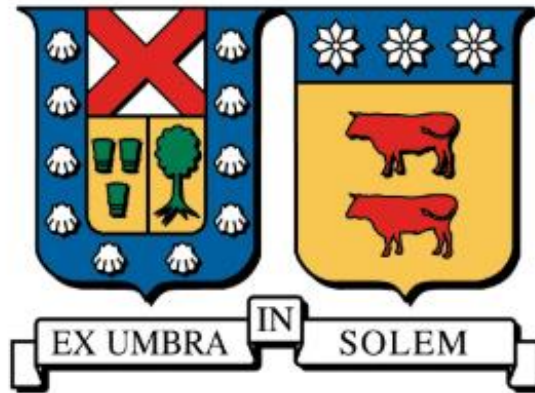




UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“FACTORES NATURALES QUE INFUYEN EN LA INFLAMABILIDAD DE
ESPECIES FORESTALES EXÓTICAS Y NATIVAS: CASO DE ESTUDIO,
RESERVA NACIONAL LAGO PEÑUELAS, VALPARAÍSO”**

CARLA DANIELA HERNÁNDEZ VALENCIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA: **DR. FABIÁN GUERRERO C.**
PROFESOR CORREFERENTE: **DR. LAUTARO TABORGA L.**
DR. HENRIK HANSEN

VALPARAÍSO, OCTUBRE DE 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

*A mi familia, amigos y a todos quienes con
sus conocimientos buscan hacer de este, un mundo mejor...*



1 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mis agradecimientos a mi profesor guía Dr. Fabián Guerrero y Lorena Espinoza, por la dedicación y apoyo que han brindado a este trabajo, por compartir sus conocimientos y consejos en lo académico y personal, y por el respeto y buena onda que ha surgido en este proceso. Gracias por la confianza ofrecida desde que inicié este trabajo.

Agradecer a mis papas y hermanas por brindarme su apoyo y amor incondicional en cada decisión que he tomado, por ser mis consejeros de vida y estar siempre presente.

A mis tíos Quimera y Carlos por su paciencia y prestarme su hogar en mis años académicos, sin ustedes hubiese sido más difícil.

A todos mis amigos por hacer de este mundo más feliz, por las risas y penas compartidas, por los sentimientos que dejaron y por aceptarme tal cual soy, una anestesia frente a situaciones adversas. En especial a Pazy amika por ser mi compañera de baile, Cesar por su paciencia, Ernesto y Vale.

A todas las personas que encontré en este camino de formación y me dejaron una enseñanza que formaron mi carácter y forma de ver la vida.

Agradecer también al profesor Dr. Lautaro Taborga, por brindar apoyo en su laboratorio de productos naturales, parte fundamental del presente trabajo, y estar siempre dispuesto a responder a cualquier duda que surgió en el proceso.

Al profesor Dr. Jan Bergmann, por facilitarnos sus equipos en el laboratorio de química en la universidad Católica de Valparaíso, por su confianza contribuyendo de manera positiva al término de este trabajo.

A la Corporación Nacional Forestal (CONAF), por facilitarnos el permiso en la Reserva Nacional Lago Peñuelas para la recolección de muestra vegetal contribuyendo de manera responsable a la obtención de información científica.

A todas las personas que contribuyeron con su granito de arena para que este trabajo se llevara a cabo. Muchas gracias.



2 RESUMEN

La región de Valparaíso ha sido constantemente amenazada por incendios forestales, afectando a especies forestales nativas y exóticas. Su ecosistema de tipo mediterráneo bajo una clara estacionalidad (muy seco en verano) y el factor humano proporcionan las condiciones necesarias para el inicio y la propagación del fuego. Existen también factores naturales que influyen en la inflamabilidad de las especies forestales, siendo los terpenos los más estudiados. Cuando las hojas de las especies forestales están sometidas a altas temperaturas, antes de la fase de llama, inducen fácilmente a la evaporación de terpenos (altamente inflamables) contenidos al interior de las hojas contribuyendo al encendido y propagación del fuego en un incendio forestal.

El objetivo principal es la determinación de terpenos, contenido de humedad e inflamabilidad de las hojas de especies nativas (*Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba*) y exóticas (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Acacia dealbata*) recolectadas durante la época de verano 2019 en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Valparaíso. Los objetivos específicos son 1) determinación del grado de inflamabilidad de las hojas de especies exóticas/nativas seleccionadas usando el instrumento epirradiator, considerando la ignitabilidad y sostenibilidad, 2) caracterización química de las hojas de especies exóticas/nativas seleccionadas, 3) determinación de terpenos contenidos en las hojas de especies exóticas/nativas, usando extracción Soxhlet y análisis por Cromatografía Gaseosa acoplada a Espectrometría de Masas y 4) estudiar el efecto de los terpenos y contenido de humedad sobre la inflamabilidad utilizando análisis de varianza ANOVA.

Los resultados muestran presencia de sesquiterpenos para la mayoría de las especies analizadas. Los principales compuestos identificados fueron para: *P. radiata*: (E)- β -cariofileno y germacreno D, *E. globulus*: aloaromadendreno y aromadendreno, *C. alba*: α -bergamoteno y germacreno D y para *Q. saponaria*: aromadendreno y aloaromadendreno. Por otro lado, los tiempos de ignición fueron: *E. globulus*: 3,98 s (grado de inflamabilidad 5, extremadamente inflamable), *C. alba*: 6,85 s (grado de inflamabilidad 5, extremadamente inflamable), *A. dealbata*: 9,64 s (grado de inflamabilidad 5, extremadamente inflamable), *P. radiata*: 19,64 s (grado de inflamabilidad 3, inflamable) y *Q. saponaria*: 20,99 s (grado de inflamabilidad 3, inflamable).

La presencia de estos compuestos volátiles se relaciona positivamente con la inflamabilidad, debido a que todas las especies resultaron ser inflamables, según la tabla propuesta por Valette (1990). El principal impacto de este trabajo es contribuir con información respecto a factores naturales y su relación con la inflamabilidad del follaje de especies nativas, dado que no existen estudios actuales que describan su relación, considerando que Chile es un país vulnerable a incendios forestales. Esta información proporciona potenciales indicadores de riesgos que plantea una especie forestal en épocas de incendios forestales, contribuyendo a orientar las reforestaciones para que en un futuro las formaciones de bosques mediterráneos sean menos susceptibles a estos y, por lo tanto, reducir el daño causado por los incendios forestales.



3 ABSTRACT

Valparaíso region has been constantly threatened by wildland fires, affecting native and exotic forest species. Its mediterranean-type ecosystem under a clear seasonality (very dry in summer) and the human factor provide the necessary conditions for the onset and spread of fire. There are also natural factors that influence the flammability of forest species, terpenes being the most studied. When the leaves of the forest species are subjected to high temperatures, before the flame phase, they easily induce the evaporation of highly flammable terpenes contained inside the leaves contributing to the ignition and propagation of the forest fire.

The main objective of this investigation is the determination of terpenes, moisture content and flammability of the leaves of native species (*Quillaja saponaria* and *Cryptocarya alba*) and exotic (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Acacia dealbata*), collected during the summer of 2019 in the Reserva Nacional Lago Peñuelas, Valparaíso. The specific objectives are: 1) determination of the flammability degree of the leaves in the selected exotic and native species using an epirradiator, considering ignitability and sustainability, 2) chemical characterization of the leaves in the selected exotic and native species, 3) determination of the terpene content of the leaves in the exotic and native species, using soxhlet extraction and analysis by Gas Chromatography coupled to Mass Spectrometry, 4) study the effect of terpenes and moisture content on flammability using ANOVA analysis of variance.

The results show the presence of sesquiterpenes in the most of the species analyzed. The main compounds identified were: *P. radiata*: (E) - β -caryophyllene and germacrene D, *E. globulus*: aloaromadendrene and aromadendrene, *C. alba*: α -bergamotene and germacrene D and *Q. saponaria*: aromadendrene and aloaromadendrene. On the other hand, the ignition times were: *E. globulus*: 3.98 s (flammability grade 5, extremely flammable), *C. alba*: 6.85 s (flammability grade 5, extremely flammable), *A. dealbata*: 9.64 s (flammability grade 5, extremely flammable), *P. radiata*: 19.64 s (flammability grade 3, flammable) and *Q. saponaria*: 20.99 s (flammability grade 3, flammable).

The presence of these volatile compounds relates positively with the flammability, because all the species turned out to be flammable in different degrees, according to the table proposed by Valette (1990). This investigation contributes to information regarding natural factors and their relationship with the flammability of the foliage of native species, since there are no current studies describing their relationship, considering that Chile is a country vulnerable to wildland fires. This information provides potential indicators for the risk posed by a forest species in times of wildland fires, contributing to orienting reforestation so that in the future mediterranean forest formations are less susceptible to them and, therefore, reducing the damage caused by wildland fire.



