia adoptando una coloración oscura debido a la necrosis. En las figuras 2.15(a) y 2.15(c) se ve el avance de la necrosis hasta la madera. Las células de parénquima se colapsan ya que el cambium vascular muere. Este colapso está acompañado con la presencia de contenidos rojos, que son probablemente taninos o suberina [Evert, 2006]. La respuesta de esta especie ante el fuego es inminente, a pesar de que el daño parece no penetrante (2.15(d)), las afectaciones internas penetran hasta la madera.

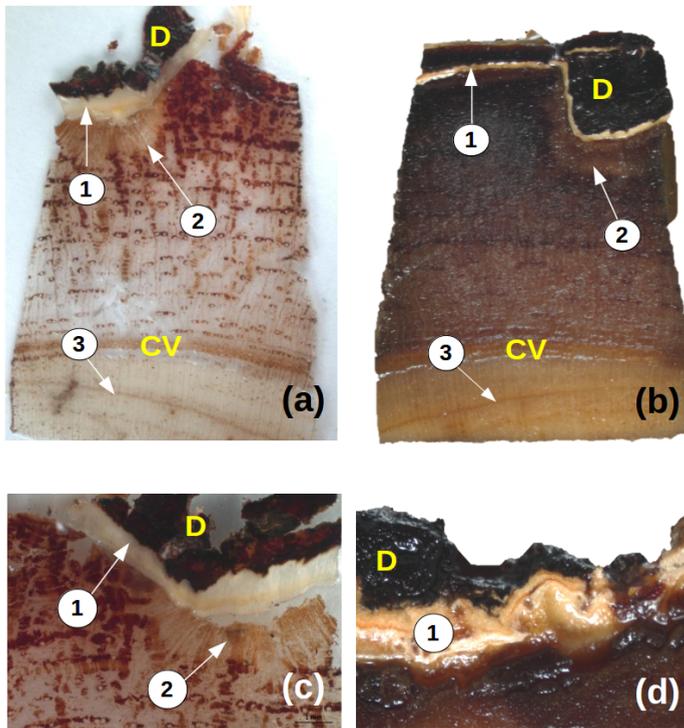


Figura 2.14: Imágenes tomadas con microscopio estereoscópico para *B. microphylla*. En todos los casos la D corresponde al daño provocado por el fuego, células necrosadas; CV se refiere a cambium vascular; 1 es la capa límite; 2 al tejido de regeneración; 3 daño resentido por CV (a) Corte microtómico transversal (escala: 2 mm) ; (b) Corte transversal completo (escala: 2 mm);(c) Ampliación de (a) (escala: 1 mm);(d) ampliación de (b) (escala: 1 mm).

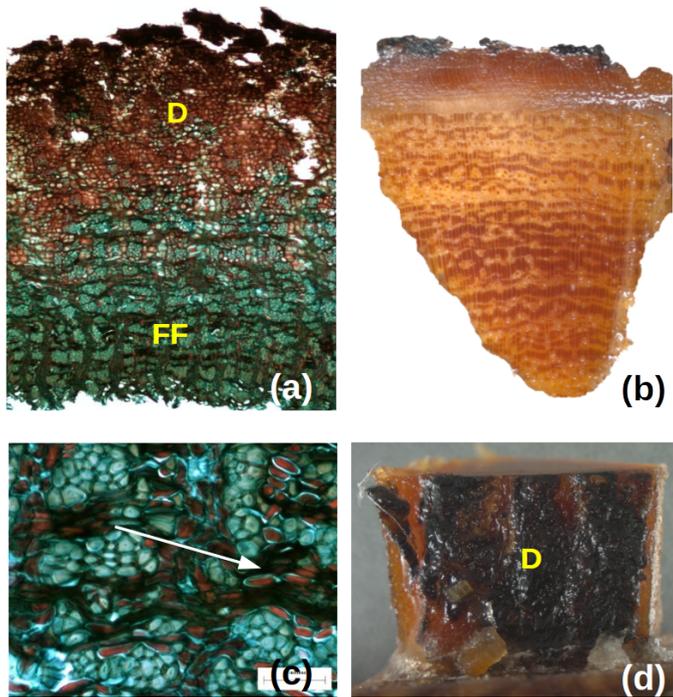


Figura 2.15: Imágenes tomadas con microscopio estereoscópico y óptico para *O. tesota*. Una vez más la D corresponde al daño provocado por el fuego, células necrosadas; FF se refiere a floema funcional. (a) Corte microtómico transversal, se observa necrosis de tejido hasta FF (escala  $300 \mu\text{m}$ ); (b) Imagen estereoscópica de sección sana (escala 2 mm); (c) Ampliación de (a), se observan las células colapsadas llenas de contenidos rojos (escala  $50 \mu\text{m}$ ); (d) Imagen frontal de corteza externa donde se observa el daño macroscópicamente (escala 2 mm)

### 2.4.3. Discusión

El estudio anatómico nos permitió estimar la composición de la corteza que no fue medida directamente y nos da mucha información respecto a la posible resistencia al fuego. En realidad no hay muchos estudios comparativos ya que la mayoría se enfocan en la madera o partes aéreas de la planta como biocombustible [Carrier et al., 2011, Leroy et al., 2009, Poletto et al., 2014].

Sen y colaboradores (2014) dividieron la corteza de *Quercus suber* y *Quercus cerris* en corteza externa (principalmente corcho) y corteza interna (floema). Para este estudio ellos no obtienen contenido de celulosa si no que encuentran en diferentes proporciones suberina, lignina, extractivos y polisacáridos. La lignina es la componente principal en la corteza interna de *Quercus cerris*, seguida por los polisacáridos, el contenido mineral, los extractivos y finalmente la suberina. Para la corteza externa de ambas especies la suberina fue la sustancia predominante. A pesar de tener un enfoque similar al nuestro, la comparación no es nada inmediata ya que los encinos y nuestras especies son distintos en más de un aspecto, por ejemplo *Quercus* acumula el ritidoma y tiene radios multiseriados muy amplios, atributos que no tienen las especies aquí estudiadas. En este mismo estudio se realiza un análisis térmico para ver la relevancia de la composición química y se obtuvo que la degradación térmica de las cortezas sin suberina ni extractivos comenzaba más tempranamente, lo cual le confiere a estas sustancias resistencia térmica. Se encuentra que la degradación del floema es similar a la del corcho, teniendo incluso la liberación de energía a temperaturas mayores [Sen et al., 2014]. Los resultados obtenidos aquí se incorporarán con los resultados de la siguiente sección.

## 2.5. Caracterización térmica

En este estudio se propuso estudiar la degradación térmico-oxidativa de dos árboles endémicos al Desierto de Sonora y de la mas preocupante especie exótica invasora de la región, el zacate buffel. Con ello logramos determinar la resistencia térmica como material y la respuesta ante nuevos regímenes de fuego de las especies nativas. Dado que los métodos termoanalíticos son ampliamente utilizados para la caracterización de diversos materiales, realizamos un análisis térmico de los materiales en cuestión.

A continuación se explica brevemente la teoría detrás del análisis térmico y de los estudios realizados, posteriormente se define nuestra metodología particular y finalmente se presentarán los resultados de este estudio.

## Análisis térmico

En este estudio nos centramos en la descomposición térmica de la fase sólida ya que es la que influye en la generación y propagación de los incendios forestales [Liodakis et al., 2002]. A pesar de que la degradación lignocelulósica de la biomasa es un proceso complejo de reacciones dependientes entre sí, el proceso se simplifica como se muestra en la figura 2.16 [Leroy et al., 2010].

La quema de biocombustible durante incendios forestales implica inicialmente una serie de procesos endotérmicos, correspondientes a una fase previa a la ignición. Durante esta fase el combustible se calienta y ocurre la evaporación del agua y la volatilización de sustancias orgánicas (e.g. CO, ácido fórmico, acético, hidrocarburos terpénicos) [Beall et al., 1970]. A mayores temperaturas comienza la pirólisis, proceso donde se rompen las moléculas del sólido en gases de menor masa molecular (e.g. volátiles), alquitranes, carbón y ceniza mineral [Liodakis et al., 2002]. Estos productos, a determinada temperatura reaccionarán con el oxígeno, una vez que este interviene tenemos el proceso de combustión, el cual es un fenómeno exotérmico ya que libera calor [Basu, 2010].

Como se mencionó nosotros nos enfocaremos en la degradación termico-oxidativa de los combustibles vegetales, es decir el último proceso exotérmico que ocurre en cuando se quema un material en una atmósfera abierta (aire). Para estudiar este proceso se utilizó un aparato de análisis térmico simultáneo (STA por sus siglas en inglés), este combina la calorimetría diferencial de barrido (DSC) con el análisis termogravimétrico (TGA). De manera práctica, este análisis permite obtener la pérdida de masa del material estudiado y la energía que tiene lugar en el proceso de descomposición a diferentes ritmos de calentamiento ( $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ) [Lázaro, 2015]. En la mayoría de los analizadores se modifica la atmósfera en la cual ocurren los procesos y el flujo de gas en el que se encuentra inmersa la muestra. En nuestro caso no fue posible, aspecto que se tuvo en cuenta para el análisis de los resultados.

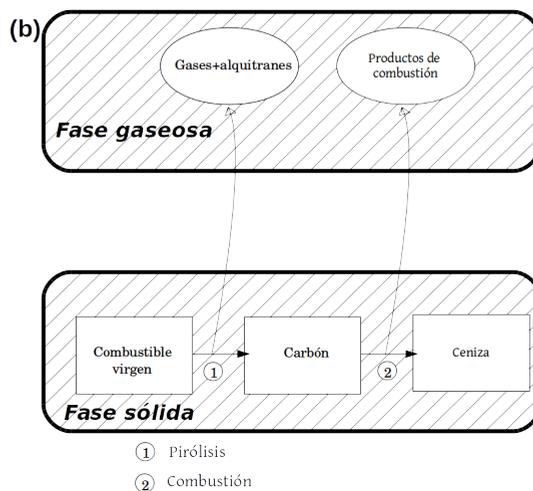
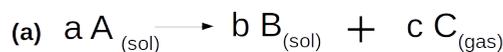


Figura 2.16: (a) Reacción general para la combustión de la fase sólida, donde hay cierta cantidad de una sustancia sólida y después de la reacción obtenemos otra cantidad de sustancia sólida y otra parte se transforma en gas. (b) Diagrama detallado, pero aún abstracto, de la degradación térmico-oxidativa donde existen dos fases: la pirólisis y la combustión.

Más a detalle, la termogravimetría (TGA) es la rama del análisis térmico en la cual se analiza la variación de la masa de una muestra en función de la temperatura (modo no-isotérmico) o en función del tiempo (modo isotérmico). Se utiliza para caracterizar la descomposición y estabilidad térmica de los materiales en diferentes condiciones y para examinar la cinética de los procesos físico-químicos [Lever et al., 2014]. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es la técnica dentro del análisis térmico, más utilizada [Lázaro, 2015]. La DSC mide los cambios energéticos y a qué temperatura suceden, en la muestra al calentarla, enfriarla o mantenerla a temperatura constante, en otras palabras mide el flujo de energía dentro y fuera de la muestra en función de la temperatura o del tiempo.

## Análisis cinético

Diversos métodos matemáticos se utilizan para calcular la cinética de reacciones en el estado sólido:

- los métodos de ajuste mediante un modelo
- los métodos de isoconversión (modelo libre)

El primer método consiste primero en establecer un modelo que se ajuste a los datos y posteriormente determinar parámetros cinéticos mediante la ecuación de Arrhenius. Este modelo tiene la ventaja de sólo necesitar una corrida de un TGA, sin embargo casi cualquier curva se ajusta a los datos en virtud de la ecuación de Arrhenius pero sólo un par de parámetros resultan del método. Debido a ello la investigación a favorecido al método de isoconversión, que calcula los parámetros sin hacer suposiciones [Vyazovkin y Wight, 1999].

Por lo anterior, el tratamiento de nuestros datos termogravimétricos se realizará mediante un método de isoconversión Kissinger-Akshira-Sunose (KAS). La suposición básica de estos métodos es que la velocidad de reacción a determinado grado de conversión (por ejemplo a 0.5 mg perdidos) depende meramente de la temperatura [Vyazovkin y Wight, 1997]. Para utilizar este método es necesario realizar una serie de experimentos a distintas rampas de calentamiento [Akshira y Sunose, 1971].

Primeramente definimos el grado de conversión de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{m_i - m}{m_i - m_f} \quad (2.4)$$

Dónde:

- $m$  : masa de la muestra (mg)
- $m_i$  : masa inicial de la muestra (mg)
- $m_f$  : masa final de la muestra (mg)

Es importante notar que un valor de  $\alpha$  de 1 corresponde a la pérdida total de masa. Teniendo en cuenta la definición anterior, la siguiente ecuación

describe la razón de cambio de una reacción heterogénea en el estado sólido:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} f(\alpha) \quad (2.5)$$

Dónde:

- A : factor pre exponencial
- $E_a$  : energía de activación (kJ mol<sup>-1</sup>)
- R : constante del gas ideal= 8.134 J mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
- T : temperatura (K)
- $f(\alpha)$  : modelo cinético de reacción

Debido a que utilizamos una rampa de calentamiento lineal, i.e  $\beta = \frac{dT}{dt}$  (elevamos la temperatura en el tiempo) la ecuación anterior se transforma en:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{\frac{-E_a}{RT}} f(\alpha) \quad (2.6)$$

Dónde:

- A : factor pre exponencial
- $E_a$  : energía de activación (kJ mol<sup>-1</sup>)
- R : constante del gas ideal= 8.134 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>
- T : temperatura (K)
- $f(\alpha)$  : modelo cinético de reacción
- $\beta$  : rampa de calentamiento

Integrando tenemos que:

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{\frac{-E_a}{RT}} dT = \frac{AE_a}{R\beta} p(x) \quad (2.7)$$

Dónde:

- $A$  : factor pre exponencial
- $E_a$  : energía de activación ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )
- $R$  : constante del gas ideal=  $8.134 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- $T$  : temperatura (K)
- $f(\alpha)$  : modelo cinético de reacción
- $\beta$  : rampa de calentamiento
- $x = \frac{E_a}{RT}$
- $p(x) = \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x^2}$

El método de isoconversión de KAS usa la siguiente aproximación:

$$p(x) \approx \frac{e^{-x}}{x^2}$$

Al tomarlo en cuenta y obteniendo el logaritmo natural de la ecuación 2.7, tenemos lo siguiente:

$$\ln\left(\frac{\beta_i}{T_{ij}^2}\right) = \ln\left(\frac{A(\alpha_j)R}{E_a(\alpha_j)}\right) - \ln(g(\alpha_j)) - \frac{E_a(\alpha_j)}{RT_{ij}} \quad (2.8)$$

Los subíndices  $j$  e  $i$ .  $A_{\alpha_j}$  y  $E_a(\alpha_j)$  corresponden, respectivamente, al factor pre-exponencial y a la energía de activación para determinada razón de conversión  $\alpha_j$ . A su vez este factor de conversión ( $\alpha_j$ ) ocurre a determinada temperatura  $T_{ij}$ , para cada razón de calentamiento  $\beta_j$ . En nuestro caso particular se utilizaron cuatro rampas de calentamiento,  $\beta = 5, 10, 20, 40$  °C  $\text{min}^{-1}$  para razones de conversión entre 0.05 hasta 0.95.