4 ÍNDICE

4.1 ÍNDICE GENERAL

1	Agradecimientos.....	2
2	Resumen.....	3
3	Abstract.....	4
5	Introducción.....	9
6	Antecedentes.....	11
6.1	Problemática global y nacional.....	11
6.1.1	Perturbación al cambio climático.....	11
6.1.2	Incendios forestales en Chile.....	13
6.1.3	Región de Valparaíso vulnerable a incendios forestales.....	16
6.2	Inflamabilidad.....	18
6.3	Factores naturales que influyen en los incendios forestales.....	19
6.3.1	Contenido de humedad.....	20
6.3.2	Terpenos.....	21
6.4	Descripción de especies nativas y exóticas.....	23
6.4.1	<i>Quillaja saponaria</i>	23
6.4.2	<i>Cryptocarya alba</i>	24
6.4.3	<i>Pinus radiata</i>	25
6.4.4	<i>Eucalyptus globulus</i>	26
6.4.5	<i>Acacia dealbata</i>	27
6.4.6	Resumen de las especies nativas y exóticas.....	28
7	Objetivo general.....	29
7.1	Objetivos específicos.....	29
8	Parte experimental.....	30
8.1	Estudio del área.....	30



8.2	Recolección de hojas.....	32
8.3	Determinación de la inflamabilidad.....	34
8.4	Determinación del contenido de humedad.....	36
8.5	Etapas analíticas para la determinación de terpenos.....	37
8.5.1	Extracción cera cuticular.....	37
8.5.2	Extracción soxhlet.....	38
8.5.3	Extracción líquido-líquido.....	38
8.5.4	Cromatografía en placa fina.....	39
8.5.5	Rendimiento de extracción masa-masa.....	39
8.5.6	Análisis de terpenos por gc-ms.....	40
8.6	Análisis estadísticos.....	40
9	Resultados.....	42
9.1	Tiempo de ignición.....	42
9.2	Duración de la llama.....	43
9.3	Grado de inflamabilidad.....	44
9.4	Humedad de las hojas exóticas y nativas.....	44
9.5	terpenos y otros compuestos orgánicos contenidos en las hojas.....	45
9.6	Relación entre inflamabilidad y características del combustible forestal.....	52
10	Discusión.....	53
10.1	Variación de inflamabilidad según especie forestal.....	53
10.2	Variación de contenido de humedad según especies exóticas y nativas.....	55
10.3	Variación de terpenos según especies exóticas y nativas.....	56
10.4	Relación entre factores naturales y la inflamabilidad.....	58
11	Conclusión.....	60
12	Referencias.....	61
13	Anexos.....	69



4.2 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ocurrencia histórica nacional incendios forestales. CONAF 2018.....	13
Figura 2: Distribución espacial de IF en Chile, periodo 2003-2013. (Castillo et al. 2015).....	14
Figura 3: Principales áreas de riesgo de IF. (Castillo et al. 2015).....	14
Figura 4: Superficie afectada según vegetación y otros usos de suelo. (CONAF, 2018).	16
Figura 5: N° de incendios y superficie afectada en la RNLP. (CONAF 2018).....	18
Figura 6: Reserva Nacional Lago Peñuelas afectado por incendios 2017. (CONAF 2017).	18
Figura 7: Clasificación de terpenos. (Ormeño y Fernández, 2012).	21
Figura 8: Hoja y árbol de <i>Q. saponaria</i>	24
Figura 9: Hoja y árbol de <i>C. alba</i>	25
Figura 10: Hojas y árbol de <i>P. radiata</i>	25
Figura 11: Hojas y árbol de <i>E. globulus</i>	26
Figura 12: Hoja y árbol de <i>A. dealbata</i>	27
Figura 13: Estudio del área: Reserva Nacional Lago Peñuelas. (Guerrero et al., 2019)	30
Figura 14: Temperatura mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.....	31
Figura 15: % Humedad relativa mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.....	32
Figura 16: Agua caída mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.	32
Figura 17: Determinación de la especie arbórea. (Patiño, 2005).....	33
Figura 18: Recolección de hojas vegetales en la RNLP (20.03.2019).	34
Figura 19: Hojas de combustible forestal bajo la acción del epirradiator.	35
Figura 20: Determinación del contenido de humedad.	36
Figura 21: Extracción cera cuticular.	38
Figura 22: Extracción de compuestos químicos de la muestra vegetal bajo el método soxhlet. ...	38
Figura 23: Extracción líquido-líquido de la muestra vegetal.	39
Figura 24: Filtración al vacío de los extractos vegetales.....	40
Figura 25: Gráfico de barras para el parámetro Ti.....	42
Figura 26: Gráfico de barras para el parámetro DII	43
Figura 27: Gráfico de barras para el contenido de humedad.....	45
Figura 28: Fracción metanol, ciclohexano, cera y emulsión de aceite total de cada especie.....	46



4.3 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción botánica de especies nativas y exóticas.	28
Tabla 2. Características físicas de las hojas de las especies nativas y exóticas.....	28
Tabla 3. Distribución de especies nativas y exóticas en superficie de la RNLP.....	31
Tabla 4. Condiciones ambientales campaña verano 2019.	33
Tabla 5. Grado de inflamabilidad según tiempo de ignición y frecuencia de ignición.	35
Tabla 6. Clasificación de inflamabilidad en base al grado de inflamabilidad (Valette, 1990).	36
Tabla 7. Clasificación del grado de inflamabilidad.....	44
Tabla 8. Identificación de compuestos químicos para especies exóticas y nativas verano 2019.....	48
Tabla 9. Relación obtenida entre los parámetros de la inflamabilidad y factores naturales.....	52
Tabla 10. Tabla resumen inflamabilidad.	55

4.4 ANEXOS

Anexo A: Cromatografía en placa fina.....	69
Anexo B: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable tiempo de ignición.....	70
Anexo C: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable duración de llama.	72
Anexo D: Cromatogramas especies verano 2019.....	74



5 INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales (IF) son un problema medioambiental a nivel global y nacional, puesto que en las últimas décadas se ha evidenciado un aumento en el número de IF y superficie afectada, generando gases de efecto invernadero y partículas contaminantes afectando a la salud de la población (Castillo *et al.*, 2003). Frecuentes son los IF en países mediterráneos como España, Portugal, Grecia, sur de Italia, Francia y Chile (Pausas *et al.*, 2012; Carmona *et al.*, 2012). Si bien casi la totalidad de los IF recaen en la acción humana, factores climáticos han intensificado la propagación del fuego debido a que se han registrado temperaturas globales al alza y una disminución en las precipitaciones ocasionando sequías extremas. Particularmente vulnerables a estos cambios climáticos son las regiones mediterráneas debido a su clara estacionalidad, muy frío y húmedo en invierno mientras que en verano se presenta un clima muy seco y altas temperaturas contribuyendo al desarrollo del fuego. Sin embargo, también existe evidencia científica sobre los factores naturales de las especies forestales como el contenido de humedad, composición química, morfología de las hojas, entre otros, que se relacionan con el encendido y propagación del fuego en un IF.

Investigadores (Alessio *et al.*, 2008a; Brook *et al.*, 2004; Ormeño *et al.*, 2009) han estudiado factores naturales centrados en la relación de la inflamabilidad de las plantas. La inflamabilidad en términos simples se describe como la capacidad de los combustibles forestales para encender y quemar al estar en contacto con una fuente de ignición (Morgan *et al.*, 2015).

Uno de los factores naturales más importantes que influyen en la inflamabilidad de las especies forestales corresponde a la composición química, principalmente el contenido de terpenos. Investigadores (Owens, 1998; Ormeño *et al.* 2009; Pausas *et al.* 2016; Rocca *et al.* 2017), han observado que una mayor inflamabilidad de las especies vegetales está directamente influenciada por la alta concentración de terpenos acumulados en hojas y hojarascas.

Los terpenos son compuestos químicos que lo sintetizan la mayor parte de las especies vegetales que se acumulan en el interior de las plantas, y que forman parte de las emisiones volátiles. Los terpenos presentan una alta inflamabilidad debido a sus bajos puntos de inflamación, es decir, a niveles de temperaturas bajas son capaces de generar una mezcla de gases inflamables contribuyendo a la propagación de un IF (Ormeño y Fernández, 2012). Se estudia frecuentemente el follaje de las especies forestales, debido a que es lo primero que se enciende en un IF.

La obtención del conocimiento acerca de las propiedades termoquímicas y fisicoquímicas de las especies forestales afectadas por IF han aumentado en distintos lugares del mundo, a medida que se intensifica la preocupación por el escenario climático que se proyecta para la segunda mitad del siglo XXI, que muestran tendencias caracterizadas por una extensión de la temporada más cálida y un



aumento de la sequía debido Al incremento de la temperatura y una disminución de las precipitaciones (Holz *et al.*, 2017).

A raíz de lo anterior se encontró abundante información bibliográfica sobre la inflamabilidad de especies exóticas/introducidas que habitan en Chile, analizadas en otras regiones del mundo que pueden ser guías útiles para que lo usen gestores de incendios cuando buscan plantas no inflamables o menos inflamables. Sin embargo, hasta la fecha de hoy, no se han reportado propiedades termoquímicas como la inflamabilidad y tampoco estudios sobre factores naturales y su relación en la inflamabilidad para el bosque nativo en Chile.

Generalmente se piensa que las especies nativas se queman mucho más lento que especies exóticas como, por ejemplo, lo señalado por la investigadora Gómez S. en la revista Mundo Forestal (2017), y consecuentemente incentivando a reforestar con especies nativas, sin embargo, como se mencionó, estudios de inflamabilidad en Chile no se han reportado con relación al bosque nativo. A partir de lo anterior surge la siguiente pregunta: ¿Las especies nativas son menos inflamables que las especies exóticas?

Por lo tanto, considerando que Chile es un país vulnerable a los IF, clasificar a los combustibles naturales según su inflamabilidad proporciona información básica (que debe ser usada con precaución), que contribuye a la comprensión de la complejidad del comportamiento del fuego en relación con las condiciones ambientales cambiantes, y que pueden desempeñar un papel importante en las discusiones de gestión y políticas sobre IF (White y Zipperer, 2010).



6 ANTECEDENTES

6.1 PROBLEMÁTICA GLOBAL Y NACIONAL.

6.1.1 PERTURBACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.

A nivel global, cada año los IF afectan entre 330 y 430 millones de hectáreas (ha) de bosques y otros tipos de vegetación (Giglio *et al.*, 2006). A pesar de que los IF son un proceso natural en zonas forestales, en las últimas décadas, se ha evidenciado un aumento en la frecuencia y severidad de éstos a nivel mundial (Turco *et al.*, 2017). Frecuentemente, regiones climáticas del tipo mediterráneo son las más afectadas por los IF (Pausas *et al.*, 2012; Carmona *et al.*, 2012), debido a que estas regiones se caracterizan por las condiciones climáticas propicias para el desarrollo del fuego y porque estas áreas a menudo están compuestas por especies altamente inflamables (Syphard *et al.*, 2007; Ganteaume y Jappiot, 2013). Por ejemplo, en Australia en el año 2009, registró su temporada récord en cuanto a IF denominada “Black Saturday Bush Fire”, destruyendo más de 450 mil ha de zonas forestales. Así mismo, en el 2017, el número de IF en Europa aumentó casi un 200% respecto al promedio de la última década (Turco *et al.*, 2017). Recientemente, en el 2018, California registró su temporada más destructiva afectando alrededor de 7 mil ha (CAL Fire, 2018). En Sudamérica Argentina lidera la lista con 1 millón de ha afectadas hasta el 2017, seguido por Chile con el gran incendio registrado en la temporada de verano 2016/2017, afectando alrededor de 600 mil ha.