Es importante la dependencia de la energía de activación ante el nivel de conversión ya que esta nos provee información cinética importante. Vyazovkin y colaboradores notaron que la dependencia entre ambas ayuda, no sólo a desmenuzar la complejidad de un proceso, si no que ayuda a identificar el marco cinético [Vyazovkin y Lesnikovich, 1990].

### 2.5.1. Metodología

#### Pre-procesamiento de muestras

El material seco, proveniente de las secciones (corteza externa, interna y madera) divididas para las pruebas de densidad y humedad (figura: 2.4), se molió en un molino eléctrico para semillas y se tamizó con una malla de 500  $\mu\text{m}$  para obtener un tamaño de partícula fino. Esto se realizó para garantizar homogeneidad en la masa y tamaño de partícula de la muestra. Para evitar la rehumectación, las muestras se empaquetaron al vacío para transportarlas desde Hermosillo, Sonora a la Ciudad de México, lugar donde se realizaron las pruebas.

#### Laboratorio

Para realizar los experimentos se utilizó un analizador térmico simultáneo LINSEIS STA PT1600 y sus respectivos programas de adquisición (Linseis Platinum Acquisition) y evaluación (Linseis Platinum Evaluation) de datos. Las muestras se colocaron en crisoles abiertos de alúmina (óxido de aluminio). Antes de comenzar las mediciones se pesaron los crisoles ya que no tenían la misma masa, se intentó utilizar aquellos con el mismo peso, sin embargo, debido a que debían realizarse múltiples pruebas se utilizó un rango de masas de crisoles entre  $140\text{-}199 \pm 0.002\text{mg}$ . Tanto los crisoles como las muestras se pesaron en una microbalanza Mettler Toledo XP-6.

Para corregir nuestras curvas fue necesario medir las curvas cero y las curvas de calibración. Las curvas cero son corridas experimentales con el portamuestras sin ningún tipo de muestra. Es fundamental realizar estas mediciones para calibrar el equipo ya que éste tiene ruido. En cada curva medida debe restarse este ruido para obtener la señal real.

Las calibraciones a las mediciones de DSC, se realizaron a partir la temperatura de fusión y de la entalpia de referencia de aluminio y del indio  $T_{fus}(\text{In})=156.65^\circ\text{C}$  (429.8K),  $\Delta H_{fus}(\text{In})=28.5 \text{ J g}^{-1}$ ,  $T_{fus}(\text{Al})=660.15^\circ\text{C}$  (933.65 K),  $\Delta H_{fus}(\text{Al})=400.1 \text{ J g}^{-1}$ . La degradación térmica se investigó desde temperatura ambiente 299.15K hasta  $850^\circ\text{C}$  (1123.15 K).

En cada corrida la muestra pulverizada se colocó de manera uniforme en el fondo del crisol de alúmina y se pesó en una balanza de alta precisión.

Como mencionamos previamente, al no regular el flujo del gas, se utilizó una atmósfera oxidante estática (aire). Los experimentos se llevaron a cabo en distintas rampas de calentamiento ( $\beta=5-40 \text{ K min}^{-1}$ ) en el mismo intervalo de temperaturas que las curvas de calibración.

La corrida se programó con ayuda del programa de adquisición de datos acoplado al analizador. En esta interfáz se:

- calibra la medición de la masa inicial de la muestra
- establece la curva cero correspondiente para que se haga automáticamente el ajuste
- programa el ciclo de calentamiento y enfriamiento con las rampas correspondientes
- añaden datos como: tipo de muestra, fechas, laboratorio, etc.
- calibra la microbalanza interna del equipo para que las mediciones estén ajustadas

Debido a que los crisoles se reutilizaron, finalizando cada medición, se retiraron los residuos de los crisoles, se lavaron con acetona y se colocaron en una mufla entre  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , esto aseguró su limpieza para la siguiente medición. Es importante mencionar que todas las muestras y crisoles se manipularon con pinzas para evitar el contacto con residuos externos.

### 2.5.2. Resultados

A continuación se muestran los resultados a partir del método de isoconversión KAS. Los datos para realizar este análisis se obtuvieron a partir de la señal del análisis termogravimétrico (ver Apéndice A). Se calcularon los valores de  $E_a(\alpha_j)$  para toda la degradación con valores de  $\alpha$  entre 0.05 a 0.95, con un aumento de 0.05. Las Tablas 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, resumen las ecuaciones de las regresiones lineales según la aplicación del método KAS.

Tabla 2.7: Corteza interna de *Bursera microphylla*

$\alpha$	$y = mx + b$	$R^2$
0.05	-6502.2912x+12.1436	0.9201
0.1	-1346.3198x-6.2244	0.2053
0.15	-11169.9963x+12.4626	0.3619
0.2	-20352.0128x+29.0298	0.4163
0.25	-26136.1797x+38.8550	0.4098
0.3	-29207.7663x+43.2469	0.4184
0.35	-30885.4976x+44.9477	0.4224
0.4	-33356.5675x+48.0148	0.5336
0.45	-34842.9914x+49.1923	0.6180
0.5	-27823.4858x+35.9014	0.6251
0.55	-20396.4926x+22.2665	0.6701
0.6	-18084.3503x+17.2655	0.7404
0.65	-38825.7801x+47.0215	0.8844
0.7	-47651.5911x+58.4031	0.9064
0.75	-34961.7251x+ 38.9870	0.9109
0.8	-27286.2983x+27.3931	0.8768
0.85	-22951.1404x+20.7517	0.8683
0.9	-20042.9873x+16.1586	0.8015
0.95	7241.3971x-19.8927	0.2978

Tabla 2.8: Corteza externa de *Bursera microphylla*

$\alpha$	$y = mx + b$	$R^2$
0.05	-2703.4316x-0.9796	0.5667
0.1	-4840.7531x+0.6354	0.6240
0.15	-13092.7698x+15.5203	0.7497
0.2	-19943.7978x+27.2657	0.8417
0.25	-21560.8321x+29.1683	0.8474
0.3	-22454.7748x+29.8191	0.8637
0.35	-21253.6797x+26.8776	0.9071
0.4	-21112.8329x+25.9467	0.9232
0.45	-21141.1489x+25.3552	0.9162
0.5	-19807.1006x+22.4387	0.8958
0.55	-16053.6410x+15.4846	0.8454
0.6	-12779.0118x+9.3661	0.9009
0.65	-12333.5732x+7.9444	0.9115
0.7	-14547.7723x+10.6113	0.8799
0.75	-17199.5498x+13.9207	0.9189
0.8	-19197.3286x+16.2639	0.9784
0.85	-18926.7238x+15.4136	0.9952
0.9	-18634.3632x+14.4767	0.9876
0.95	-2816.2542x-7.5418	0.8748

Para los cuatro casos, las regresiones lineales se obtuvieron de la ecuación 2.8. De esta manera es claro que la pendiente de la regresión es:  $m = \frac{E_a(\alpha_j)}{RT_{ij}}$ , la variable independiente corresponde a:  $x = \frac{1}{T_{ij}}$ , la ordenada al origen es:  $b = \ln\left(\frac{A(\alpha_j)R}{E_a(\alpha_j)}\right) - \ln(g(\alpha_j))$ . Se reporta el coeficiente de determinación  $R^2$  para cada uno de los niveles de conversión. Es pertinente notar que, a pesar de que para la mayoría de los casos (para ambas especies y sus cortezas) el modelo explica mas del 40% de la variabilidad, cada regresión fue hecha con sólo cuatro puntos (provistos por cada rampa de calentamiento).

Tabla 2.9: Corteza interna de *Olneya tesota*

$\alpha$	$y = mx + b$	$R^2$
0.05	-1066.8930x-6.6921	0.1302
0.1	-9462.9299x+9.7712	0.3919
0.15	-19726.4123x+28.1495	0.4914
0.2	-26257.8064x+ 38.7193	0.6221
0.25	-30036.8632x+ 43.9873	0.6995
0.3	-28788.0826x+ 40.3864	0.7398
0.35	-30443.06521x+42.1194	0.8339
0.4	-30440.8196x+ 41.0693	0.8693
0.45	-29792.5181x+ 38.9928	0.8480
0.5	-32560.7544x+ 42.3584	0.7689
0.55	-25412.3821x+ 29.4996	0.5441
0.6	-21345.7357x+ 21.4882	0.5751
0.65	-21723.7686x+ 20.5905	0.7648
0.7	-24077.9281x+ 22.8523	0.9142
0.75	-25265.4021x+ 23.7675	0.9392
0.8	-27360.5863x+ 25.9128	0.9776
0.85	-26399.1309x+ 23.9296	0.9892
0.9	-31625.5959x+ 29.5468	0.8789
0.95	5903.3053x-17.4022	0.4338

Tabla 2.10: Corteza externa de *Olneya tesota*

$\alpha$	$y = mx + b$	$R^2$
0.05	2743.40x-17.26	0.1147
0.1	6979.64x-24.85	0.4101
0.15	-6979.51x+3.40	0.01932
0.2	-52120.47x+85.30	0.7586
0.25	-48688.07x+76.18	0.9033
0.3	-44780.78x+67.09	0.9780
0.35	-35459.58x+49.69	0.9917
0.4	-29603.69x+38.87	0.9967
0.45	-29905.52x+38.38	0.9874
0.5	-27763.46x+33.77	0.9655
0.55	-22882.12x+24.82	0.8956
0.6	-21556.47x+21.62	0.9056
0.65	-22835.76x+22.47	0.9318
0.7	-26011.64x+26.14	0.9356
0.75	-27057.55x+26.94	0.9436
0.8	-25820.80x+24.53	0.9146
0.85	-26427.22x+24.51	0.8271
0.9	-20791.12x+16.21	0.7464
0.95	2439.98x-13.72	0.0923

En las figuras 2.17, 2.18, 2.19 se observa el grado de dependencia de la

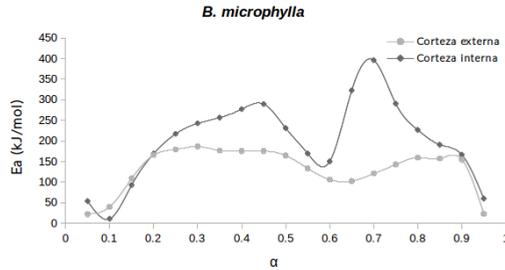


Figura 2.17: Energías de activación según nivel de de conversión para secciones de corteza de *B. microphylla*

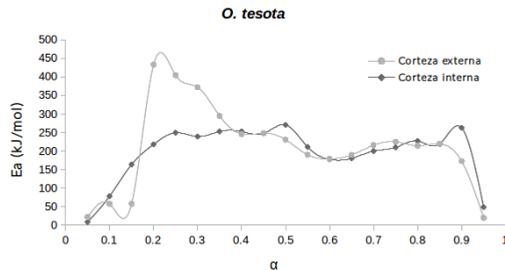


Figura 2.18: Energías de activación según nivel de conversión para secciones de corteza de *O. tesota*

energía de activación según la razón de conversión (ecuación 2.4). Dado que en un proceso reacción simple, los parámetros de la ecuación de Arrhenius, en este caso la energía de activación, no dependen del grado de transformación [Vyazovkin, 1993], se concluye que estamos frente a una reacción compleja.

Para procesos de combustión nos referimos a la energía emitida como entalpía de combustión. Esta representa la cantidad de calor liberado durante un proceso de combustión a flujo constante, es decir cuando 1 kg (o 1 kmol) de combustible se quema completamente a una presión y temperatura específicos [Cengel y Boles, 2002]. En particular para el caso de la combustión de biomateriales, es crucial conocer esos valores [Leroy et al., 2009]. Mediante la calorimetría diferencial de barrido, se logró determinar este valor para las dos secciones de cada especie y para el zacate buffel. A

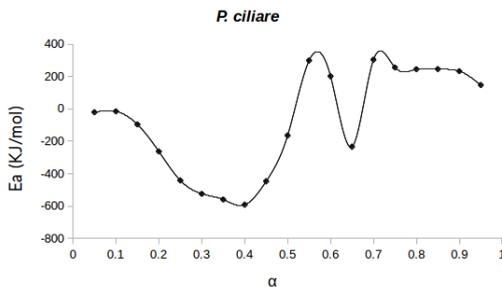


Figura 2.19: Energías de activación según nivel de conversión para secciones de corteza de *P. ciliare*

partir de la integración numérica de la señal de las curvas obtenidas con el analizador térmico simultáneo (figuras: A.1(b), A.2(b), A.3(b), A.4(b), A.5(b)) se obtuvo la energía que corresponde a la oxidación de los combustibles vegetales en una atmósfera abierta. Antes de realizar la integración de las curvas se tuvo que realizar una corrección de la curva base a partir de las mediciones de las curvas cero previamente mencionadas. La manipulación de los datos se realizó en el programa Origin (ver Anexo).

Gran parte de los estudios de entalpía se basan en valores de contenido de calor medidos por una bomba calorimétrica. En estas mediciones las condiciones son a volumen constante provocando un aumento de temperatura, situación diferente a la de un incendio forestal a presión atmosférica [Leroy et al., 2009]. De esta forma los valores en este estudio están sobrestimados debido a que no hubo posibilidad de purgar la celda de medición y evitar un aumento de presión. Sin embargo los valores de la Tabla 2.11 son del orden de valores obtenidos en otros estudios con calorimetría de bomba.

Los valores máximos se obtuvieron para la corteza interna de ambas especies con  $21083.80 \text{ kJ kg}^{-1}$  para la *Bursera* y  $20979.79 \text{ kJ kg}^{-1}$  para *Olneya*. Para el caso del palo fierro, tenemos que los valores para la corteza externa son similares ( $20413.05 \text{ kJ kg}^{-1}$ ), esto tiene sentido dado que ambos tienen un contenido de lignina y celulosa proporcionalmente similar (Tabla 2.6). Para la *Bursera* los valores difieren un poco más ( $18240.72 \text{ kJ kg}^{-1}$  para CE) pero, una vez más, corresponde a la diferencia composicional de la corteza externa e interna, poseyendo muchos más extractivos

Tabla 2.11: Entalpias

Sección	$\Delta H(kJkg^{-1})$
<i>B. microphylla</i> corteza interna	21083.80 $\pm$ 915.88
<i>B. microphylla</i> corteza externa	18240.72 $\pm$ 435.47
<i>O. tesota</i> corteza interna	20979.79 $\pm$ 590.39
<i>O. tesota</i> corteza externa	20413.05 $\pm$ 326.52
<i>P. ciliare</i>	17795.72 $\pm$ 297.24

y celulosa la CI.

### 2.5.3. Discusión

Es importante notar que para las dos especies y para las dos secciones, al inicio de todas las curvas la energía de activación se presenta un incremento drástico para  $0,1 < \alpha < 0,2$ , esto es característico de un proceso que involucra reacciones de competencia [Vyazovkin, 1996]. Este fenómeno corresponde a temperaturas entre 100 y 250 ° C (figuras A.1(c), A.1(d), A.2(c), A.2(d), A.3(c), A.3(d), A.4(c), A.4(d), A.5(c), A.5(d)), intervalo en el cual comienza la emisión de los gases de la pirólisis y su oxidación. Estas reacciones se consideran reacciones de competencia ya que conforme se producen gases, estos son inmediatamente oxidados por el aire [Leroy et al., 2010].

La última etapa de conversión, aproximadamente  $\alpha > 0,85$  (para los 4 casos), es característica de procesos en los cuales ocurre un cambio de un régimen cinético a un régimen de difusión. Estos procesos son comunes en la descomposición térmica de la madera que reacciona como se muestra en la figura 2.16. En estos casos una capa de producto de la fase sólida crece y la difusión del gas a través de ella gradualmente se vuelve la velocidad límite de la descomposición [Vyazovkin, 1996]. Los valores bajos de la energía de activación para altos niveles de conversión son característicos de la difusión de un gas en el estado sólido mas que de la termólisis en el estado sólido [Vyazovkin, 1993].

Para el caso de la corteza interna de *B.microphylla* la energía de acti-

vación es mayor que para la corteza externa (figura 2.17), variando entre 200 y 400 kJ mol<sup>-1</sup>. Los valores para la corteza externa no superan los 200 kJ mol<sup>-1</sup>. Como observación no hay que olvidar que estos valores son mayores a los de las sustancias puras y en una atmósfera no oxidante como los reportados en la literatura [Elder et al., 2011, Carrier et al., 2016, Jin et al., 2013].

Ademas notamos la presencia de dos secciones en ambos casos. La primera se encuentra entre valores de conversión entre 0.2 y 0.5, correspondiente a temperaturas entre 250 a 400 ° C. Dado que la composición predominante en *B. microphylla* (Tabla 2.6) es la celulosa, esta primer sección es atribuible a la descomposición oxidante de la misma y de otras sustancias presentes como extractivos y lignina. En el caso de la corteza interna tenemos después de esta primer sección un decremento, este comportamiento probablemente se debe a la presencia de muchos gases en este punto.

Posteriormente hay un incremento súbito, entre  $0,6 < \alpha < 0,7$  alcanzando el valor máximo para la energía de activación. Esto es probable que se deba a que la holocelulosa y la  $\alpha$ -celulosa forman estructuras aromáticas policíclicas de mayor estabilidad térmica [Pastorova et al., 1994]. Aunando estos resultados a los grosores respectivos (Tabla 2.2) y a las observaciones anatómicas, se afirma que la corteza interna funge como una barrera ante el fuego.

Para *O. tesota* tenemos que la energía de activación en la corteza externa tiene valores mas altos que aquellos en la corteza interna, oscilando entre los 200 y 433 kJ mol<sup>-1</sup> de manera general. La corteza interna por su parte, no supera los 300 kJ mol<sup>-1</sup>. Esto una vez mas está en concordancia con los grosores. Sin embargo, a pesar de la alta energía de activación, la mayor parte de la corteza externa de *O. tesota* es ritidoma y tiene bajos contenidos de humedad (Tabla 2.6). De esta manera, a pesar de que sus componentes químicas requieran mas energía para degradarse, el hecho de que se fragmenta fomenta su capacidad como combustible. Ademas durante la degradación de la lignina, esta incrementa su  $E_\alpha$  conforme aumenta la conversión, [Carrier et al., 2016]. La lignina suele incrementar su estabilidad térmica debido al caracter aromático de la ceniza derivada de la misma a mayores temperaturas, este derivado es un material de carbono altamente reticulado [Sharma et al., 2004].

De las figura 2.18, es claro que no hay dos secciones tan marcadas para la  $E_{\alpha}$ . La corteza interna podría considerarse una gran meseta entre  $0.2 < \alpha < 0.9$  con valores entre 170 y 270 kJ mol<sup>-1</sup>. Por tanto se habla de una reacción de degradación mas o menos homogénea de todas las componentes, holocelulosa, lignina y extractivos (Tabla 2.6). Por otro lado la corteza externa presenta un alto valor inicial, disminuyendo y volviéndose considerablemente estable a partir de  $\alpha > 0,4$ , de hecho los valores a partir de ese nivel de conversión oscilan entre los mismos límites que la corteza interna. Este pico inicial tan alto se adjudica a dos factores: 1) debido a su composición las reacciones de competencia iniciales requieren mucha mas energía, o 2) que la corteza externa atrapa materiales minerales externos que ta vez requieran mas energía para comenzar a degradarse, pero que a partir de cierto punto no interfieran con la degradación de la materia orgánica. Sin embargo estas son especulaciones que deben comprobarse con mayor detalle.

Los valores para la energía de activación de *P. ciliare* en el rango de conversión entre 0.1 y 0.7 tuvieron valores numéricos negativos. Esto es atribuible a tres factores: (1) el modelo de isoconversión no es válido para ciertos valores de conversión; (2) la ley de Arrhenius no es aplicable a ciertos valores de conversión; (3) reacciones múltiples que se sobrelapan están teniendo lugar [Jin et al., 2013]. No obstante, dado que no tenemos repeticiones de la medición, los valores podrían corresponder simplemente a un error de medición.

En cuanto a la entalpía de combustión, la literatura se ha enfocado principalmente en analizar cortezas de coníferas con algunas excepciones de angiospermas comunes del hemisferio norte. Se han reportado valores desde 17177.51 kJ kg<sup>-1</sup> para el olmo americano, 20,160 kJ kg<sup>-1</sup> para el cedro rojo, 21,900 kJ kg<sup>-1</sup> para alguna especie del género *Pinus*, hasta 25027.76 kJ kg<sup>-1</sup> para el olmo americano y 25,230 kJ kg<sup>-1</sup> para el abeto Douglas [Kelsey et al., 1979, Ince, 1979, Demirbaş y Demirbaş, 2004]. Los valores de en la Tabla 2.11 son consistentes con estos valores estando en el mismo orden.

En cuanto a las especies herbáceas Friedl y colaboradores encontraron valores para diversos pastos de 18035 kJ kg<sup>-1</sup> y 19135 kJ kg<sup>-1</sup> para

individuos del género *Miscanthus* [Friedl et al., 2005]. Otros estudios encontraron valores de  $17490 \text{ kJ kg}^{-1}$  para el pasto varilla (*Panicum virgatum*) [Szemmelveisz et al., 2009] y  $17400 \text{ kJ kg}^{-1}$  para otro pasto no especificado [Demirbaş y Demirbaş, 2004]. Por otro lado, en este estudio se obtuvo un valor de  $17795.72 \text{ kJ kg}^{-1}$  para *P. ciliare* el cual, una vez mas, está probablemente sobreestimado (2%) pero coincidente con valores de otros estudios.

La energía liberada para el zacate buffel nos permite calcular el frente de intensidad del fuego provocado por el mismo. Un frente activo durante un incendio forestal tiene tres componentes básicas: (1) se dispersa, (2) consume combustible y (3) produce energía en forma de calor mediante una reacción de combustión flamable [Van Wagner, 1970]. La intensidad de fuego es la producción equivalente al producto de la energía liberada por el combustible disponible y su razón de dispersión, es decir el calor liberado por unidad de tiempo por unidad de longitud del frente de llama [Byram, 1959]. Lo anterior se expresa en la siguiente ecuación:

$$I = Hwr \quad (2.9)$$

Dónde:

- H: es el calor de combustión en ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- w: es la masa de combustible consumido por unidad de área ( $\text{kg m}^{-2}$ )
- r: velocidad de dispersión ( $\text{m s}^{-1}$ )

En un estudio realizado en Avra Valley y Saguaro National Park, zonas correspondientes a la división superior del desierto de Sonora en Arizona, se realizaron quemas prescritas para determinar características del fuego por zacate buffel [McDonald y McPherson, 2011]. Para las condiciones de ese momento se determinó que la velocidad de dispersión para el pasto fue de  $0.67 \text{ m s}^{-1}$ . Es importante recordar que la intensidad del fuego es una variable cambiante según las condiciones de viento y combustible. Sin embargo utilizando ese valor para la velocidad de dispersión obtenemos valores de intensidad de fuego de  $2539.63 \text{ kW m}^{-1}$  para *B. microphylla* y  $3076.17 \text{ kW m}^{-1}$  para *O. tesota*. En otro estudio llevado a cabo en laboratorio se determinó que los pastos tienen una velocidad de dispersión de  $.0132 \text{ cm s}^{-1}$  y arden por un corto tiempo (0.5 min) a bajas temperaturas [Fuentes-Ramirez et al., 2016]. Bajo estas condiciones tenemos que la intensidad de

fuego es de  $50.04 \text{ kW m}^{-1}$  para *B. microphylla* y  $60.61 \text{ kW m}^{-1}$  para *O. tesota*.

Estos valores son contrastantes y no consideran ciertos aspectos respecto a la intensidad de fuego. El valor de energía transferida se midió en base a cierta cantidad de masa seca y, como se mencionó previamente, con condiciones de presión aumentadas. Esto provoca una circunstancia poco parecida a un incendio silvestre. Las pérdidas por radiación, combustión incompleta y por presencia de humedad en el combustible, deben ser consideradas para reducir este valor. Se propone reducir este valor por las reacciones de vaporización del agua (calor latente absorbido) sustrayendo  $1263 \text{ kJ kg}^{-1}$  [Byram, 1959], también se propone reducir  $24 \text{ kJ kg}^{-1}$  por contenido de humedad por punto porcentual [Van Wagner et al., 1972].

Las reducciones por radiación y combustión incompleta son un poco más subjetivas. Alexander sugiere que el porcentaje energético debido a la radiación durante la reacción de combustión es difícil de cuantificar y además contribuye a la emisión, por lo que no debe desestimarse (Alexander 1980). La línea de intensidad de fuego de Byram asume que el combustible se consume por completo conforme pasa el frente de flama, pero ignora la combustión latente que permanece horas o días después del fuego (Keeley 2009). Incluso cuando la biomasa se estima como la diferencia de inventarios antes y después del fuego, la intensidad aumenta (Alexander 1982; Scott and Reinhardt 2001).

En nuestro caso sólo se estimó el combustible potencial debajo del dosel por lo que podemos hablar de una cota máxima. Tomando todo lo recién mencionado se concluye que necesitamos los datos medidos en las secciones anteriores para estimar un daño real. La intensidad del frente de fuego se ha presentado como la única medida apropiada para medir la intensidad de fuego mas ha sido confusa debido a que otras mediciones de emisión energética dan mejores resultados según el enfoque [Keeley, 2009]. Por ejemplo el consumo de hojarasca está más relacionado a temperaturas superficiales mas que a la intensidad del frente de fuego [Johnson y Miyaniishi, 2001]. Mas aún, y de particular interés para nosotros los patrones de mortandad en árboles no son explicados mediante el frente de intensidad. La mortalidad en árboles también se debe a la emisión de calor relacionada al tiempo de residencia de llama, en función de la combustión latente en la

hojarasca [Sackett et al., 1996] o mas aún por efectos posteriores al fuego [Michaletz et al., 2012] .