La mayor parte de los IF que se originan en todo el mundo, están relacionados con la acción humana y no con los fenómenos naturales (FAO, 2011). En la región mediterránea, las causas directas de los IF son 90% antropogénicos (descuidos en la manipulación de fuentes de calor, prácticas agrícolas o por intencionalidad), mientras que otros fenómenos naturales como los rayos juegan un papel menos importante (FAO, 2011). Pero las causas que han intensificado el comportamiento y los efectos de IF se relacionan principalmente con factores climáticos como por ejemplo las altas temperaturas y los periodos largos de sequías que alteran la cantidad de agua en las plantas, y los vientos fuertes que aceleran los procesos de combustión y propagación (FAO, 2011). Investigadores como Ballesteros y Aristizaba (2007) y Solomon *et al.* (2007) anunciaban que, según las predicciones del cambio climático, regiones como la del mediterráneo se exponían a una estación de IF más intensa y con mayor frecuencia debido a las proyecciones en el aumento de la temperatura a nivel global. Actualmente, se apoya la hipótesis que en el sur de Europa las condiciones de sequía en verano y niveles altas de temperaturas son los principales impulsores de los IF (Gudmundsson *et al.*, 2014; Turco *et al.*, 2017).



En consecuencia, si bien, el cambio climático pone de manifiesto factores claves para la propagación del fuego como son las temperaturas extremas y sequías severas, uno de los mayores impactos que genera los IF en el medio ambiente es contribuir al cambio climático (Pausas, 2009). Y esto se debe principalmente por la cantidad de gases contaminantes de efecto invernadero liberados durante la quema de un bosque, como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), dióxido de nitrógeno (N_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Castillo *et al.*, 2003).

El CO_2 es el principal gas de efecto invernadero debido a que se genera en mayor proporción y por su directa relación en el aumento de la temperatura del planeta. Este gas almacenado por los árboles durante décadas es liberado a la atmósfera en cuestión de horas, y si la vegetación quemada no se regenera, el CO_2 permanece en la atmósfera, considerando que los bosques y coberturas vegetacionales son las vías más importantes para fijar carbono (Castillo *et al.*, 2003).

Por otro lado, la interacción de los gases productos de los IF como los COVs y NO_x (NO y NO_2), dan lugar a reacciones radicalarias atmosféricas que en presencia de luz conducen a la formación de ozono troposférico (O_3), considerado también como gas de efecto invernadero (Sandoval *et al.*, 2019).

Además, se emiten grandes cantidades de material particulado atmosférico de 10, 2,5 y 1,0 micrones (μm) (MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$ y $\text{MP}_{1,0}$) contribuyendo a la contaminación del medio ambiente (Castillo *et al.*, 2003). Se han encontrado también una fracción del 10% y 11% de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) adheridos al material particulado generados en un IF, contribuyendo de manera negativa a la salud de la población, por ser altamente cancerígenos (George *et al.*, 2016).

Bajo este contexto, la alteración de los componentes atmosféricos producto de los IF genera efectos nocivos para la salud de las personas a nivel mundial, principalmente a la población más vulnerable (niños, embarazadas, ancianos y personas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias). Se ha observado que la exposición a contaminantes atmosféricos derivados de los IF principalmente al material particulado atmosférico $\leq 10 \mu\text{m}$ se asocia a un aumento en enfermedades respiratorias, cardiovascular y alteración en el sistema nervioso (Sandoval *et al.*, 2019). El posterior monitoreo de las emisiones de humo provenientes de los IF, han demostrado que persisten en la atmósfera semanas e incluso meses, como fue en el caso del sudeste de Asia entre 1982 y 1998 que dejó a más de 40 millones de personas expuestas (EIRD, 2000).

En el medioambiente, los IF son un proceso de perturbación importante que impacta en la estabilidad de los diferentes ecosistemas. El fuego perturba los ciclos biogeoquímicos, produce cambios en la vegetación, suelo, pérdida de diversidad de especies endémicas de fauna y flora, procesos hidrológicos y geomorfológicos influyendo directamente en la evolución de todo el ecosistema (Raison *et al.*, 2009; Moody y Martin, 2009).

En general, bajo el escenario del cambio climático global los IF han evolucionado en el tiempo, es decir, se quema más superficie en un menor n° de incendios. Con una temperatura media global al alza, que implica veranos cada vez más calurosos y sequías extremas, empeora las condiciones de inicio y propagación de IF. De acuerdo con las proyecciones de IF, en las próximas décadas se espera que los efectos climáticos se fortalezcan y posiblemente superen los esfuerzos de prevención de incendios.

6.1.2 INCENDIOS FORESTALES EN CHILE.

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) define un IF como el fuego que se propaga sin control en terrenos rurales, cualquiera sea su origen afectando a personas, propiedad y el ambiente, propagándose a través de vegetación leñosa, arbustiva viva o muerta (CONAF, 2018).

En Chile, los IF constituyen una de las perturbaciones más frecuentes e importantes que sufren los ecosistemas forestales. Chile, cubre un territorio de aproximadamente 13,6 millones de ha de bosque nativo y otros 2,2 millones de ha de plantaciones forestales o especies introducidas (Castillo *et al.*, 2015). Su ecosistema posee un clima tipo mediterráneo junto a una clara estacionalidad con períodos prolongados de sequía, factores que, sumados al factor humano, dan lugar a las condiciones necesarias para el inicio y propagación del fuego.

En la figura 1 se muestra la evolución de los IF en el pasar de los años, registrando un aumento considerable en el número de incendios. En promedio son 50 mil ha afectadas anualmente, registrando valores extremos entre 10 mil y 580 mil ha.

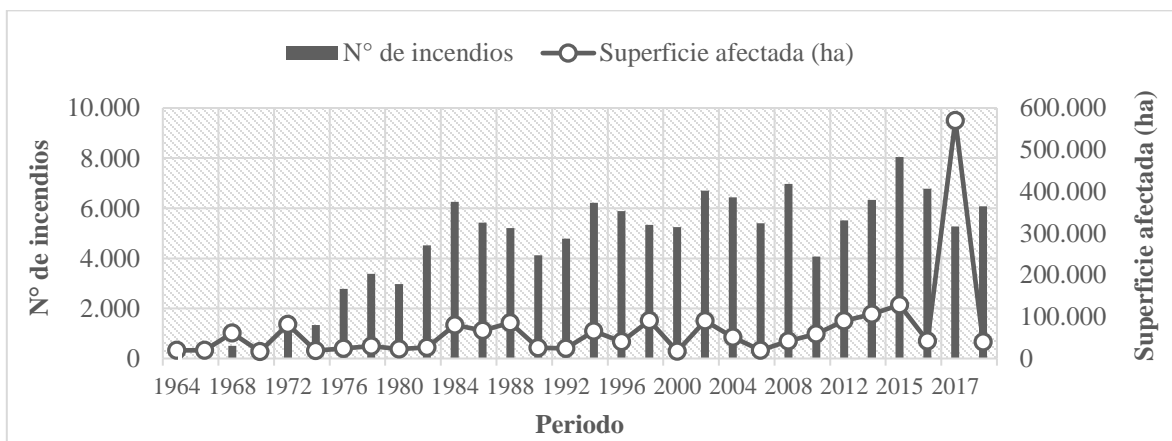


Figura 1: Registro histórico nacional de ocurrencia de IF y superficie afecta. (CONAF, 2018).

Estudios realizados por el Laboratorio de IF de la Universidad de Chile combinados con registros de incendios reportados por CONAF, han conseguido establecer lugares críticos con relación a la ocurrencia de incendios (figura 2) y, en consecuencia, definir zonas de riesgo de IF identificadas por una mayor concentración de densidad de IF en áreas cercanas a los principales centros de población

(figura 3). La zona centro sur de Chile es la que posee mayor cantidad de IF, principalmente las ciudades de Valparaíso, Santiago, Temuco y Concepción.

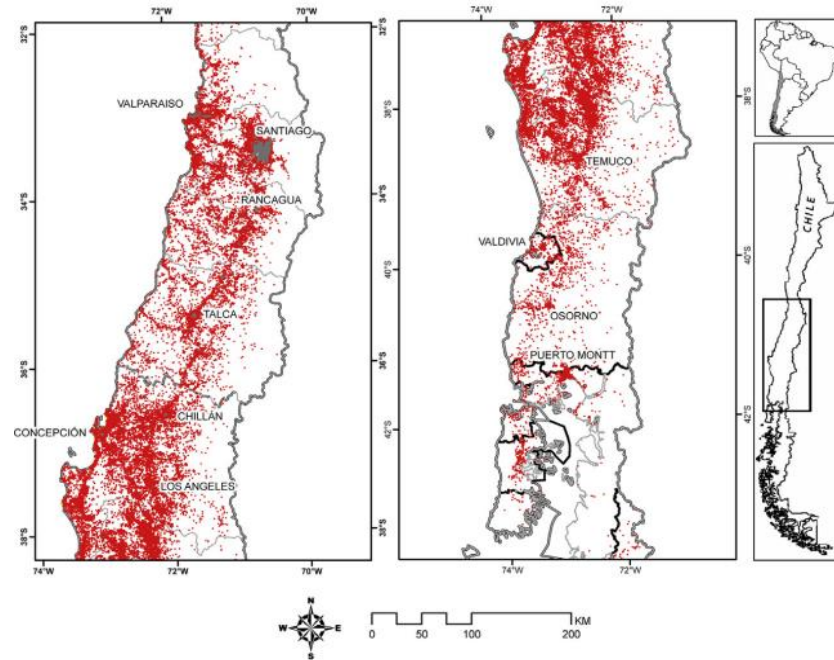


Figura 2: Distribución espacial de IF en Chile, periodo 2003-2013. Las áreas marcadas en rojo corresponden al número de incendios que coinciden con los principales centros de población y carreteras. (Castillo *et al.*, 2015).

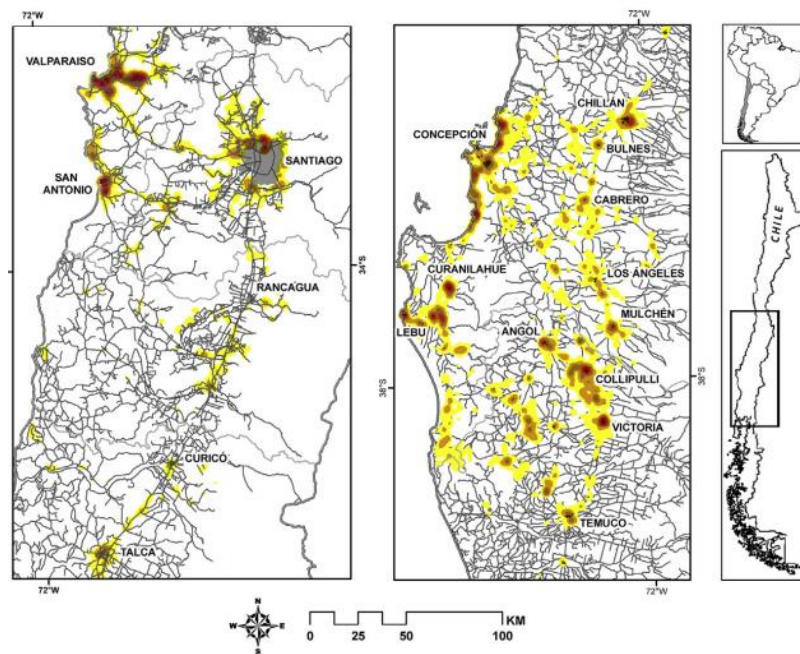


Figura 3: Principales áreas de riesgo de IF, definidas por la alta concentración de IF en el tiempo periodo 2003-2013. Mayores densidades se muestran más oscuras. (Castillo *et al.*, 2015).



En particular, para la temporada 2016/2017, Chile registró una de las temporadas más destructivas en términos de la superficie afectada (ver figura 1), superando las cifras en un 1000%. En total, se quemaron alrededor de 576 mil ha forestales, con más de 2 mil personas afectadas y más de 4 mil personas lidiando contra el fuego (CONAF, 2017; Vicencio *et al.*, 2017). Como era de esperarse, las zonas más afectadas resultaron ser las regiones ya catalogadas en zona de riesgos, extendiéndose entre la región de Coquimbo y la Araucanía, pero principalmente las regiones de O'Higgins, Maule y Biobío. Se registraron propagaciones del fuego hasta 8 mil ha por hora (hah^{-1}) y con intensidades caloríficas de más de 60 mil kilovatios por metro (kWm^{-1}) (Castellnou *et al.*, 2017; CONAF, 2017). A causa de la velocidad, intensidad y continuidad provocó la modificación del clima a nivel mesoregional aumentando la temperatura y bajando la humedad relativa (Katz *et al.*, 2017).

La alta simultaneidad y las extensas zonas afectadas por IF, se convirtió en un episodio mundial, pues anterior a éste, la escala global de medición de IF llegaba hasta la denominada “quinta generación” la escala más destructiva que se haya conocido y no fue posible ajustarse a esa escala. La suma de todas estas condiciones describen a este episodio como una verdadera “tormenta de fuego” abriendo una nueva escala de medición llamada de “sexta generación” (CONAF, 2017), definiéndola como un “IF tan potente que dejó de ser un hecho físico para convertirse en un fenómeno meteorológico” (CONAF, 2017).

Según CONAF, las causas de los IF en Chile son 99,7% antropogénicas principalmente, y el cambio climático probablemente los intensifica pues, el escenario climático proyectado en Chile predecía un incremento en la temperatura a nivel nacional, una disminución significativa en las precipitaciones, y, en consecuencia, el aumento de sequías, factores claves que promovían la propagación de los IF (Díaz y González, 2016). Afirmando lo anterior, durante la época estival 2016/2017, Chile registró temperaturas máximas en la zona centro del país (alrededor de 35°C) y además se encontraba bajo una severa sequía desde el año 2009 produciendo un estrés hídrico de la vegetación que generó gran cantidad de material combustible susceptible a la ignición e inflamabilidad (Castellnou *et al.*, 2017). La evaluación de daños respecto a la vegetación forestal para la temporada 2016/2017, revelan que las especies forestales más afectadas corresponden a plantaciones forestales, en comparación con especies nativas o praderas y matorrales, principalmente para la región del Maule y Bío Bío, datos esperados, ya que las regiones del Maule, Biobío y La Araucanía concentran más del 84% de las plantaciones forestales existentes en el país (CONAF, 2017). A continuación, la figura 4 muestra la superficie afectada según el tipo de vegetación entre la región de Valparaíso y la Araucanía. La región más afectada fue la región del Maule con 280 mil ha quemadas, seguido de las regiones del Bío Bío y O'Higgins con 99 mil y 90 mil ha afectadas respectivamente.

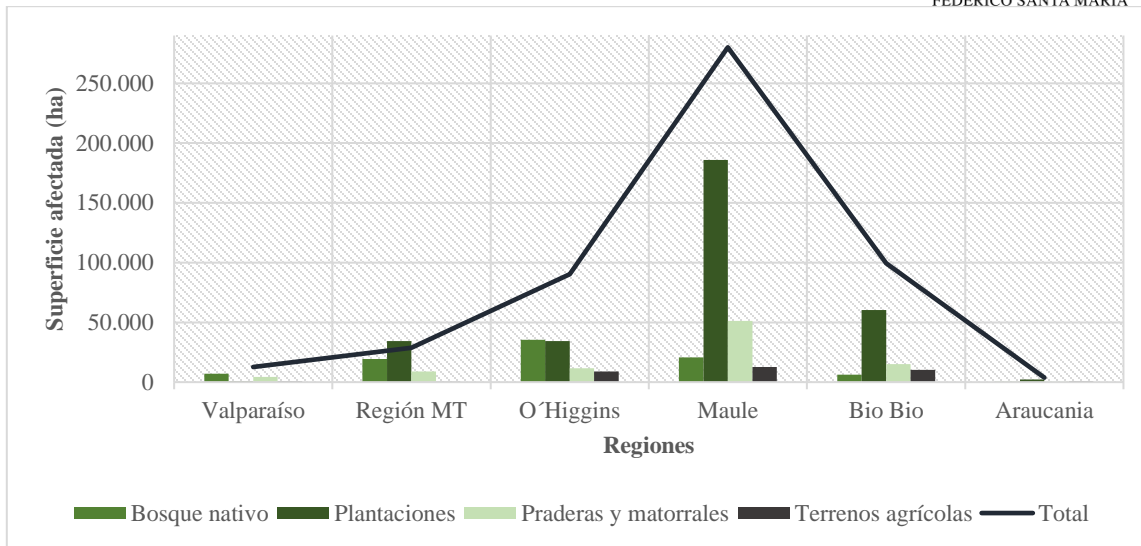


Figura 4: Superficie afectada según vegetación y otros usos de suelo por IF entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía para la temporada 2017. (CONAF, 2018).

En resumen, en la zona mediterránea del centro sur de Chile, los IF constituyen actualmente la causa más importante de destrucción en zonas forestales. Esto se ve reflejado en la recurrencia del fuego, la propagación del fuego y daños ocurridos, al igual que en zonas mediterráneas de otros lugares del mundo.

En cuanto a la situación clima tiempo, se estima que las temperaturas y las precipitaciones presentarán cambios importantes en un futuro contribuyendo al desarrollo de los IF. Solomon *et al.* (2007), en un estudio sobre variabilidad climática en el siglo XXI, estimó que hacia finales de siglo la zona centro-sur de Chile experimentaría una disminución en las precipitaciones de hasta un 40% en el periodo de verano. Y en relación con la temperatura, se espera un calentamiento en todas las regiones, el que variaría entre 2 y 4 °C, para fines del siglo XXI (CONAF, 2017).

6.1.3 REGIÓN DE VALPARAÍSO VULNERABLE A INCENDIOS FORESTALES.

La región de Valparaíso es la tercera región del país que más IF ha registrado entre el periodo 1985-2018 (CONAF, 2018). En los últimos 10 años, la región de Valparaíso ha sido afectada por más de 8 mil IF de características similares, eventos históricos han marcado a Valparaíso como lo fue el siniestro ocurrido en abril del 2014 con más de 3 mil viviendas quemadas, 12 mil damnificados incluidas víctimas fatales (CONAF, 2018).

Hasta el año 2016, según el Sistema de Información Territorial CONAF 2016 mostraba que dentro de la región de Valparaíso existían alrededor de 544 mil hectáreas de bosques, el 87% correspondiente a bosque nativo con 484 mil ha, mientras que el 12% corresponde a plantaciones forestales con 68 mil ha. Como antecedente, un estudio reciente (Atisba, 2017), basados en datos de la CONAF y



evidenciados por el sistema de la NASA “FIRMS” (Fire Information for Resource Management System), desde el año 2000 hasta el 2017, afirmaron que la mayoría de los IF se originan en zonas rurales especialmente en plantaciones forestales, con un 82%, mientras que sólo el 18% corresponde a zonas con especies nativas.

Durante la temporada 2016/2017, tiempo en que se desató la denominada “tormenta de fuego”, la región de Valparaíso no quedó atrás, ocurrieron alrededor de 961 IF afectando alrededor de 27 mil ha de zonas forestales (CONAF, 2017). Particularmente, en la ciudad de Valparaíso que cuenta con 19 mil ha de superficie forestal, se vieron afectadas especies forestales del tipo nativas, endémicas: *Cryptocarya alba*, *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica* (peumo, quillay, litre especies endémicas y nativas, 2.540,2 ha quemadas) y plantaciones forestales: *Eucalyptus globulus* (eucalipto, especie introducida, 644,8 ha quemadas), *Pinus radiata* (pino, especie introducida, 28,3 ha quemadas) (CONAF, 2017). A partir de los datos anteriores, la vegetación nativa resultó ser la más afectada en superficie quemada, principalmente por cubrir una mayor superficie en la región y ciudad de Valparaíso y generalmente por la mayor inversión realizada en proteger el recurso de las plantaciones forestales por la industria forestal (Díaz y Ormazabal, 2016).

En conclusión, Valparaíso, es considerada como comuna crítica y vulnerable, debido a la alta concentración de IF y la severidad en cuanto a daños causados. Esto se fundamenta principalmente por la extensión del uso de suelo de carácter forestal ubicadas principalmente en la zona alta de la ciudad, acompañado por las amenazas naturales de carácter climático con valores extremos analizados en Valparaíso. Las amenazas consideradas son la mezcla de vientos por sobre los 30 nudos, temperaturas ambientales por sobre los 30°C y una humedad ambiental por debajo del 30%, es lo que se conoce como la regla 30-30-30. Estas condiciones de riesgo siguen presentes en Valparaíso y algunas se agravarán como resultado del cambio climático, lo que podría elevar el número de IF (Atisba, 2017).