# Capítulo 3

## Consideraciones finales

### 3.1. Síntesis del trabajo

Este trabajo tuvo como objetivo determinar que tan susceptibles son los dos árboles estudiados ante el fuego producido por el zacate buffel. De manera general se concluye que los caracteres físicos, morfológicos y anatómicos desarrollados por *Bursera microphylla*, le han permitido un nivel de supervivencia mayor ante un fuego no presente con anterioridad. Primeramente, el hecho de que tenga un nivel tan alto de humedad inicial tanto en su corteza externa como interna, provee una primer capa protectora ante el fuego. La sobrevivencia depende de la cantidad de agua en el sistema ya que, en cualquier material que ignicione, cierta energía se invertirá en evaporar el agua libre y ligada químicamente a partículas tanto vivas como muertas [Keane, 2015]. A partir de otras características observadas concluimos que, aunque el valor de humedad está posiblemente sobreestimado debido a la presencia de extractivos volátiles, evaporar estos también implica un gasto energético que amortigua los efectos del fuego.

La corteza externa a pesar de ser sumamente delgada tiene dos ventajas, además del contenido de humedad, para amortiguar los efectos del fuego. La primera es que su composición es meramente suberina, que se ha comprobado que tiene un efecto retardante ante el calor generado en un incendio [Şen et al., 2014]. Es en este punto que notamos que una característica, inicialmente desarrollada por algunas plantas para evitar la pérdida de humedad [Schönherr, 1982], resulta benéfica frente a una fuente de calor externa. La segunda ventaja es su alto contenido mineral. Usualmente la biomasa con un alto contenido mineral tenderá a quemarse mas

lento y a hacer combustión latente. De hecho los retardantes de fuego dependen de ello alentando la dispersión del fuego mediante el aumento del contenido mineral [Giménez et al., 2004].

Por otro lado la corteza interna tiene un grosor promedio de casi dos centímetros, el cual en algunos individuos llega a ser mayor. Esto actúa como una barrera física ya que hay que degradar mas material para alcanzar cambium vascular (Tabla 2.2, figura 2.14). Además de su elevado contenido de humedad, su alto contenido en celulosa (2.6) le confiere una capacidad retardante debido a que durante la reacción de combustión, la energía de activación es alta, lo cual implica que se requiere esa energía para iniciar la reacción química. Esta degradación ocurre en dos etapas y oscila entre los 232 y los 249 kJ mol<sup>-1</sup> (figura 2.17).

Con estas características de ambas secciones, es indudable que las características físicas y térmicas de *B. microphylla* le confieren capacidades contra el fuego, sin embargo el análisis cualitativo nos confirió información para reafirmar esta información. Durante el muestreo en campo fue fácil encontrar individuos vivos pero dañados de *B. microphylla* a diferencia del palo fierro donde la mayoría de los individuos con marcas de fuego estaban muertos (Tabla 2.5). Sin cuantificarlo de manera concreta, observamos la supervivencia de los meristemos apicales y subterráneos, estos son imperativos en la supervivencia total de un árbol [Michaletz y Johnson, 2008]. También se observó la capacidad de cambium vascular de reaccionar ante un daño externo (figura 2.14). Se observa que hay cierto impacto pero sin daño directo.

Finalmente, pero no menos importante, es la poca capacidad de *B. microphylla* para acumular biomasa muerta, seca o de otro tipo. La cantidad de combustible que aporta el buffel, es la menos alarmante debajo del dosel (Tabla 2.4) sin embargo alrededor de la copa hay una acumulación un poco mayor (figura 2.7). La biomasa, tanto viva como muerta, debajo de las ramas y alrededor del tallo es la que principalmente dañará al árbol. También se logró documentar que la bursera no tiende a asociarse con otras especies (Tabla 2.5). Por otro lado la cantidad de ramas y hojas bajo el dosel es relativamente baja (Tabla 2.4).

Algo importante a destacar es que si el fuego del combustible es lo sufi-

cientemente intenso y logra penetrar y desecar la corteza interna, la energía que la misma liberará es alta (Tabla 2.11) y el daño será irremediable. Mas aún las resinas de *Bursera* poseen un alto contenido de terpenos [Mooney y Emboden, 1968, Messina et al., 2015] que promueven por un lado la protección de la planta pero por otro la iniciación de incendios. Muchas veces este daño es local debido a la distribución no continua del combustible bajo el árbol, sin embargo si el combustible llegase a ser abundante alrededor del mismo, es probable que ocurra una muerte total del cambium vascular. El daño puntual provoca cicatrices profundas las cuales, en ocasiones, derivan en daños posteriores como invasiones por descortezadores u otras plagas (Tabla 2.5).

El palo fierro a su vez es altamente vulnerable ante los incendios silvestres. En primera instancia el contenido de humedad en la corteza externa es 6 veces menos que áquel en *Bursera microphylla* (Tabla 2.2). El de la corteza interna, que es el máximo a lo largo del radio del tronco [Jones et al., 2004], es tres veces menos que el contenido en la otra especie. Igualmente la densidad total de la corteza es mas del doble que la *Bursera* lo cual implica una cantidad sólida mucho mayor, lo cual es razonable por su alto contenido de paredes celulares lignificadas (Tabla 2.6, fig2.13).

La densidad total de la corteza es mas del doble que *B. microphylla* lo cual implica una cantidad sólida mucho mayor. Esto es razonable por su alto contenido de paredes celulares lignificadas (Tabla 2.6, fig 2.13). También el contenido mineral no es tan diferente que en la otra especie, por lo que sí se podría hablar de una defensa por ese lado. Adicionalmente la energía de activación promedio para ambas secciones se considera alta, adoptando valores  $\approx 231 \text{ kJ mol}^{-1}$  para corteza externa y  $\approx 228 \text{ kJ mol}^{-1}$  para corteza interna (Figura 2.18), lo cual implicaría una protección adicional. No obstante, tenemos dos factores en contra, el primero es que hay una barrera mínima a vencer en cuanto a la humedad (calor latente de vaporización), por tanto la energía liberada por el combustible se empleará casi enteramente en iniciar la reacción. En segundo lugar tenemos que debido a la gran cantidad de ritidoma (básicamente toda la corteza externa) que genera esta especie, tenemos tanto material de fácil ignición y de tamaño fino. Esto actúa como una capa de combustible sobre el árbol que, empeorando la situación, tiene un alto contenido energético (Tabla 2.11). Esto coincide con el conocimiento popular que el palo fierro es un

árbol que produce una "llama caliente" [Felger et al., 2001].

Por si fuera poco, aunado a sus desventajas físicas directas, su relación con el entorno lo sigue colocando en una situación desfavorable. Debido a la sombra que produce, el palo fierro ha servido como planta nodriza a muchas otras especies [Suzán et al., 1996]. Esto es claro de la Tabla 2.5, en donde los individuos muestreados están asociados con mas especies que en el caso de *B. microphylla*. Es posible que además de la sombra que produce, la gran cantidad de biomasa que genera, favorece el crecimiento de otras especies vegetales. De hecho se observó que los agregados del suelo bajo los árboles, eran altamente estructurados, señal de un alto contenido en materia orgánica. La cantidad de hojarazca debajo de *O. tesota* fue 7 veces mayor que para *B. microphylla* y la cantidad de ramas 4 veces mayor. Es así que con poco contenido de humedad, acumulación de materia combustible tanto viva como muerta y alto contenido energético en los materiales que componen la corteza, *Olneya tesota* figura como un candidato poco adaptable a incendios regulares.

En ambos casos es claro que la mayor cantidad de buffel se encuentra circundante al árbol. Dado su caracter altamente flamable y a su continuidad espacial, este funciona como una fuente de flama para el combustible debajo de ambos árboles. Por tanto dependiendo de la cantidad de combustible disponible el daño será irreparable en algunas condiciones, particularmente para *Olneya tesota*. A pesar de que es bien sabido que el zacate buffel altera los regímenes de fuego [Miller et al., 2010, D'Antonio y Vitousek, 1992], no se había cuantificado hasta ahora la energía que el mismo libera y pocos estudios previos han revisado los efectos en especies nativas [Marshall et al., 2012, Fuentes-Ramirez et al., 2016]. Se ha discutido que en realidad este pasto no tiene un carácter invasor debido a que no se dispersa sin alteración humana [McIvor et al., 2003]. Pese a ello, las alteraciones humanas son cada vez mas comunes y los efectos perjudiciales en las dos especies estudiadas le confieren una capacidad de desplazar especies nativas.

### 3.2. Direcciones futuras

La investigación en fuego dentro del sistema Tierra no ha logrado los avances necesarios para la predicción de nuevos regímenes de fuego y mas cuando nuevos ecosistemas están emergiendo [Archibald et al., 2018]. La

modificación a los patrones de fuego por especies exóticas invasoras a cierto ecosistema es un problema a resolver para el modelado del fuego [Brooks et al., 2004, Pausas y Keeley, 2014]. Las características de las especies invasoras y nativas son indiscutiblemente un factor crucial en los nuevos regímenes alterados [D'Antonio y Vitousek, 1992, Fuentes-Ramirez et al., 2016] y desafortunadamente no han sido adecuadamente incorporadas a la investigación del sistema Tierra.

El último análisis sobre la investigación en estos temas [Archibald et al., 2018], sugiere que uno de los retos para estos estudios consiste en modelos que describan e incorporen las cantidades y propiedades de la vegetación como combustible. Nuestra capacidad para predecir fuegos es limitada y esto en parte se debe a la gran variabilidad del comportamiento del fuego en distintas comunidades vegetales.

Hasta ahora, para la predicción de respuestas ecosistémicas, los científicos de fuego han tomado dos enfoques: el descriptivo o el basado en procesos [Michaletz y Johnson, 2008, Michaletz y Johnson, 2007]. La primer aproximación relaciona estadísticamente entre intensidad y severidad de fuego y respuestas del ecosistema, esto usualmente se logra mediante estudios de impacto [Keeley, 2009]. La segunda, que fue el enfoque utilizado en este estudio, consiste en concentrarse en las variables de respuesta de los ecosistemas a partir de la intensidad o severidad de fuego.

No es una labor sencilla pero si se lograsen realizar mas estudios de este tipo, incluyendo a la vegetación nativa, a las especies invasoras y sus características de flamabilidad, podríamos tener un mayor entendimiento de los patrones del fuego en diferentes ecosistemas, particularmente en los que no existía el fuego históricamente. Igualmente se podrían establecer estrategias de prevención de fuego, por ejemplo Fuentes y colaboradores proponen reducir la acumulación de combustible debajo de especies leñosas en sitios donde los pastos invasores no son fácilmente controlables [Fuentes-Ramirez et al., 2016].

Es un hecho que los fuegos globalmente cada vez son mas frecuentes e intensos. Si no comenzamos a ver y entender mas profundamente los efectos del fuego, seguiremos teniendo estrategias poco efectivas para su predicción, control y erradicación. Peor aún si no entendemos los meca-

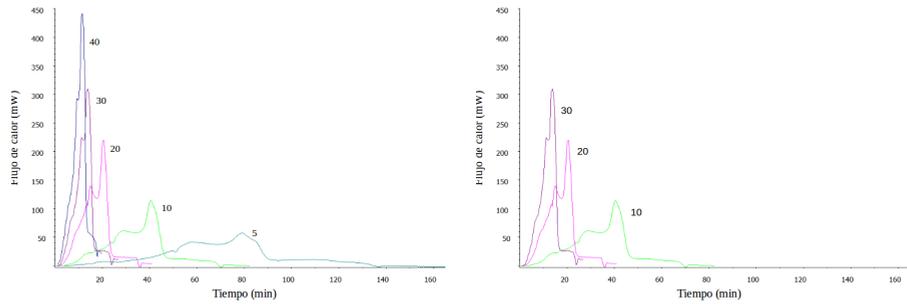
nismos de respuesta de las especies nativas no adaptadas a la quema, las tasas de desaparición de especies debido a este problema será cada vez mas alarmante, particularmente en ecosistemas tan delicados como son los desiertos.

# Apéndice A

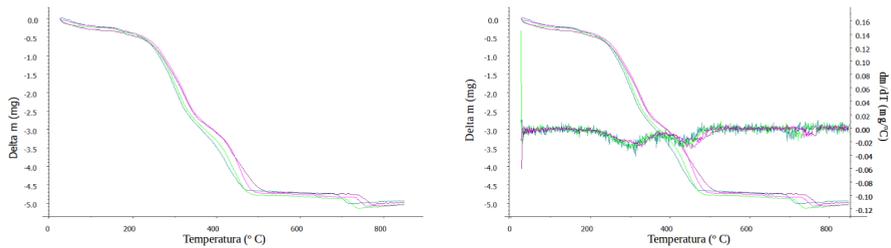
## Manipulación de señales de STA

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a las señales de DSC y TGA medidas directamente con el analizador térmico simultáneo. La integración numérica se llevó a cabo en las señales calorimétricas para las 5 rampas de calentamiento: 5,10,20,30 y 40 C *circ*/min (indicadas en el gráfico sobre la curva respectiva, figuras: A.1(a), A.1(b), A.3(a), A.3(b), A.4(a), A.4(b), A.5(a), A.5(b)). Se tomó la señal de todas las curvas y se integró, posteriormente se eliminaron aquellas curvas que tuvieron la señal mas alta y mas baja con el fin de disminuir la varianza en las señales (figuras: A.1(b), A.3(b), A.4(b), A.5(b)). A partir de estos datos se calculó el error reportado para la entalpía de combustión 2.11. Es importante notar que el tiempo en las diversas gráficas está en minutos por lo que se hizo la conversión a segundos para que las unidades fueran consistentes con la señal en mW y así obtener la energía de activación en Joules. Como se mencionó previamente, para todas las curvas se realizó una corrección para la curva cero y posteriormente se hizo la integración. Lo anterior se realizó en el programa Origin.

Las señales del TGA se reportan en las figuras: A.1(c), A.2(c), A.3(c), A.4(c), A.5(c). Estas curvas se derivaron para tener explícitamente los cambios en la pendiente de las señales termogravimétricas (figuras: A.1(d), A.2(d), A.3(d), A.4(d), A.5(d)). Estas señales se procesaron directamente en el programa del STA, Linseis Platinum Evaluation. Las dos inflexiones en la curva derivada corresponden a las dos grandes pérdidas de masa relacionadas, en la sección de resultados del análisis térmico, con las energías de activación para distintos niveles de conversión.