Si bien, el comienzo de los IF ocurre en lugares que están desprotegidos, igualmente afectan a zonas en protección como es el caso de la Reserva Nacional Lago Peñuelas (RNLP).

La RNLP está ubicada en la quinta región, comuna de Valparaíso, la cual se extiende entre los 32° 02' y 33° 57' latitud sur, y desde los 70° 00' longitud oeste hasta el océano Pacífico y cuenta con alrededor de 9 mil ha de superficie. Está protegida dentro del Sistema Nacional de áreas Silvestres del estado, debido a que posee una alta diversidad biológica y ecosistémica, creada mediante decreto ley n°859 en 1952 (CONAF, 2018). La RNLP presenta un clima mediterráneo propia de la zona central de Chile caracterizado por periodos de lluvias intensas durante el invierno y una estación seca bien marcada durante el verano (Koeppen, 1931). El clima descrito condiciona que la vegetación sea del tipo esclerófila, es decir, sus árboles y arbustos son de hoja perenne, hojas duras y resistentes

capaces de controlar la pérdida de agua en periodos de sequía. La RNLP es un hábitat importante para diversas especies de fauna acuática y terrestres en estado de protección. En cuanto a vegetación en estado de conservación abundan la palma chilena (*Jubaea chilensis*), quillay (*Quillaja saponaria*), peumo (*Cryptocarya alba*) y litre (*Lithraea caustica*) como los más representativos, y cuenta con especies exóticas introducidas como pino insigne (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Hauenstein *et al.*, 2009; CONAF, 2018).

Bajo el escenario de IF, la RNLP, también ha sido afectada por estos acontecimientos, a pesar de ser una zona protegida, la figura 5 muestra el registro del número de IF y superficie afectada entre las temporadas 2011 y 2019.

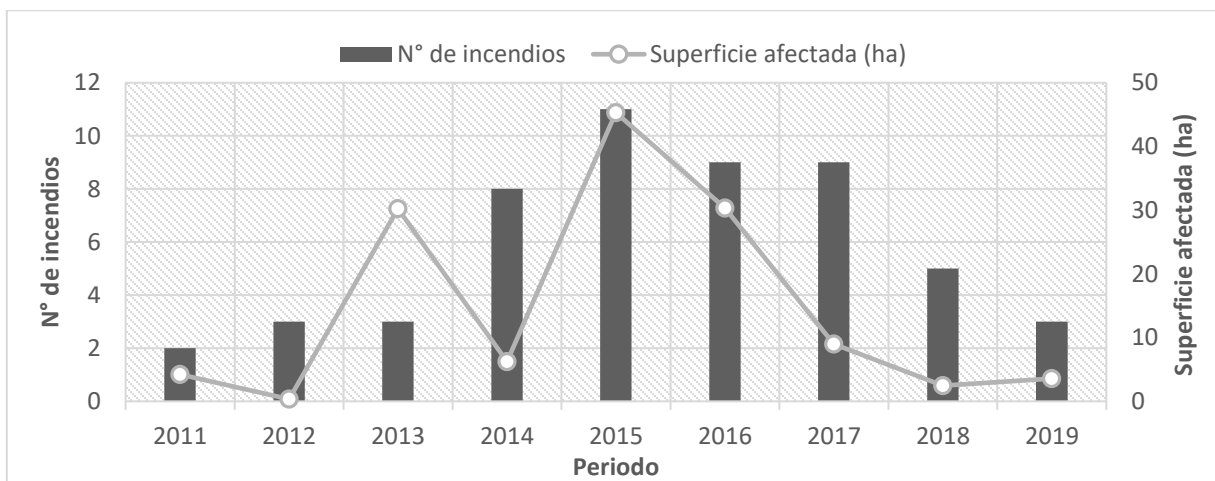


Figura 5: N° de incendios y superficie afectada en la RNLP. (CONAF, 2018).



Figura 6: RNLP afectado por IF en la temporada 2017. (CONAF, 2017).

6.2 INFLAMABILIDAD.

Una de las características básicas del combustible forestal es la inflamabilidad. El conocimiento de la inflamabilidad resulta de gran utilidad al momento de analizar riesgos de inicios y propagación de IF. Constantemente, se busca clasificar las especies forestales según el criterio de la inflamabilidad para



su posterior uso en mapas de riesgos con relación a IF, con el fin de entregar una orientación al manejo y gestión en reforestación (Dimitrakopoulos *et al.*, 2010).

La inflamabilidad generalmente describe la capacidad de los combustibles forestales para encender y quemar al estar en contacto con una fuente de calor constante (Morgan *et al.* 2015). Sin embargo, la definición más utilizada para la inflamabilidad en especies forestales fue descrita por Anderson (1970). Para este investigador, la inflamabilidad considera tres componentes principales: 1) Ignitabilidad: que es la facilidad con que se enciende un material, y puede describirse con el tiempo de encendido bajo un flujo de calor constante. 2) Sostenibilidad: describe la capacidad de un combustible para sostener la llama, una vez encendido. 3) Combustibilidad: la velocidad a la que un combustible se quema. Adicionalmente, Martin *et al.* (1994) considera un cuarto fenómeno que es la 4) Consumabilidad, relacionada con la cantidad de material consumido en el proceso de combustión. Estos parámetros de la inflamabilidad son estudiados a nivel de laboratorio, y contribuyen a la comprensión del comportamiento del fuego en el campo. Por ejemplo, la ignitabilidad afecta a la frecuencia de ignición y propagación, la sostenibilidad en el tiempo de residencia de la llama, la combustibilidad en la intensidad del fuego y la consumabilidad en la cantidad de combustible consumido (Morgan *et al.*, 2015).

Diferentes métodos se han utilizado para medir los parámetros de la inflamabilidad. El más simple consta en someter la muestra vegetal en un horno a diferentes temperaturas observando los tiempos de ignición, sin embargo, los resultados han demostrado ser insuficientes por no incluir fuego a la superficie (Montgomery y Cheo, 1971; Liodakis *et al.*, 2002). También se ha utilizado el calorímetro cónico ASTM E 1354 para combustible forestal, que consiste en medir la cantidad de calor generado en la combustión y que es asociado a la gravedad del fuego (Dimitrakopoulos *et al.*, 2001; White *et al.*, 2010). Pero unos de los métodos comúnmente utilizados para investigar la inflamabilidad en la vegetación corresponden a los ensayos basados en el instrumento del epirradiator aplicado inicialmente por Valette (1990) en especies forestales mediterráneas y hasta el día de hoy autores (Alessio *et al.*, 2008; Frejaille *et al.*, 2013; Rocca *et al.*, 2015; Blackhall y Raffaele., 2019) siguen reproduciendo este método. Este instrumento proporciona la exposición contante al calor de la muestra vegetal, y que en presencia de una llama piloto origina la inflamación de los compuestos orgánicos que se evaporan en el proceso de transferencia de calor.

6.3 FACTORES NATURALES QUE INFLUYEN EN LOS INCENDIOS FORESTALES.

Existen factores naturales en las especies forestales que también contribuyen al encendido y propagación del fuego en un IF. Estos factores naturales corresponden al contenido de humedad, composición química y morfología entre otros. Investigadores (Alessio *et al.*, 2008; Ormeño *et al.*,



2009; Cubino *et al.*, 2017 y Romero *et al.*, 2019) han estudiado estos factores naturales obteniendo relaciones importantes en el inicio y propagación de un IF. En el presente estudio, se estudiarán factores naturales como el contenido de humedad y la identificación de compuestos químicos en especies forestales y su relación con la inflamabilidad.

6.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD.

El contenido de humedad del combustible forestal es relevante para la combustión, debido a que el agua tiene un alto calor específico, y para evaporarla se debe utilizar energía antes de que el combustible pueda elevarse a la temperatura de ignición, aumentando la energía requerida antes de inflamarse, por lo tanto, una mayor o menor cantidad de hidratación en el combustible vivo influye en el tiempo de encendido (Simms y Law, 1967).

Trabaud (1974), en su estudio relacionado a la inflamabilidad de especies forestales mediterráneas en Francia para diferentes especies de garrido y maquis (pequeños árboles y arbustos esclerófilos con follaje de hoja perenne, que crecen en suelos calcáreos), describió una tendencia donde las hojas con un menor porcentaje de agua se incendian fácilmente, mientras que las hojas con alta hidratación tienen mayor dificultad o rara vez se encienden.

Pellizaro *et al.* (2007) proporcionó fuertes relaciones entre el contenido de humedad y la inflamabilidad de las hojas de 8 especies forestales comunes de la cuenca del mediterráneo en Italia para distintas especies de maquis: *Juniperus phoenicea*, *Chamaerops humilis*, *Cistus monspeliensis*, *Phillyrea angustifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis*, *Genista acanthoclada* y *Helichrysum italicum*. Estos investigadores reportaron un menor tiempo de ignición para especies que registraron un menor contenido de humedad.

Alessio *et al.* (2008), investigaron el contenido de humedad y su relación sobre la inflamabilidad para especies de hoja perenne y esclerófilo: *Erica multiflora*, *Globularia alypum*, *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis* y árboles jóvenes de *Pinus halepensis*. Las especies más inflamables resultaron *P. halepensis*, *E. multiflora* y *P. latifolia* y *Q. ilex*, especies que obtuvieron el menor contenido de humedad. Se concluyó que la inflamabilidad depende estrictamente de la disponibilidad de agua de las hojas, como se demostró para todas las especies.

Blackhall y Raffaele (2019) buscó elaborar una lista sobre la inflamabilidad entre especies nativas comunes y plantaciones de coníferas exóticas que se encuentran con frecuencia en las zonas de interfase urbano-forestales del noroeste de la Patagonia, con región climática de tipo mediterránea. Los resultados mostraron que la mayoría de las especies nativas como *Aristotelia chilensis*, diferentes especies del género *Ribes*, *Schinus patagonicus*, *Maytenus boaria* y *Araucaria Araucana* entre otros mostraron baja inflamabilidad en comparación con las plantaciones exóticas de coníferas. Esta

diferencia en general estuvo relacionada significativamente con el contenido de humedad. Las especies menos inflamables fueron caracterizadas por valores altos de humedad y tiempo de ignición más largos.