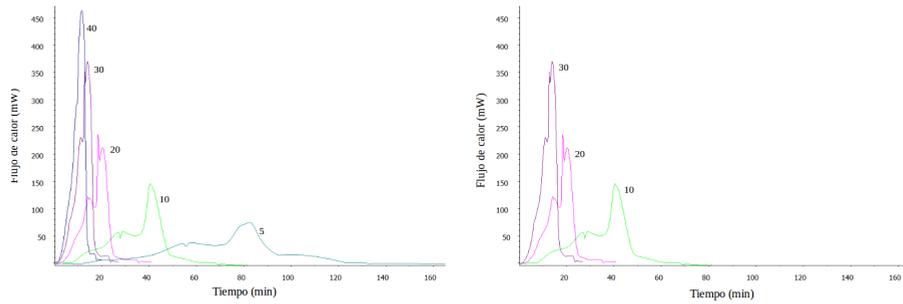


(a) Señal de flujo energético respecto al tiempo (b) Señal de flujo energético respecto al tiempo excluyendo los valores extremos

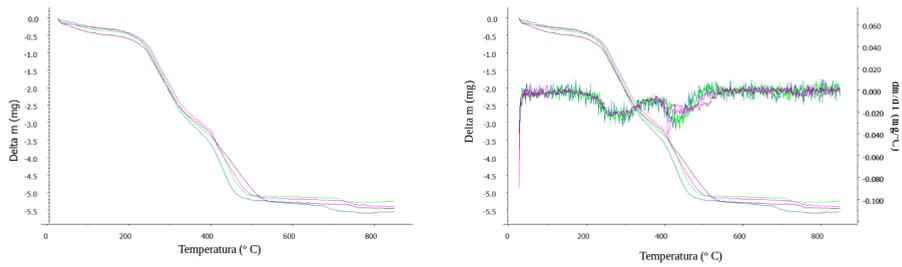


(c) Señal termogravimétrica respecto a la temperatura (d) Señal termogravimétrica y su derivada

Figura A.1: Corteza externa de *B. microphylla*

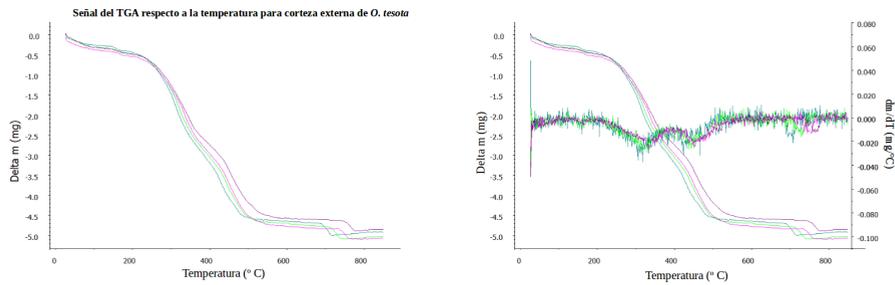
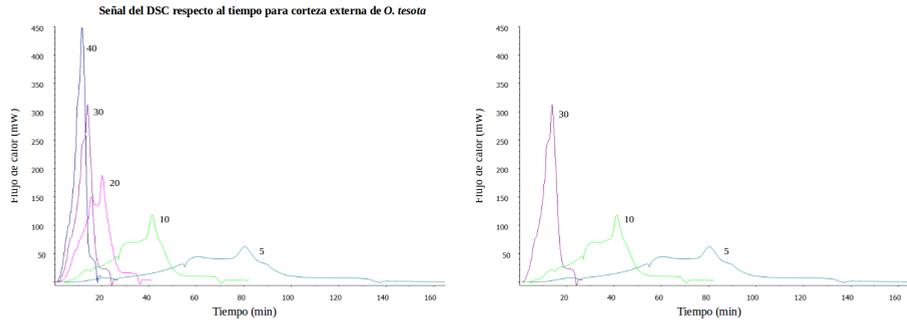


(a) Señal de flujo energético respecto al tiempo  
 (b) Señal de flujo energético respecto al tiempo excluyendo los valores extremos



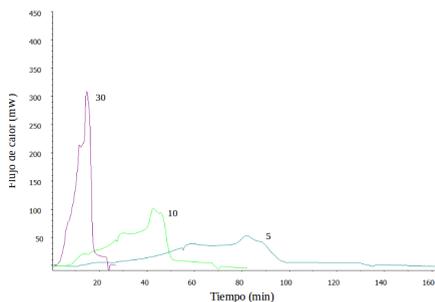
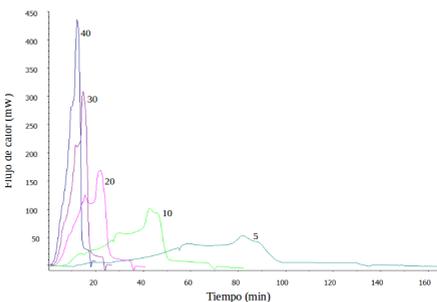
(c) Señal termogravimétrica respecto a la temperatura  
 (d) Señal termogravimétrica y su derivada respecto a la temperatura

Figura A.2: Corteza interna de *B. microphylla*

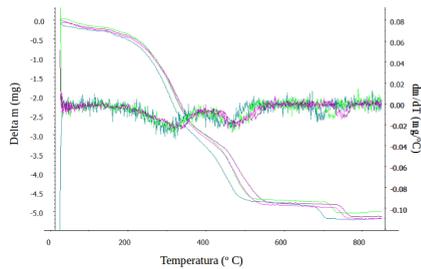
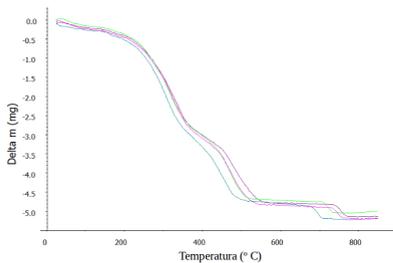


(c) Señal termogravimétrica respecto a la (d) Señal termogravimétrica y su derivada temperatura

Figura A.3: Corteza externa de *O. tesota*

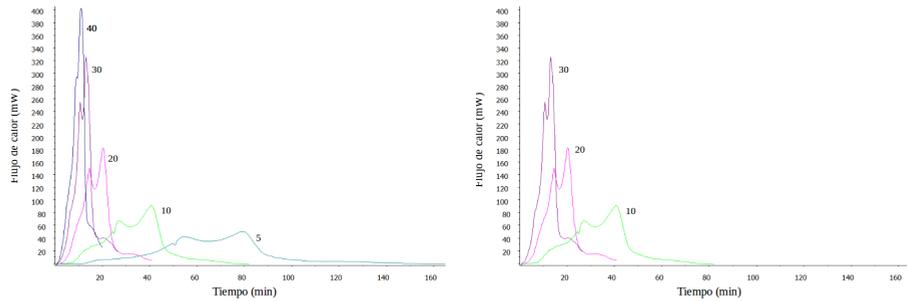


(a) Señal de flujo energético respecto al tiempo (b) Señal de flujo energético respecto al tiempo excluyendo los valores extremos

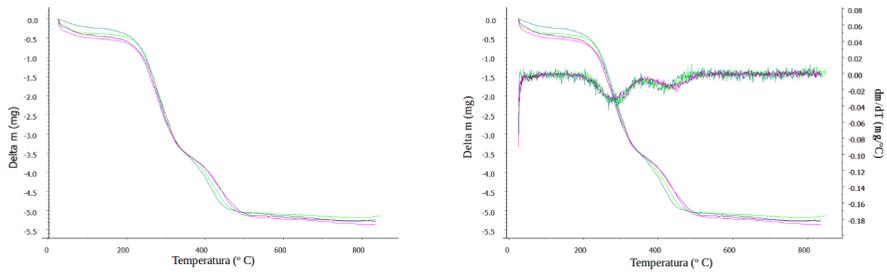


(c) Señal termogravimétrica respecto a la temperatura (d) Señal termogravimétrica y su derivada

Figura A.4: Corteza interna de *O. tesota*



(a) Señal de flujo energético respecto al tiempo (b) Señal de flujo energético respecto al tiempo excluyendo los valores extremos



(c) Señal termogravimétrica respecto a la temperatura (d) Señal termogravimétrica y su derivada temperatura

Figura A.5: *P. ciliare*

# Apéndice B

## Difracción de Rayos X

Los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D. Las muestras se midieron utilizando un portamuestras de aluminio de doble carga. La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $80^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  ( $2\theta$ ) y un tiempo de integración de 40s por paso. Las muestras procesadas fueron las cenizas provenientes del análisis de contenido mineral (Tabla 2.3).

Tabla B.1: Fases predominantes de los difractogramas realizados a cada sección de muestra.

Sección	Fase
<i>B. microphylla</i> madera	Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$
<i>B. microphylla</i> corteza interna	Óxido de Calcio: CaO; Silvita: KCl; Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$ ; Nacholita: $NaHCO_3$
<i>B. microphylla</i> corteza externa	Óxido de Calcio: CaO; Portlandita $Ca(OH)_2$ ; Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$
<i>O. tesota</i> madera	Óxido de Calcio: CaO; Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$ ; Vivianita: $(Fe^{2+}Fe_2^{2+}(PO_4)_2 \cdot 8H_2O)$
<i>O. tesota</i> corteza interna	Óxido de Calcio: CaO; Portlandita $Ca(OH)_2$ ; Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$
<i>O. tesota</i> corteza externa	Cuarzo: $SiO_2$ ; Plagiocasa de composición intermedia: $(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$ Anfíbol de tipo actinolita; Folsilicatos probablemente de tipo mica-ilita
<i>P. ciliare</i>	Apatito: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$

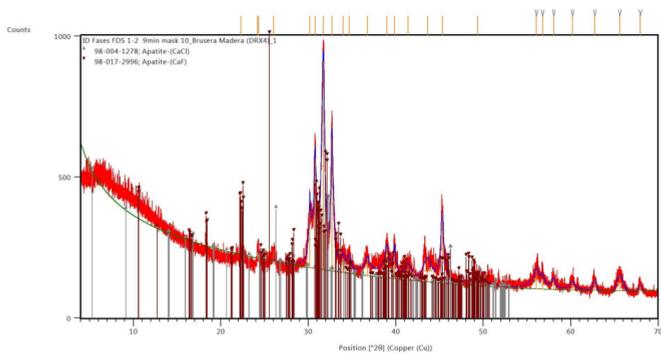


Figura B.1: Difractograma de DRX para la madera de *B. microphylla*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

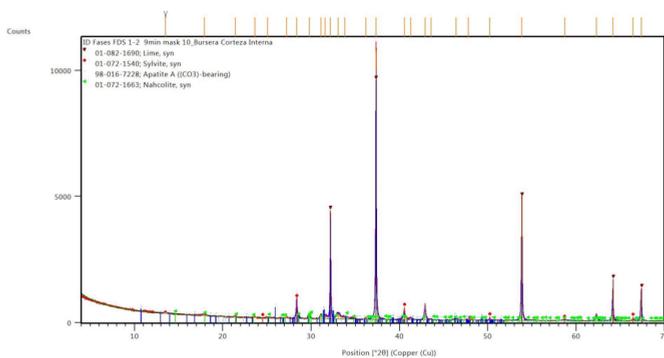


Figura B.2: Difractograma de DRX para la corteza interna de *B. microphylla*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

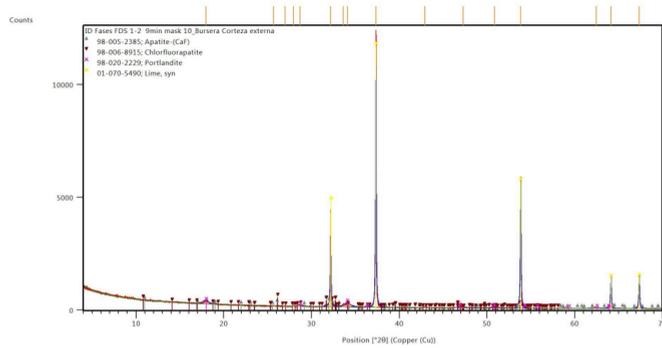


Figura B.3: Difractograma de DRX para la corteza externa de *B. microphylla*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

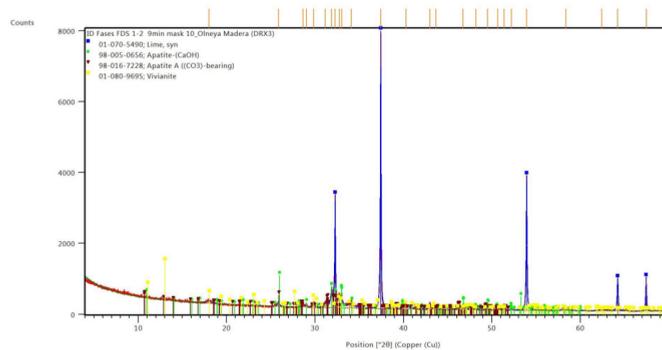


Figura B.4: Difractograma de DRX para la madera de *O. tesota*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

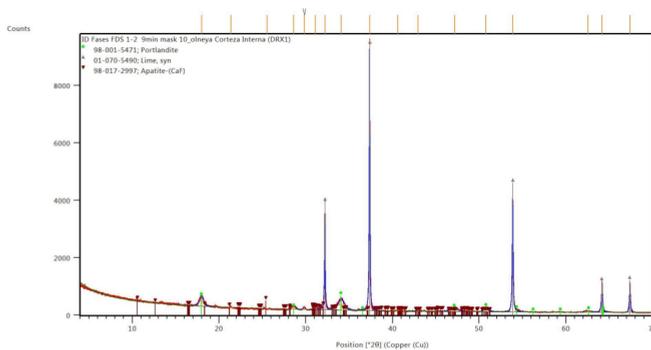


Figura B.5: Difractograma de DRX para la corteza interna de *O. tesota*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

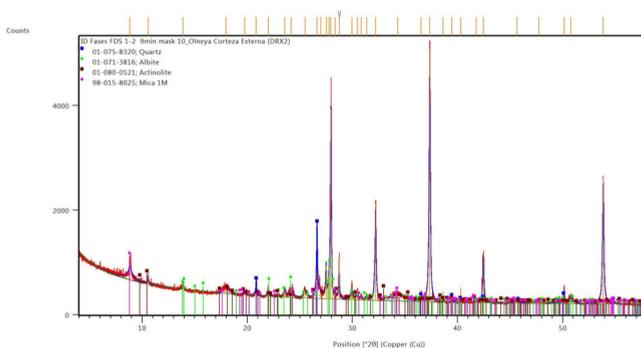


Figura B.6: Difractograma de DRX para la corteza externa de *O. tesota*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

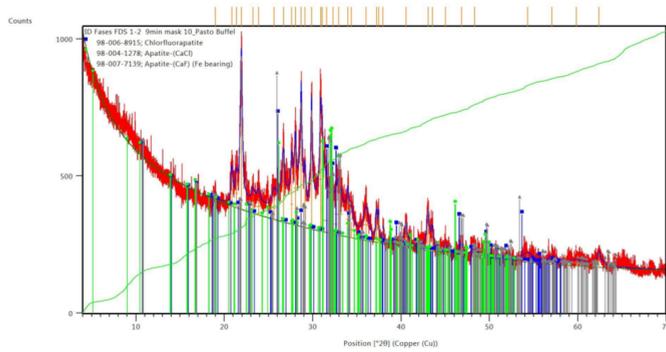


Figura B.7: Difractograma de DRX para el pasto *P. ciliare*. Las fases identificadas se detallan en la Tabla B.1.