En resumen, existe evidencia científica sobre el contenido de humedad de las hojas en diferentes especies forestales del mediterráneo y como contrarresta la inflamabilidad del combustible forestal. Sin embargo, se ha encontrado que la dependencia de la condición hídrica de las hojas y relación con la inflamabilidad también está vinculada a otros factores ambientales. Algunas especies son más inflamables que otras incluso con el mismo contenido de agua. Esto se debe principalmente a la naturaleza dinámica y compleja de las plantas, tanto a su composición química, morfología, densidad del follaje y distribución del follaje (Massari y Leopaldi, 1998).

6.3.2 TERPENOS

Los terpenos son compuestos orgánicos volátiles (COVs) de origen natural sintetizados por las plantas y están constituidos por la unión de unidades básicas de 5 átomos de carbono llamado isopreno (Ormeño y Fernández, 2012). Existe una amplia clasificación de los terpenos según la cantidad de átomos de carbono, por ejemplo, en la figura 7, se muestra la volatilidad de algunos terpenos indicado por la cantidad de flechas, los compuestos más pequeños son más volátiles, éstos son los hemiterpenos y monoterpenos, sintetizados por una y la unión de dos moléculas del isopreno respectivamente, mientras que los compuestos más grandes son menos volátiles y están unidos por tres y cuatro cadenas de isopreno generando sesquiterpenos y diterpenos respectivamente (Ormeño y Fernández, 2012).

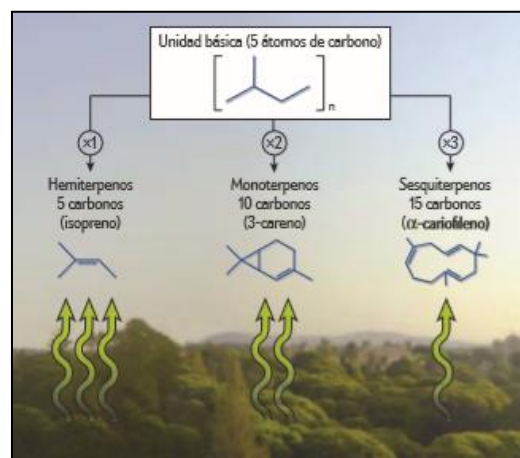


Figura 7: Clasificación de terpenos. (Ormeño y Fernández, 2012).

Las plantas emiten grandes concentraciones de terpenos a la atmósfera, pero también pueden encontrarse en las hojas, flores y frutos, y en menor cantidad en las ramas, tronco y raíces (Ormeño y Fernández, 2012). Los terpenos dan características de aroma y sabor a las plantas, constituyendo la



mayor parte del aceite esencial extraídos de las plantas. En la actualidad, existen más de 15 mil compuestos terpénicos, y esta gran diversidad, es debido a las numerosas funciones que se realizan en la planta que los produce (Ormeño y Fernández, 2012).

Los COVs ejercen diferentes funciones sobre su entorno: sobre las plantas vecinas como medio de comunicación, sobre los diferentes ecosistemas influyendo de forma negativa en la biodiversidad de otras especies vegetales y sobre relaciones tróficas evitando la herbívora y polinización (Dicke *et al.*, 2003; Ormeño y Fernandez, 2012).

La parte de los terpenos que se acumulan en las especies forestales cumplen funciones protectoras frente a situaciones de estrés como las sequías, exceso de luz y contaminación, debido a sus propiedades antioxidantes (Marín *et al.*, 2007; Ormeño y Fernandez, 2012).

Por otro lado, los terpenos también influyen en los ecosistemas de otra manera: fomentando la propagación del fuego en un IF. Esto se debe principalmente a que los terpenos presentan un alto contenido calórico y son compuestos altamente inflamables, dado que presentan un bajo punto de inflamación. Por ejemplo, los monoterpenos y sesquiterpenos poseen un punto de inflamación de alrededor de 50°C y 100°C respectivamente, esto quiere decir, que las hojas sometidas a estos niveles de temperatura inducen fácilmente a la evaporación de los COVs, generando una mezcla de gases inflamables contribuyendo al encendido y propagación del fuego en un IF (Marín *et al.*, 2007).

Se han optimizado diferentes técnicas para la determinación de terpenos, principalmente monoterpenos y sesquiterpenos. Las técnicas convencionales más comunes son la destilación por arrastre de vapor, maceración en frío y la extracción con disolvente bajo la técnica del soxhlet, pero estos requieren tiempos de extracción prolongados (Wu *et al.*, 2015). También se ha utilizado la extracción acelerada por solvente, reconocida por ser una técnica mucho más eficiente y precisa, pero el costo es mucho mayor, en comparación con las técnicas convencionales (Peredo, 2009).

6.3.2.1 RELACIÓN ENTRE TERPENOS Y LA INFLAMABILIDAD.

Las primeras evidencias científicas en correlacionar la inflamabilidad y la cantidad de terpenos en plantas fue Owens (1998), que estudió la especie *Juniperus ashei* donde la concentración del terpeno limoneno se relacionó positivamente con la inflamabilidad de la planta aumentando la inflamabilidad en un 30%.

Ormeño *et al.* (2009), investigaron la relación entre el contenido de isoprenoides y la inflamabilidad en la hojarasca de seis especies diferentes de *Pinus* y *Cistus*. Como resultado, se observó una mayor inflamabilidad en hojarascas con una mayor concentración de sesquiterpenos, que en aquellas con altas concentraciones de monoterpenos.



Pausas *et al.* (2016), evaluaron el vínculo entre el contenido de terpenos de las hojas para diferentes individuos de *Rosmarinus officinalis* (especie nativa de la cuenca del mediterráneo), y su influencia sobre la inflamabilidad. Los principales terpenos encontrados fueron eucaliptol, alcanfor y limonenos entre otros, caracterizados por su bajo punto de inflamación 49°C, 64°C y 126°C respectivamente, explicando que la presencia de estos monoterpenos y sesquiterpenos contribuyó a que las hojas encendieran más rápido.

Rocca *et al.* (2017) estudiaron el efecto cuantitativo y cualitativo de los terpenos de las plantas sobre la inflamabilidad para especies mediterráneas: *Cupressus sempervirens*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis* y *Pinus pinea*. Los resultados obtenidos mostraron que los sesquiterpenos influyeron en un 50% en los componentes de la inflamabilidad, mientras que los monoterpenos no existió una correlación significativa importante.

Los diferentes estudios mencionados, permiten evidenciar que existe información científica con relación a los terpenos almacenados en las hojas y su contribución significativa en los parámetros de la inflamabilidad, principalmente en disminuir el tiempo de encendido. Conocer factores naturales que fomentan el encendido y propagación del fuego, tiene relevancia en zonas forestales donde los IF son la causa de la mayor pérdida de la superficie forestal.

6.4 DESCRIPCIÓN DE ESPECIES NATIVAS Y EXÓTICAS.

6.4.1 QUILLAJA SAPONARIA

La especie *Quillaja saponaria* género Quillaja perteneciente a la familia Rosaceae comúnmente llamado Quillay es una especie endémica y nativa de Chile, que se distribuye entre la región de Coquimbo y la Araucanía, en la zona litoral, central y andina desde los 15 y 1.600 metros sobre el nivel del mar (msnm). Esta especie es parte del bosque esclerófilo de Chile desarrollándose bajo el clima mediterráneo (Correa y Martínez, 2013). Es un árbol siempre verde de copa ancha y de crecimiento lento alcanzando un máximo de 30 centímetros (cm) por año. Puede llegar a medir de 15 a 20 metros (m) de altura, superior a otras especies del bosque esclerófilo con un tronco de 1 m de ancho. Sus hojas son de color verde amarillento, alternas, perennes, coriáceas, oblongas de borde casi liso y con estípulas caducas y pequeñas (figura 8).

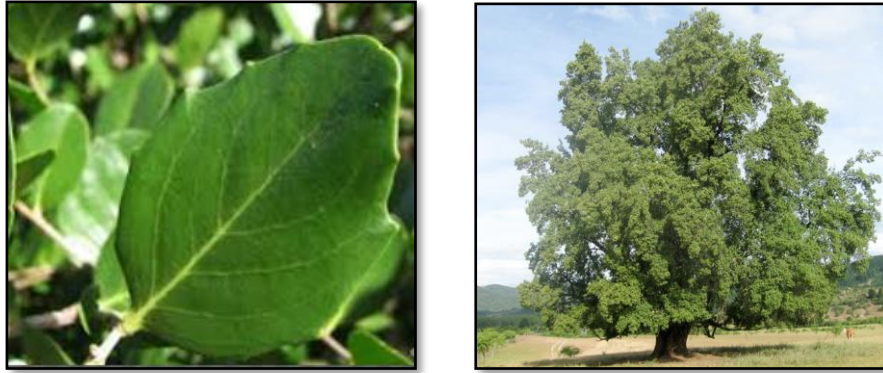


Figura 8: Hoja y árbol de *Q. saponaria*.

Q. saponaria es una especie muy adaptable, capaz de crecer en condiciones de suelos erosionados y climas desfavorables. Tolerancia condiciones de clima extremo por sequedad, altas temperaturas y también lugares estacionalmente húmedos (Navarrete, 2006).

Q. saponaria contiene saponinas en toda la parte del árbol, pero en mayor concentración en la corteza interna. La saponina es un compuesto químico particular de esta especie, utilizada desde la antigüedad como champú, dentífrico, jabón y detergente (Correa y Martínez, 2013), esto lo convirtió en un árbol muy codiciado, exportando gran parte de su corteza a Europa. Por ello, desde el año 1994 se regula por ley la extracción de corteza y su explotación requiere autorización de la CONAF. Se ha visto que en su edad adulta es capaz de resistir a los IF gracias a la gruesa corteza que presenta, además tiene la ventaja de brotar fácilmente una vez cortado (Gotor, 2008).

6.4.2 *CRYPTOCARYA ALBA*

El género *Cryptocarya* se inserta dentro de la familia Lauraceae, dentro del género *Cryptocarya* se ubica la especie endémica y nativa, *Cryptocarya alba*, conocida con el nombre común Peumo. Esta especie pertenece al bosque esclerófilo característico de la zona central de Chile. Crece desde el sur de la provincia de Limarí (IV región), hasta la de Cautín (IX región). *C. alba* se encuentra distribuida en el clima mediterráneo por su capacidad adaptarse a largos períodos de sequía, cumpliendo un rol relevante como especie protectora del suelo (Matte, 1960). Se considera una especie amenazada en algunas áreas de Chile, principalmente debido a la sobreexplotación y la destrucción del hábitat (Correa y Martínez, 2013).