# Glosario

**análisis térmico** : El análisis térmico es definido por la Confederación Internacional de Análisis Térmico y Calorimétrico (ICTAC) como el estudio de la relación entre una propiedad de la muestra y su temperatura conforme la muestra se calienta o enfría en condiciones controladas (Lever et al. 2014). Según la propiedad que se mida el análisis le corresponderá un nombre particular, por ejemplo, al medir el calor se tiene la calorimetría, midiendo la masa se tiene la termogravimetría, con el volumen la dilatometría, etc. . 38

**combustión latente** : Es una reacción exotérmica sin llama que se propaga en combustibles porosos.. 56

**contenido mineral** : El contenido mineral se define como el porcentaje de la masa total por unidad de volumen de partícula de fuego que está compuesta de material inorgánico o mineral, i.e no compuesto de moléculas de C,H u O. . 11

**degradación térmica** : De manera general, la degradación térmica es el proceso en el cual la acción del calentamiento o de una temperatura elevada, produce una pérdida en las propiedades físicas, mecánicas o eléctricas sobre el material. . 44

**descomposición térmica** : Proceso de cambios químicos que ocurren debido al calentamiento de una sustancia.. 37

**especies invasoras** : Especies exóticas (no nativas) que desarrollan un comportamiento invasivo, desplazando a especies nativas y causando graves daños a los ecosistemas.. 1

**fase sólida** : Estado en el que se encuentra un material, se caracteriza porque opone resistencia a cambios de forma y de volumen. Sus partículas se encuentran juntas y correctamente ordenadas.. 37

**hidrocarburos terpénicos** : Las denominaciones genéricas de “sustancias terpénicas”, “terpenos” o “terpenoides” son aplicados a una extensa gama de productos naturales formadas por ciertos hidrocarburos y sus derivados oxigenados entre los que destacan los alcoholes, aldehidos y cetonas, en menor manera los ácidos carboxílicos, los ésteres y los éteres.. 38

**procesos endotérmicos** : Se denomina reacción endotérmica a cualquier reacción química que absorbe energía, normalmente en forma de calor.. 37

**reacciones de competencia** : Es un tipo de reacción química en la cual dos o mas materiales iniciales compiten con otros materiales iniciales formando productos secundarios no deseados.. 47

**reacción compleja** : Reacción donde se producen múltiples números de pasos o de estados de transición para describir la reacción química. El mecanismo de estas reacciones corresponde a la velocidad de reacción encontrada. En este caso se presentan reacciones secundarias y no siempre los productos se forman en reacciones que directamente involucren a los reactantes.. 46

**reacción simple** : Reacción en donde sólo un paso (un estado de transición) es necesario. En este caso el orden de la reacción corresponde a la suma de coeficientes estequiométricos de la ecuación. En este tipo de reacciones no hay reacciones secundarias y los productos se forman directamente de los reactantes.. 46

**ritidoma** : Conjunto de tejidos muertos del tallo de las plantas leñosas que forma la parte exterior de la corteza que se resquebraja y se desprende.. 49

**régimen de difusión** : Un régimen de difusión es aquel dominado por reacciones de difusión. Éstas son reacciones que ocurren tan rápido que la velocidad de reacción es igual a la velocidad de transporte de los reactantes a través del medio.. 47

**régimenes de fuego** : Los patrones del fuego en un área particular. Se caracterizan por una combinación de características de fuego como la frecuencia, intensidad, tamaño, temporalidad, dispersión, tipo y extensión. Responden a cambios en el clima, vegetación, fauna y actividad humana.. 2, 11

**suberina** : La suberina es un polímero natural (biopolímero) producido por las paredes celulares de algunas células de las plantas. Actúa como barrera entre las plantas y el ambiente. Conforman hasta un 50 % de la composición química de las paredes de células suberizadas.. 35–37

**termólisis** : es la reacción en la que un compuesto se separa en al menos otros dos cuando se somete a un aumento de temperatura.. 47



## Bibliografía

- [Akahira y Sunose, 1971] Akahira, T. y Sunose, T. (1971). Method of determining activation deterioration constant of electrical insulating materials. *Res Rep Chiba Inst Technol (Sci Technol)*, 16:22–31.
- [Alcalá, 1995] Alcalá, G. (1995). Guía práctica para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel. *Patronato del Centro de Investigaciones Pecuarías del Estado de Sonora, AC*.
- [Anderson y McDonald, 2015] Anderson, S. A. y McDonald, A. G. (2015). Performance testing of wildland fire chemicals using a custom-built heat flux sensor. *Journal of Fire Sciences*, 33(6):473–492.
- [Archibald et al., 2018] Archibald, S., Lehmann, C., Belcher, C., Bond, W., Bradstock, R., Daniau, A., Dexter, K., Forrester, E., Greve, M., He, T., et al. (2018). Biological and geophysical feedbacks with fire in the earth system. *Environmental Research Letters*, 13(3):033003.
- [Armstrong et al., 1981] Armstrong, J., Shigo, A., Funk, D., McGinnes, E., y Smith, D. (1981). A macroscopic and microscopic study of compartmentalization and wound closure after mechanical wounding of black walnut trees. *Wood and Fiber Science*, 13(4):275–291.
- [Arnaldos Viger et al., 2004] Arnaldos Viger, J., Vidal, C., Ignasi, J., y Gimenez Pujol, A. (2004). *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*. Ediciones Mundi-Prensa.
- [Arriaga et al., 2004] Arriaga, L., Castellanos, A. E., Moreno, E., y Alarcón, J. (2004). Potential ecological distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of buffel grass in arid regions of Mexico. *Conservation biology*, 18(6):1504–1514.

- [Aschan y Pfanz, 2003] Aschan, G. y Pfanz, H. (2003). Non-foliar photosynthesis—a strategy of additional carbon acquisition. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 198(2):81–97.
- [Ávila-Lovera y Ezcurra, 2016] Ávila-Lovera, E. y Ezcurra, E. (2016). Stem-succulent trees from the old and new world tropics. In *Tropical Tree Physiology*, pages 45–65. Springer.
- [Barta-Rajnai et al., 2017] Barta-Rajnai, E., Várhegyi, G., Wang, L., Skreiberg, Ø., Grønli, M., y Czégény, Z. (2017). Thermal decomposition kinetics of wood and bark and their torrefied products. *Energy & Fuels*, 31(4):4024–4034.
- [Basu, 2010] Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- [Beall et al., 1970] Beall, F. C., Eickner, H. W., et al. (1970). Thermal degradation of wood components: a review of the literature. *Research Papers. United States Forest Products Laboratory*, (FPL 130).
- [Bellard et al., 2016] Bellard, C., Cassey, P., y Blackburn, T. M. (2016). Alien species as a driver of recent extinctions. *Biology Letters*, 12(2):20150623.
- [Bergman, 2011] Bergman, T. L. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
- [Bostock y Stermer, 1989] Bostock, R. y Stermer, B. (1989). Perspectives on wound healing in resistance to pathogens. *Annual review of phytopathology*, 27(1):343–371.
- [Bova y Dickinson, 2005] Bova, A. y Dickinson, M. (2005). Linking surface-fire behavior, stem heating, and tissue necrosis. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(4):814–822.
- [Bova y Dickinson, 2008] Bova, A. S. y Dickinson, M. B. (2008). Beyond “fire temperatures”: calibrating thermocouple probes and modeling their response to surface fires in hardwood fuels. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(5):1008–1020.
- [Brooks et al., 2004] Brooks, M. L., D’antonio, C. M., Richardson, D. M., Grace, J. B., Keeley, J. E., DiTomaso, J. M., Hobbs, R. J., Pellant, M.,

- y Pyke, D. (2004). Effects of invasive alien plants on fire regimes. *AIBS Bulletin*, 54(7):677–688.
- [Buisman, 1935] Buisman, C. (1935). The anatomy of wood of elms infected with graphium ulmi. *Plantenzickten*, 41:104–120.
- [Burquez-Montijo et al., 2002] Burquez-Montijo, A., Miller, M., Martinez-Yrizar, A., et al. (2002). Mexican grasslands, thornscrub, and the transformation of the sonoran desert by invasive exotic buffelgrass (*pennisetum ciliare*). *Invasive exotic species in the Sonoran region. The University of Arizona Press and the Arizona-Sonora Desert Museum, Tucson*, pages 126–146.
- [Butler y Fairfax, 2003] Butler, B. D. W. y Fairfax, R. J. (2003). Buffel grass and fire in a gidgee and brigalow woodland: a case study from central queensland. *Ecological Management & Restoration*, 4(2):120–125.
- [Byram, 1959] Byram, G. (1959). Combustion of forest fuels. in ‘forest fire: control and use’.(ed. kp davis) pp. 61–89.
- [Carrier et al., 2016] Carrier, M., Auret, L., Bridgwater, A., y Knoetze, J. H. (2016). Using apparent activation energy as a reactivity criterion for biomass pyrolysis. *Energy & Fuels*, 30(10):7834–7841.
- [Carrier et al., 2011] Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J.-M., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., y Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35(1):298–307.
- [Cengel y Boles, 2002] Cengel, Y. A. y Boles, M. A. (2002). Thermodynamics: an engineering approach. *Sea*, 1000:8862.
- [centre for arid zone research, 2001] centre for arid zone research (2001). Buffel grass distribution. *Sustainable Ecosystems. CSIRO, Australia*.
- [Chambers y Hawkins, 2002] Chambers, N. y Hawkins, T. O. (2002). Invasive plants of the sonoran desert, a field guide. sonoran institute. *Environmental Education Exchange, National Fish and Wildlife Foundation, with funding from many other organizations. Tucson, Arizona*.

- [Chatziefstratiou, 2015] Chatziefstratiou, E. (2015). *Simulation of tree stem injury, air flow and heat dispersion in forests for prediction of fire effects*. PhD thesis, The Ohio State University.
- [Costa et al., 1991] Costa, J., Oliveira, L., Viegas, D., y Neto, L. (1991). On the temperature distribution inside a tree under fire conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 1(2):87–96.
- [Crutzen, 2006] Crutzen, P. J. (2006). The “anthropocene”. In *Earth system science in the anthropocene*, pages 13–18. Springer.
- [Crutzen y Stoermer, 2000] Crutzen, P. J. y Stoermer, E. (2000). The “anthropocene”. In *Global Change Newsletter*, 41, page 17. IGBP.
- [D’Antonio y Vitousek, 1992] D’Antonio, C. M. y Vitousek, P. M. (1992). Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annual review of ecology and systematics*, 23(1):63–87.
- [De la Barrera, 2008] De la Barrera, E. (2008). Recent invasion of buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) of a natural protected area from the southern sonoran desert. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79(2):385–392.
- [Demirbaş y Demirbaş, 2004] Demirbaş, A. y Demirbaş, A. H. (2004). Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy exploration & exploitation*, 22(2):135–143.
- [Dickinson, 2002] Dickinson, M. (2002). Heat transfer and vascular cambium necrosis in the boles of trees during surface fires. *Forest fire research and wildland fire safety*. (Ed. X Viegas) pp, pages 1–10.
- [Dickinson y Johnson, 2001] Dickinson, M. y Johnson, E. (2001). Fire effects on trees. *Forest fires: behavior and ecological effects*. Edited by EA Johnson and K. Miyanishi. Academic Press, New York, pages 477–525.
- [Dickinson et al., 2005] Dickinson, M., Jolliff, J., y Bova, A. (2005). Vascular cambium necrosis in forest fires: using hyperbolic temperature regimes to estimate parameters of a tissue-response model. *Australian Journal of Botany*, 52(6):757–763.
- [Dickinson y Johnson, 2004] Dickinson, M. B. y Johnson, E. A. (2004). Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3):546–559.

- [Ducrey et al., 1996] Ducrey, M., Duhoux, F., Huc, R., y Rigolot, E. (1996). The ecophysiological and growth responses of aleppo pine (*pinus halepensis*) to controlled heating applied to the base of the trunk. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(8):1366–1374.
- [Durand, 1996] Durand, L. (1996). El palo fierro, especie clave del desierto de sonora. *Ciencias*, (043).
- [Dzurenda y Pnakovic, 2014] Dzurenda, L. y Pnakovic, L. (2014). Quantification of the ash content from biofuel-wood according to iso 1171 (2003) and en 14775 (2010). *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, 86.
- [Ehleringer et al., 1987] Ehleringer, J., Comstock, J., y Cooper, T. (1987). Leaf-twig carbon isotope ratio differences in photosynthetic-twig desert shrubs. *Oecologia*, 71(2):318–320.
- [Elder et al., 2011] Elder, T., Kush, J. S., y Hermann, S. M. (2011). Thermogravimetric analysis of forest understory grasses. *Thermochimica acta*, 512(1):170–177.
- [Evert, 2006] Evert, R. F. (2006). *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. John Wiley & Sons.
- [Fahnestock y Hare, 1964] Fahnestock, G. R. y Hare, R. C. (1964). Heating of tree trunks in surface fires. *Journal of Forestry*, 62(11):799–805.
- [Felger et al., 2001] Felger, R. S., Johnson, M. B., y Wilson, M. F. (2001). The trees of sonora.
- [Felger y Moser, 1985] Felger, R. S. y Moser, M. B. (1985). *People of the desert and sea: ethnobotany of the Seri Indians*. University of Arizona Press.
- [Fengel y Wegener, 1984] Fengel, D. y Wegener, G. (1984). Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. *Walter de Gruyter*, 613:1960–82.
- [Ferrenberg y Mitton, 2014] Ferrenberg, S. y Mitton, J. B. (2014). Smooth bark surfaces can defend trees against insect attack: resurrecting a 'slippery' hypothesis. *Functional Ecology*, 28(4):837–845.

- [Flavelle, 2003] Flavelle, M. (2003). *Kimberley grasslands field curing guide*. Kimberley Regional Fire Management Project.
- [Flint, 1925] Flint, H. R. (1925). Fire resistance of northern rocky mountain conifers. *Idaho Forester*, 7(7):7–10.
- [Fons, 1946] Fons, W. L. (1946). Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*, 72(3):93–121.
- [Foreman et al., 1993] Foreman, J., Lundgren, C., y Gill, P. (1993). Measurement of the physical properties of engineering thermoplastics using thermal analysis. In *TECHNICAL PAPERS OF THE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE-SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS INCORPORATED*, pages 3025–3025. SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS INC.
- [Franklin et al., 2006] Franklin, K. A., Lyons, K., Nagler, P. L., Lampkin, D., Glenn, E. P., Molina-Freaner, F., Markow, T., y Huete, A. R. (2006). Buffelgrass (pennisetum ciliare) land conversion and productivity in the plains of sonora, mexico. *Biological Conservation*, 127(1):62–71.
- [Frankman et al., 2013] Frankman, D., Webb, B. W., Butler, B. W., Jimenez, D., Forthofer, J. M., Sopko, P., Shannon, K. S., Hiers, J. K., y Ottmar, R. D. (2013). Measurements of convective and radiative heating in wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 22(2):157–167.
- [Friedel et al., 2006] Friedel, M., Puckey, H., O'malley, C., Waycott, M., Smyth, A., y Miller, G. (2006). Buffel grass: both friend and foe. an evaluation of the advantages and disadvantages of buffel grass use and recommendations for future research. *Desert Knowledge Cooperative Research Centre: Alice Springs*.
- [Friedl et al., 2005] Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., y Varmuza, K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, 544(1-2):191–198.
- [Fuentes-Ramirez et al., 2016] Fuentes-Ramirez, A., Veldman, J. W., Holzapfel, C., y Moloney, K. A. (2016). Spreaders, igniters, and burning shrubs: plant flammability explains novel fire dynamics in grass-invaded deserts. *Ecological applications*, 26(7):2311–2322.

- [Giménez et al., 2004] Giménez, A., Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., y Arnaldos, J. (2004). Long-term forest fire retardants: a review of quality, effectiveness, application and environmental considerations. *International Journal of Wildland Fire*, 13(1):1–15.
- [Glass y Zelinka, 2010] Glass, S. V. y Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood.
- [Guevara et al., 2009] Guevara, J., Grünwaldt, E., Estevez, O., Bisigato, A., Blanco, L., Biurrun, F., Ferrando, C., Chirino, C., Morici, E., Fernández, B., et al. (2009). Range and livestock production in the monte desert, argentina. *Journal of Arid Environments*, 73(2):228–237.
- [Gutsell y Johnson, 1996] Gutsell, S. y Johnson, E. (1996). How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(2):166–174.
- [Halvorson, 2003] Halvorson, W. (2003). Buffelgrass – south texas wonder grass. In *U.S. Geological Survey, S.B.S.C. (Eds.), USGS Weeds in the West Project: Status of Introduced Plants in Southern Arizona Parks. Fact-sheet for: Pennisetum ciliare (LHanselka)*. *Rangelands* 10(6):279–281.
- [Handbook, 2010] Handbook, W. (2010). Wood handbook-wood as an engineering material. *General Technical Report FPL-GTR-190, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: USA*.
- [Hanselka, 1988] Hanselka, C. W. (1988). Buffelgrass: south texas wonder grass. *Rangelands*, pages 279–281.
- [Harder et al., 1980] Harder, M., Einspahr, D., et al. (1980). Levels of some essential metals in bark. *Tappi*, 63(12):111–112.
- [Harris et al., 2016] Harris, R., Remenyi, T. A., Williamson, G. J., Bindoff, N. L., y Bowman, D. M. (2016). Climate–vegetation–fire interactions and feedbacks: trivial detail or major barrier to projecting the future of the earth system? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(6):910–931.
- [Humphrey, 1974] Humphrey, R. R. (1974). Fire in the deserts and desert grassland of north america. *Fire and Ecosystems. TT Kozlowski & CE Ahlgren, eds*.

- [Ince, 1979] Ince, P. J. (1979). How to estimate recoverable heat energy in wood or bark fuels. Technical report, FOREST PRODUCTS LAB MADISON WIS.
- [Jackson et al., 1999] Jackson, J. F., Adams, D. C., y Jackson, U. B. (1999). Allometry of constitutive defense: a model and a comparative test with tree bark and fire regime. *The American Naturalist*, 153(6):614–632.
- [Jin et al., 2013] Jin, W., Singh, K., y Zondlo, J. (2013). Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood-polymers using isoconversion method. *Agriculture*, 3(1):12–32.
- [Johnson y Miyanishi, 2001] Johnson, E. A. y Miyanishi, K. (2001). *Forest fires: behavior and ecological effects*.
- [Jones et al., 2004] Jones, J. L., Webb, B. W., Jimenez, D., Reardon, J., y Butler, B. (2004). Development of an advanced one-dimensional stem heating model for application in surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(1):20–30.
- [Keane, 2015] Keane, R. E. (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer.
- [Kearney y Peebles, 1960] Kearney, T. H. y Peebles, R. H. (1960). *Arizona flora*. Univ of California Press.
- [Keeley, 2009] Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1):116–126.
- [Kelsey et al., 1979] Kelsey, R. G., Shafizadeh, F., y Lowery, D. P. (1979). *Heat content of bark, twigs, and foliage of nine species of western conifers*, volume 261. Forest Service, US Dept. of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- [Kelsey y Westlind, 2017] Kelsey, R. G. y Westlind, D. J. (2017). Physiological stress and ethanol accumulation in tree stems and woody tissues at sublethal temperatures from fire. *BioScience*, 67(5):443–451.
- [Koch, 1968] Koch, P. (1968). Specific heat of oven-dry spruce pine wood and bark. *Wood Science Vol. 1 (4): 203-214*.

- [Koleff et al., 2010] Koleff, P., González, A., y Born-Schmidt, G. (2010). Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. *México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México CONABIO*, page 94.
- [Kremens et al., 2010] Kremens, R. L., Smith, A. M., y Dickinson, M. B. (2010). Fire metrology: current and future directions in physics-based measurements.
- [Lawes et al., 2016] Lawes, M. J., Keith, D. A., y Bradstock, R. A. (2016). Advances in understanding the influence of fire on the ecology and evolution of plants: a tribute to peter j. clarke. *Plant ecology*, 6(217):597–605.
- [Leroy et al., 2009] Leroy, V., Cancellieri, D., y Leoni, E. (2009). Relation between forest fuels composition and energy emitted during their thermal degradation. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 96(1):293.
- [Leroy et al., 2010] Leroy, V., Cancellieri, D., Leoni, E., y Rossi, J.-L. (2010). Kinetic study of forest fuels by tga: model-free kinetic approach for the prediction of phenomena. *Thermochimica Acta*, 497(1-2):1–6.
- [Lever et al., 2014] Lever, T., Haines, P., Rouquerol, J., Charsley, E. L., Van Eckeren, P., y Burlett, D. J. (2014). Ictac nomenclature of thermal analysis (iupac recommendations 2014). *Pure and Applied Chemistry*, 86(4):545–553.
- [Liodakis et al., 2002] Liodakis, S., Bakirtzis, D., y Dimitrakopoulos, A. (2002). Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 390(1-2):83–91.
- [Lázaro, 2015] Lázaro, D. (2015). Estado del arte del análisis térmico de la fase sólida.
- [Marshall et al., 2012] Marshall, V., Lewis, M., y Ostendorf, B. (2012). Buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) as an invader and threat to biodiversity in arid environments: a review. *Journal of Arid Environments*, 78:1–12.
- [Martin, 1963a] Martin, R. E. (1963a). A basic approach to fire injury of tree stems.

- [Martin, 1963b] Martin, R. E. (1963b). Thermal properties of bark. *Forest Products Journal*, 13(10):419–426.
- [Mayoral, 1994] Mayoral, P. (1994). Reproducción de palo fierro (olneya tesota) en viveros forestales. *Memorias de la reunión sobre la utilización, ecología, aprovechamiento y conservación del palo fierro, Universidad de Sonora-Cictus y Conservación Internacional-México, AC*.
- [McArthur, 1966] McArthur, A. G. (1966). *Weather and grassland fire behaviour*. Forestry and Timber Bureau, Department of national Development, Commonwealth of Australia.
- [McDonald y McPherson, 2011] McDonald, C. y McPherson, G. (2011). Fire behavior characteristics of buffelgrass-fueled fires and native plant community composition in invaded patches. *Journal of Arid Environments*, 75(11):1147–1154.
- [McDonald y McPherson, 2013] McDonald, C. y McPherson, G. (2013). Creating hotter fires in the sonoran desert: buffelgrass produces copious fuels and high fire temperatures. *Fire Ecology*, 9(2):26–39.
- [McIvor et al., 2003] McIvor, J. G. et al. (2003). Competition affects survival and growth of buffel grass seedlings—is buffel grass a coloniser or an invader? *Tropical Grasslands*, 37(3):176–181.
- [McKenna et al., 2017] McKenna, P., Glenn, V., Erskine, P. D., Doley, D., y Sturgess, A. (2017). Fire behaviour on engineered landforms stabilised with high biomass buffel grass. *Ecological Engineering*, 101:237–246.
- [McLaughlin y Bowers, 1982] McLaughlin, S. P. y Bowers, J. E. (1982). Effects of wildfire on a sonoran desert plant community. *Ecology*, pages 246–248.
- [Messina et al., 2015] Messina, F., Curini, M., Di Sano, C., Zadra, C., Gliarelli, G., Rascon-Valenzuela, L. A., Robles Zepeda, R. E., y Marcotullio, M. C. (2015). Diterpenoids and triterpenoids from the resin of *bursera microphylla* and their cytotoxic activity. *Journal of natural products*, 78(5):1184–1188.
- [Michaletz y Johnson, 2008] Michaletz, S. y Johnson, E. (2008). A biophysical process model of tree mortality in surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(7):2013–2029.

- [Michaletz et al., 2012] Michaletz, S. T., Johnson, E., y Tyree, M. (2012). Moving beyond the cambium necrosis hypothesis of post-fire tree mortality: cavitation and deformation of xylem in forest fires. *New Phytologist*, 194(1):254–263.
- [Michaletz y Johnson, 2007] Michaletz, S. T. y Johnson, E. A. (2007). How forest fires kill trees: a review of the fundamental biophysical processes. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22(6):500–515.
- [Miller et al., 2010] Miller, G., Friedel, M., Adam, P., y Chewings, V. (2010). Ecological impacts of buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) invasion in central Australia—does field evidence support a fire-invasion feedback? *The Rangeland Journal*, 32(4):353–365.
- [Molina-Freaner y Tinoco-Ojanguren, 1997] Molina-Freaner, F. y Tinoco-Ojanguren, C. (1997). Vines of a desert plant community in central Sonora, Mexico. *Biotropica*, 29(1):46–56.
- [Mooney y Emboden, 1968] Mooney, H. y Emboden, W. (1968). The relationship of terpene composition, morphology, and distribution of populations of *Bursera microphylla* (Burseraceae). *Brittonia*, 20(1):44–51.
- [Moore, 1978] Moore, K. E. (1978). Barrier-zone formation in wounded stems of sweetgum. *Canadian Journal of Forest Research*, 8(4):389–397.
- [Morales-Romero y Molina-Freaner, 2016] Morales-Romero, D. y Molina-Freaner, F. (2016). Conversion of thornscrub to buffelgrass pasture in northwestern Mexico: Microclimatic consequences. *Journal of Arid Environments*, 125:110–115.
- [Morvan y Dupuy, 2001] Morvan, D. y Dupuy, J. (2001). Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 127(1):1981–1994.
- [Mulhern et al., 1979] Mulhern, J., Shortle, W., y Shigo, A. (1979). Barrier zones in red maple: an optical and scanning microscope examination. *Forest Science*, 25(2):311–316.
- [Nabhan y Carr, 1994] Nabhan, G. P. y Carr, J. L. (1994). *Ironwood: an ecological and cultural keystone of the Sonoran Desert*. Conservation International, Department of Conservation Biology.