Corresponde a un árbol siempreverde que puede alcanzar entre 15 y 20 m de altura. Su tronco es recto hasta 1 m de diámetro. Ramas ascendentes y follaje denso. Hojas perennes, simples, alternas opuestas, coriáceas y aromáticas, de cara superior verde y la inferior verde azulada con margen ondulado (Correa y Martínez, 2013). Existen diferencias morfológicas para las hojas expuestas a la luz o

sombra, describiendo que las hojas expuestas al sol presentan mayor superficie foliar en cuanto a superficie y espesor (Gotor, 2008) (figura 9).



Figura 9: Hoja y árbol de *C. alba*.

6.4.3 *PINUS RADIATA*

Pinus radiata es una especie que pertenece a la familia de las pináceas, género *Pinus*. Es originaria de Estados Unidos principalmente California. *P. radiata* está presente en climas mediterráneos, prefiere climas cálidos y templados, puesto que no tolera fríos extremos. Las hojas de *P. radiata* se presentan en ramillos multinodales con tres o cinco acículas por cada vaina con alas bien desarrolladas, caducas o más o menos persistente (Rodríguez, 2008) (figura 10).

En Chile fue introducido alrededor del año 1888, en la ciudad de Concepción, se popularizó por el gran interés económico al encontrar un rápido crecimiento y calidad de la madera otorgando beneficios a corto plazo, adaptándose perfectamente a las condiciones climáticas del país. La especie *P. radiata* puede alcanzar alturas cercanas a los 45 m, con crecimientos medios de 1,5 a 3 cm anuales de diámetro (CONAF, 2004).



Figura 10: Hojas y árbol de *P. radiata*.

La inflamabilidad de *P. radiata* es un factor importante para considerar, ya que, en verano, aun cuando el contenido de humedad de las hojas y acículas fluctúa entre un 90% a 135%, estas arden fácilmente por su alto contenido de elementos inflamables y porque el follaje está permanentemente con un bajo contenido de humedad (Aliaga, 1999; Fernández, 2001). Y, en consecuencia, las plantaciones de *P. radiata* al encontrarse bajo manejo intensivo por intereses económicos, aumenta la susceptibilidad a la acción del fuego al existir combustible disponible para inflamarse (Huber *et al.*, 2010).

6.4.4 *EUCALYPTUS GLOBULUS*

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia Myrtaceae. Dentro del género *Eucalyptus* se ubica la especie, *Eucalyptus globulus*, más conocida como Eucalipto. Es una especie exótica/introductada proveniente de Australia. Crece predominantemente dentro de la zona centro-sur, donde es frecuente encontrar eucaliptos de 20 años con 60 m de altura y 50 cm de diámetro. Las hojas de *E. globulus* son alargadas curvas y asimétricas de forma de falcate (CONAF, 2004) (figura 11).



Figura 11: Hojas y árbol de *E. globulus*.

Las plantaciones de *E. globulus* en Chile están orientadas principalmente a la producción de madera y a su uso como combustible (CONAF, 2004).

Se ha demostrado que esta especie siempre verde posee una mayor capacidad de absorción de agua, debido a las elevadas pérdidas por evapotranspiración durante todo el año, en gran parte a su alta tasa de crecimiento. Debido a esto, es considerada una especie muy agresiva para otros ecosistemas por la desecación que ocasiona (Huber, 2010).

Esta especie es considerada resistente al fuego, lo que favorece su expansión, pero a su vez causan preocupación por la rapidez con la que se propagan sus llamas, las cuales en algunas ocasiones han sobrepasado los 300 m de altura (Huber, 2010).

6.4.5 ACACIA DEALBATA

Acacia dealbata es una especie arbórea que pertenece a la familia Fabaceae. Dentro del género *Acacia* se ubica la especie *Acacia dealbata*, más conocida como Aromo. Esta especie es exótica/introducida de origen australiana bajo regiones de clima tipo mediterráneo. *A. dealbata* es una especie arbórea perenne de crecimiento rápido que alcanza hasta 40 m de altura. Las hojas son de formas compuestas pinnadas con 25 y 40 pares de folíolos de forma linear de textura fina y pueden llegar a tener 10 cm de longitud y son de color verde con tonos plateados (Heinrich, 1822) (figura 12).



Figura 12: Hoja y árbol de *A. dealbata*.

Se ha observado que es una especie poco exigente, tolerante a diferentes tipos de suelo y capaz de reducir la biodiversidad en el bosque cambiando las condiciones de suelo, principalmente debido a su capacidad de fijar nitrógeno y por su facilidad de brotar a pesar de las circunstancias adversas como los IF (Fuentes *et al.*, 2010). *A. dealbata* ha sido reportado en varios lugares del mundo como especie invasora (Sudáfrica, Chile, India, Portugal, Italia, Francia y España, etc.) (Fuentes *et al.*, 2010), dado que presenta un crecimiento rápido, colonizando rápidamente nuevas áreas. Su capacidad de rebrotar tras los IF, también le da su característica de poder invasivo, dada su capacidad de regenerarse a partir de la cepa, puesto que forma un banco de semillas permanente resultando favorecido en colonizar suelos desnudos (Fuentes *et al.*, 2010).

6.4.6 RESUMEN DE LAS ESPECIES NATIVAS Y EXÓTICAS.

Tabla 1. Descripción botánica de especies nativas y exóticas.

Especie	<i>Q. saponaria</i>	<i>C. alba</i>	<i>P. radiata</i>	<i>E. globulus</i>	<i>A. dealbata</i>
Taxonomía					
Reino	Plantae	Plantae	Plantae	Plantae	Plantae
División	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Pinophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida	Magnoliopsida	Pinopsida	Magnoliopsida	Magnoliopsida
Orden	Rosales	Lurales	Pinales	Myrtales	Fabales
Familia	Rosaceae	Lauraceae	Pinaceae	Myrtaceae	Fabaceae
Género	Quillaja	Cryptocarya	Pinus	Eucalyptus	Acacia
Especie	<i>Q. saponaria</i> <i>Molina</i>	<i>C. alba</i> <i>Molina</i> <i>Looser</i>	<i>P. radiata</i>	<i>E. globulus</i>	<i>A. dealbata</i>

Inventario nacional de especies de Chile. (MMA, 2019).

Tabla 2. Características físicas de las hojas de las especies nativas y exóticas.

Especie	Tipo hoja	Forma hoja	Color hoja	L (mm)	A (mm)	E (mm)
<i>Q. saponaria</i>	Simple	Alternas, coriáceas, elípticas	Verde lustroso claro	20-50	10-30	0,7
<i>C. alba</i>	Simple	Alternas, coriáceas	Cara sup. verde y la inf. verde- azulada	10-50	10-50	0,27
<i>P. radiata</i>	Compuesta	Acículas fasciculadas en grupos de tres, rígidas	Verde oscuro brillante	40-150	1,2-1,7	0,4
<i>E. globulus</i>	Simple	Falcate	Verde grisáceo	100- 150	20-40	0,22- 0,4
<i>A. dealbata</i>	Compuesta	Peccioladas, bipinnadas, con 20-50 pares de folíolos	Verde azulado	20-50	0,4-0,7	-

L = Largo milímetros (mm), A = Ancho (mm), E = Espesor (mm).

Inventario nacional de especies de Chile. (MMA, 2019).



7 OBJETIVO GENERAL

Determinación de terpenos, contenido de humedad e inflamabilidad de las hojas de especies nativas (*Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba*) y exóticas (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Acacia dealbata*) recolectadas durante la época de verano 2019 en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Valparaíso.

7.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

6.1.1 Determinación del grado de inflamabilidad de las hojas de especies exóticas/nativas seleccionadas usando el instrumento epirradiador, considerando la ignitabilidad y sostenibilidad.

6.1.2 Caracterización química (aceites esenciales y contenido de humedad) de las hojas de especies exóticas/nativas seleccionadas.

6.1.3. Determinación de terpenos (monoterpenos y sesquiterpenos) contenidos en las hojas de especies exóticas/nativas, usando extracción Soxhlet y análisis por Cromatografía Gaseosa acoplada a Espectrometría de Masas.

6.1.3 Estudiar el efecto de los terpenos y contenido de humedad sobre la inflamabilidad utilizando análisis de varianza ANOVA.

8 PARTE EXPERIMENTAL

8.1 ESTUDIO DEL ÁREA.

Para la investigación desarrollada, se escogió la RNLP como caso de estudio principalmente por estar ubicada dentro de una zona de riesgo de IF, donde han sido afectadas especies nativas y exóticas, la cual se espera aportar con información acerca de las especies forestales que se encuentran cerca de zonas urbanas y que puedan afectar a la salud de la población en caso de un IF. Adicionalmente, la RNLP al ser un lugar protegido, existe una menor alteración en su vegetación, obteniendo un lugar establecido para la toma de muestra de hojas forestales y facilitando el seguimiento de estas especies escogidas para posteriores análisis.

La RNLP está ubicada en Chile, región de Valparaíso, provincia y comuna de Valparaíso, la cual se extiende entre los 32° 02' y 33° 57' latitud sur, y desde los 70° 00' longitud oeste hasta el océano Pacífico (figura 13). Está protegida dentro del Sistema Nacional de áreas Silvestres del estado, debido a que posee una alta diversidad biológica y ecosistémica, creada mediante decreto ley n°859 en 1952 (CONAF, 2018). Se sitúa en una cuenca cerrada y altitudes que van desde los 337 msnm en el espejo de agua, hasta los 613 msnm del cerro Mutilemu. Cuenta con alrededor de 9.260 ha de superficie y se distribuye en 3.518 ha de bosque nativo, 2.412 ha de plantaciones, 3.313 ha de pastizales y espejo de agua y con 17 ha de uso especial. En la tabla 3 se muestra en mayor detalle la distribución de las especies exóticas y nativas de la RNLP (Hauenstein, 2009; CONAF, 2018).