- [Nicholson y Hammerschmidt, 1992] Nicholson, R. L. y Hammerschmidt, R. (1992). Phenolic compounds and their role in disease resistance. *Annual review of phytopathology*, 30(1):369–389.
- [Nilsen et al., 1984] Nilsen, E. T., Sharifi, M. R., y Rundel, P. W. (1984). Comparative water relations of phreatophytes in the sonoran desert of california. *Ecology*, 65(3):767–778.
- [Noge y Becerra, 2009] Noge, K. y Becerra, J. X. (2009). Germacrene d, a common sesquiterpene in the genus *Bursera* (burseraceae). *Molecules*, 14(12):5289–5297.
- [Orfao et al., 1999] Orfao, J., Antunes, F., y Figueiredo, J. L. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model. *Fuel*, 78(3):349–358.
- [Pastorova et al., 1994] Pastorova, I., Botto, R. E., Arisz, P. W., y Boon, J. J. (1994). Cellulose char structure: a combined analytical py-gc-ms, ftir, and nmr study. *Carbohydrate Research*, 262(1):27–47.
- [Pausas, 2015] Pausas, J. G. (2015). Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29(3):315–327.
- [Pausas y Keeley, 2014] Pausas, J. G. y Keeley, J. E. (2014). Evolutionary ecology of resprouting and seeding in fire-prone ecosystems. *New Phytologist*, 204(1):55–65.
- [Pearce y Rutherford, 1981] Pearce, R. y Rutherford, J. (1981). A wound-associated suberized barrier to the spread of decay in the sapwood of oak (*Quercus robur* L.). *Physiological Plant Pathology*, 19(3):359–IN31.
- [Pellegrini et al., 2017] Pellegrini, A. F., Anderegg, W. R., Paine, C., Hoffmann, W. A., Kartzinel, T., Rabin, S. S., Sheil, D., Franco, A. C., y Pacala, S. W. (2017). Convergence of bark investment according to fire and climate structures ecosystem vulnerability to future change. *Ecology letters*, 20(3):307–316.
- [Perez-Harguindeguy et al., 2013] Perez-Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., et al. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of botany*, 61(3):167–234.

- [Peterson y Ryan, 1986] Peterson, D. L. y Ryan, K. C. (1986). Modeling postfire conifer mortality for long-range planning. *Environmental Management*, 10(6):797–808.
- [Pettersen, 1984] Pettersen, R. C. (1984). The chemical composition of wood. *The chemistry of solid wood*, 207:57–126.
- [Phillips, 1962] Phillips, W. S. (1962). Fire and vegetation of arid lands. In *Tall Timbers fire ecology conference*, volume 1, pages 81–93.
- [Philpot, 1970] Philpot, C. (1970). Influence of mineral content on the pyrolysis of plant materials. *Forest Science*, 16(4):461–471.
- [Pinard y Huffman, 1997] Pinard, M. A. y Huffman, J. (1997). Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern bolivia. *Journal of Tropical Ecology*, 13(5):727–740.
- [Poletto et al., 2014] Poletto, M., Ornaghi, H. L., y Zattera, A. J. (2014). Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. *Materials*, 7(9):6105–6119.
- [Poorter et al., 2014] Poorter, L., McNeil, A., Hurtado, V.-H., Prins, H. H., y Putz, F. E. (2014). Bark traits and life-history strategies of tropical dry-and moist forest trees. *Functional Ecology*, 28(1):232–242.
- [Porrero Rodriguez y EIMFOR, 2001] Porrero Rodriguez, M. A. y EIMFOR, S. (2001). Incendios forestales. investigación de causas. *Mundi-Prensa, Madrid, España*.
- [Radmanovic et al., 2014] Radmanovic, K., DJukic, I., y Pervan, S. (2014). Specific heat capacity of wood. *Drvna industrija*, 65(2):151–157.
- [Ragland et al., 1991] Ragland, K., Aerts, D., y Baker, A. (1991). Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource technology*, 37(2):161–168.
- [Reeb et al., 1995] Reeb, J. E. et al. (1995). Wood and moisture relationships.
- [Rego y Rigolot, 1990] Rego, F. y Rigolot, E. (1990). Heat transfer through bark—a simple predictive model. In *Third International Symposium on Fire Ecology: Fire in Ecosystem Dynamics*, pages 257–161.

- [Reid et al., 2016] Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., y Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental health perspectives*, 124(9):1334.
- [Rosell, 2016] Rosell, J. A. (2016). Bark thickness across the angiosperms: more than just fire. *New Phytologist*, 211(1):90–102.
- [Rosell et al., 2015] Rosell, J. A., Castorena, M., Laws, C. A., y Westoby, M. (2015). Bark ecology of twigs vs. main stems: functional traits across eighty-five species of angiosperms. *Oecologia*, 178(4):1033–1043.
- [Rosell et al., 2014] Rosell, J. A., Gleason, S., Méndez-Alonzo, R., Chang, Y., y Westoby, M. (2014). Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist*, 201(2):486–497.
- [Rosell y Olson, 2014] Rosell, J. A. y Olson, M. E. (2014). The evolution of bark mechanics and storage across habitats in a clade of tropical trees. *American Journal of Botany*, 101(5):764–777.
- [Rothermel, 1983] Rothermel, R. C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires.
- [Rothermel et al., 1972] Rothermel, R. C. et al. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.
- [Ryan y Reinhardt, 1988] Ryan, K. C. y Reinhardt, E. D. (1988). Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Canadian journal of forest research*, 18(10):1291–1297.
- [Sackett et al., 1996] Sackett, S. S., Haase, S. M., y Harrington, M. G. (1996). Lessons learned from fire use for restoring southwestern ponderosa pine ecosystems. In *Conference on adaptive ecosystem restoration and management: Restoration of Cordilleran conifer landscapes of North America*, pages 54–61. US For. Serv. Gen. Tech. Rep. RM-GTR-278. US For. Serv., Rocky Mountain For. Range Exp. Stn., Fort Collins, CO.
- [SAGARHPA, 2009] SAGARHPA, G. d. E. d. S. (2009). Programa uso sustentable de los recursos naturales para la producción primaria. In *Informe de Evaluación Externa Estatal de Desempeno, Comité técnico estatal de evaluación*, pages 15–16. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA.

- [SAGARHPA, 2016] SAGARHPA, G. d. E. d. S. (2016). Programa sectorial de mediano plazo de agricultura, ganadería, recursos hidráulicos, pesca y acuicultura.
- [Saveland y Neuenschwander, 1990] Saveland, J. M. y Neuenschwander, L. F. (1990). A signal detection framework to evaluate models of tree mortality following fire damage. *Forest Science*, 36(1):66–76.
- [Schönherr, 1982] Schönherr, J. (1982). Resistance of plant surfaces to water loss: transport properties of cutin, suberin and associated lipids. In *Physiological plant ecology II*, pages 153–179. Springer.
- [Schuck, 1982] Schuck, H. (1982). The chemical composition of the monoterpene fraction in wounded wood of picea abies and its significance for the resistance against wound infecting fungi. *European Journal of Forest Pathology*, 12(3):175–181.
- [Şen et al., 2014] Şen, A., Van den Bulcke, J., Defoirdt, N., Van Acker, J., y Pereira, H. (2014). Thermal behaviour of cork and cork components. *Thermochimica Acta*, 582:94–100.
- [Sharma et al., 2004] Sharma, R. K., Wooten, J. B., Baliga, V. L., Lin, X., Chan, W. G., y Hajaligol, M. R. (2004). Characterization of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*, 83(11-12):1469–1482.
- [Shigo, 1984] Shigo, A. L. (1984). Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Annual review of phytopathology*, 22(1):189–214.
- [Shreve y Wiggins, 1964] Shreve, F. y Wiggins, I. L. (1964). *Vegetation and flora of the Sonoran Desert*, volume 591. Stanford University Press.
- [Siau, 1983] Siau, J. (1983). A proposed theory for nonisothermal unsteady-state transport of moisture in wood. *Wood Science and Technology*, 17(1):75–77.
- [Silvani y Morandini, 2009] Silvani, X. y Morandini, F. (2009). Fire spread experiments in the field: temperature and heat fluxes measurements. *Fire Safety Journal*, 44(2):279–285.
- [Simpson y TenWolde, 1999] Simpson, W. y TenWolde, A. (1999). Physical properties and moisture relations of wood. *Chapter*, 3:2–1.

- [Sluiter et al., 2004] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., y Templeton, D. (2004). Determination of ash in biomass: Lap-005 nrel analytical procedure. *National Renewable Energy Laboratory, Golden Google Scholar*.
- [Smith y Zeder, 2013] Smith, B. D. y Zeder, M. A. (2013). The onset of the anthropocene. *Anthropocene*, 4:8–13.
- [Smith y Shortle, 1990] Smith, K. y Shortle, W. (1990). Iaa oxidase, peroxidase, and barrier zone formation in red maple. *European Journal of Forest Pathology*, 20(4):241–246.
- [Starker, 1934] Starker, T. (1934). Fire resistance in the forest. *Journal of Forestry*, 32(4):462–467.
- [Steinhagen, 1977] Steinhagen, H. P. (1977). Thermal conductive properties of wood, green or dry, from - 40 to + 100 c : a literature review.
- [Suleiman et al., 1999] Suleiman, B., Larfeldt, J., Leckner, B., y Gustavsson, M. (1999). Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood science and technology*, 33(6):465–473.
- [Sullivan, 2009] Sullivan, A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4):369–386.
- [Sullivan y McDonald, 2014] Sullivan, E. A. y McDonald, A. G. (2014). Mathematical model and sensor development for measuring energy transfer from wildland fires. *International journal of wildland fire*, 23(7):995–1004.
- [Suzán et al., 1996] Suzán, H., Nabhan, G. P., y Patten, D. T. (1996). The importance of olneya tesota as a nurse plant in the sonoran desert. *Journal of Vegetation Science*, 7(5):635–644.
- [Szemmelveisz et al., 2009] Szemmelveisz, K., Szűcs, I., Palotas, A., Winkler, L., y Eddings, E. (2009). Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass. *Fuel Processing Technology*, 90(6):839–847.
- [Tippett y Shigo, 1981] Tippett, J. T. y Shigo, A. L. (1981). Barriers to decay in conifer roots. *European Journal of Forest Pathology*, 11(1-2):51–59.

- [Titus, 2004] Titus, J. (2004). Fire in the desert. In *Plant Press, Spring*, volume 28, No1, pages 9–10. Arizona Native Plant Society.
- [Turner et al., 2005] Turner, R. M., Bowers, J. E., y Burgess, T. L. (2005). *Sonoran Desert plants: an ecological atlas*. University of Arizona Press.
- [USDA, 2010] USDA (2010). Pennisetum ciliare (l.) link buffelgrass. In *Natural Resources Conservation Service*. United States Department of Agriculture.
- [Van Devender et al., 1997] Van Devender, T. R., Felger, R. S., y Búrquez, A. (1997). Exotic plants in the sonoran desert region, arizona and sonora. In *Proceedings of the California exotic pest plant council symposium*, volume 3, pages 1–6. California Exotic Pest Plant Council Berkeley, CA.
- [Van Wagner, 1970] Van Wagner, C. (1970). *On the value of temperature data in forest fire research*. Petawawa forest experiment station.
- [Van Wagner et al., 1972] Van Wagner, C. et al. (1972). *Heat of combustion, heat yield, and fire behaviour*. Petawawa Forest Experiment Station.
- [Vega et al., 2005] Vega, J., Perez-Gorostiaga, P., y Jimen, E. (2005). Efecto del daño producido por calor en tronco y copa en el crecimiento diamétrico de arbolado de pinus pinaster ait. In *Congresos Forestales*.
- [Vines, 1968] Vines, R. (1968). Heat transfer through bark, and the resistance of trees to fire. *Australian Journal of Botany*, 16(3):499–514.
- [Von Kármán, 1921] Von Kármán, T. (1921). Technical memorandum on laminar and turbulent friction. *National Advisory Committee for Aeronautics Report*, (1092).
- [Vyazovkin, 1993] Vyazovkin, S. (1993). An approach to the solution of the inverse kinetic problem in the case of complex processes: Part 4. chemical reaction complicated by diffusion. *Thermochimica acta*, 223:201–206.
- [Vyazovkin, 1996] Vyazovkin, S. (1996). A unified approach to kinetic processing of nonisothermal data. *International Journal of Chemical Kinetics*, 28(2):95–101.
- [Vyazovkin y Lesnikovich, 1990] Vyazovkin, S. y Lesnikovich, A. (1990). An approach to the solution of the inverse kinetic problem in the case of

- complex processes: Part 1. methods employing a series of thermoanalytical curves. *Thermochimica Acta*, 165(2):273–280.
- [Vyazovkin y Wight, 1997] Vyazovkin, S. y Wight, C. (1997). Kinetics in solids. *Annual review of physical chemistry*, 48(1):125–149.
- [Vyazovkin y Wight, 1999] Vyazovkin, S. y Wight, C. A. (1999). Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica acta*, 340:53–68.
- [Ward et al., 2006] Ward, J. P., Smith, S. E., y McClaran, M. P. (2006). Water requirements for emergence of buffelgrass (*pennisetum ciliare*). *Weed Science*, 54(4):720–725.
- [Wilcove et al., 1998] Wilcove, D. S., Rothstein, D., Dubow, J., Phillips, A., y Losos, E. (1998). Quantifying threats to imperiled species in the united states. *BioScience*, 48(8):607–615.
- [Winkworth, 1963] Winkworth, R. (1963). The germination of buffel grass (*cenchrus ciliaris*) seed after burial in a central australian soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 3(11):326–328.
- [Yetman y Búrquez, 1994] Yetman, D. y Búrquez, A. (1994). Buffelgrass–sonoran desert nightmare. *The Arizona Riparian Council Newsletter*, 7(3):1–10.