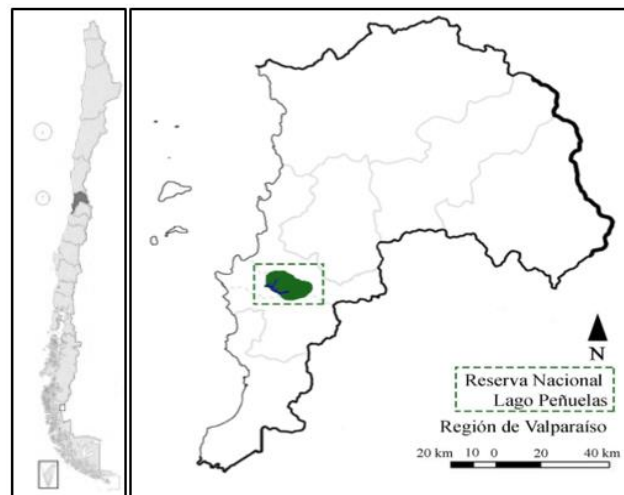


Figura 13: Estudio del área: Reserva Nacional Lago Peñuelas. (Guerrero et al., 2019)

Tabla 3. Distribución de especies nativas y exóticas en superficie de la RNLP.

Especie	Superficie ha	Especie	Superficie ha
<i>E. globulus</i>	1.712,2	<i>P. pinea</i>	1,9
<i>P. radiata</i>	499,9	<i>C. macrocarpa</i>	2,6
<i>A. dealbata</i>	79,3	<i>E. cladocalyx</i>	3,3
Mix. <i>E. globulus</i> – <i>P. radiata</i>	32,5	<i>P. (pinea, radiata y canariensis)</i>	1,2
<i>Q. saponaria</i>	28,7	Quebracho	3,0
Mix. <i>P. radiata</i> - <i>C. macrocarpa</i>	25,1	Roble de Santiago	0,03
Mezcla sps nativas esclerófilas	17,1	<i>P. canariensis</i>	0,1
<i>A. melanoxylon</i> - <i>A. dealbata</i>	4,8	<i>Q. suber</i>	0,1

La RNLP presenta un clima mediterráneo propia de la zona central de Chile caracterizado por periodos de lluvias intensas durante el invierno y una estación seca bien marcada durante el verano (Köppen, 1931). El clima descrito condiciona que la vegetación sea del tipo esclerófila, es decir, sus árboles y arbustos son de hoja perenne, hojas duras y resistentes capaces de controlar la pérdida de agua en periodos de sequía (Hauenstein, 2009).

El muestreo de material vegetal fue realizado el 20 de marzo del 2019, donde las condiciones meteorológicas del mes se muestran en las figuras 14, 15 y 16 y fueron: temperatura mensual promedio de 15 °C, 67% de humedad relativa y agua caída mensual de 0,00003 mm (Dirección Meteorológica de Chile, estación Rodelillo).

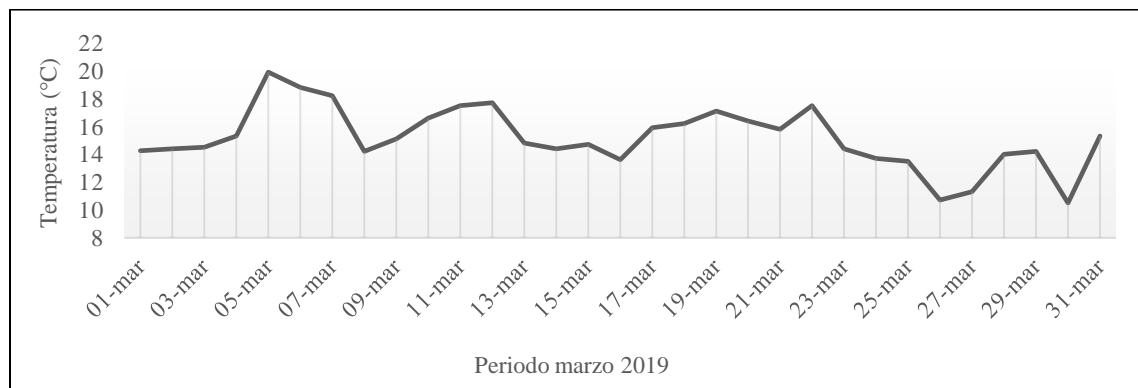


Figura 14: Temperatura mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.

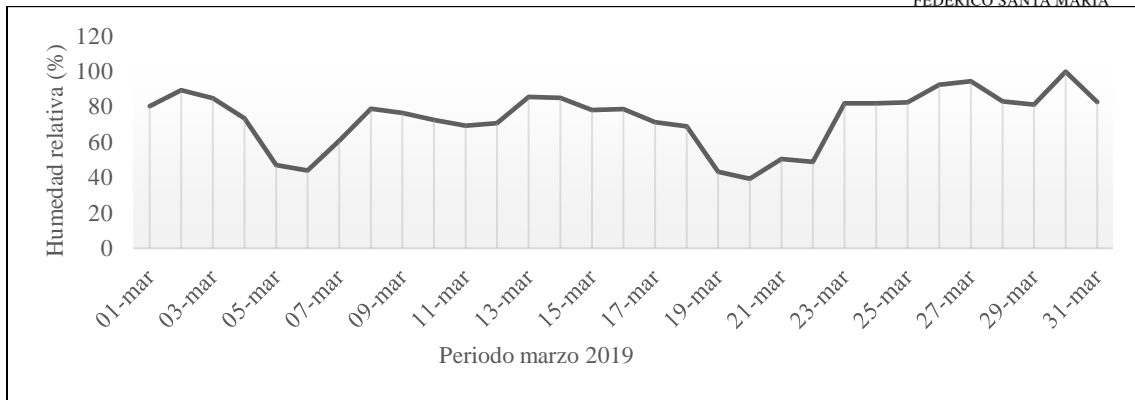


Figura 15: % Humedad relativa mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.

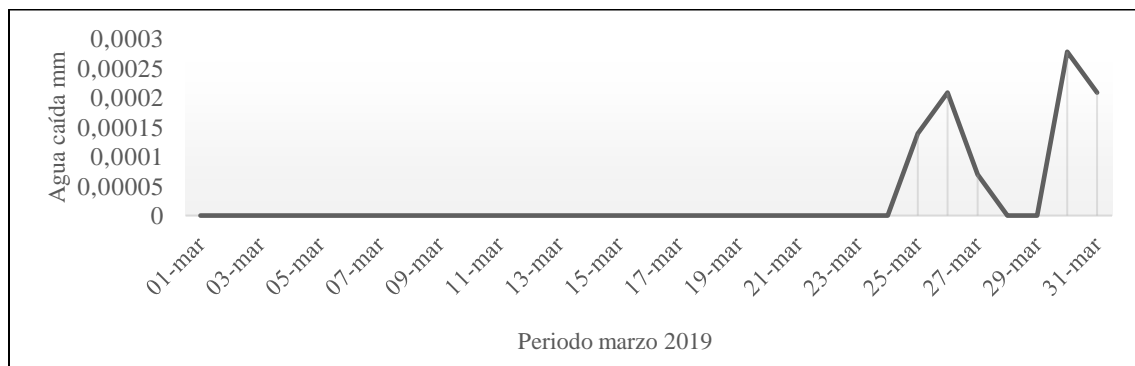


Figura 16: Agua caída mes de marzo 2019, estación Rodelillo, Valparaíso.

8.2 RECOLECCIÓN DE HOJAS.

La recolección de la muestra vegetal se realizó en la RNLP, guardando la localización por GPS de cada especie a analizar: *Q. saponaria*, *C. alba*, *P. radiata*, *E. globulus* y *A. dealbata* y se registraron las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa (Tabla 4).

Para la elección de los árboles se observó que estuvieran en buenas condiciones, sin ataques biológicos o enfermos, con 10 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho de 1,3 m) para contar con la altura suficiente de tal manera que la copa estuviera expuesta al sol. La muestra vegetal solo comprende hojas vivas extraídas directamente de la especie arbórea, para esto, fue necesario extraer ramas de cada sección del árbol: una de la parte más alta de la copa (rama expuesta al sol), una rama del centro de la copa (sol/sombra) y una rama de la parte más baja de la copa (sombra) con el propósito de obtener una muestra compuesta de cada especie (figura 17.A) (Patiño, 2015). Las hojas recolectadas fueron contabilizadas tomando en cuenta si eran hojas simples o compuestas (figura 17.B y 17.C) y fueron almacenadas en bolsas plásticas aireadas para evitar por la misma transpiración de las hojas, que se humedezcan. Cada bolsa fue etiquetada por nombre de la especie, sección y fecha

de recolección. Para mantener frescas las hojas se almacenaron en un contenedor con gel refrigerante antes de que llegasen al laboratorio para su posterior análisis. Se observó que almacenar trozos de ramas intactas con hojas ayuda positivamente a la preservación natural de la hoja.

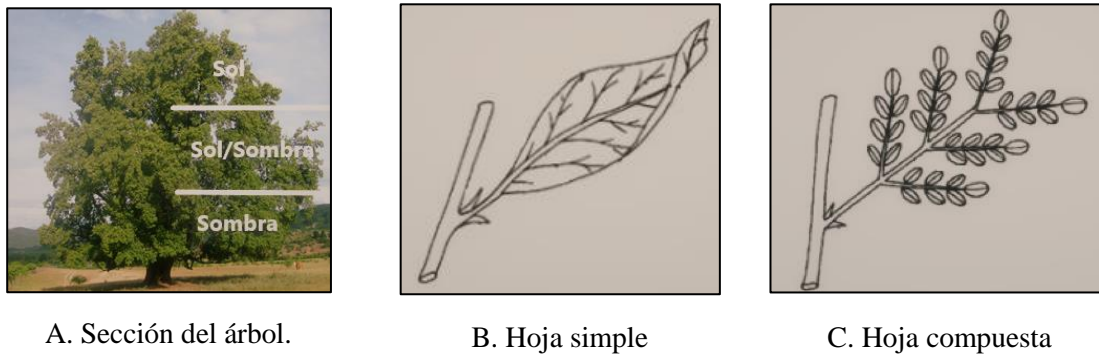


Figura 17: Determinación de la especie arbórea. (Patiño, 2005).

Tabla 4. Condiciones ambientales campaña verano 2019.

hh:mm	T equipo (°C)	T sonda (°C)	HR (%)
11:48	22,5	21,4	37
11:59	22,5	21,8	37
12:36	25,9	23,1	32
12:52	24,4	23,8	32
13:15	25,8	23,2	30
13:40	26,8	24,5	10

*La fecha de recolección se realizó el 20 de marzo de 2019, entre las 11:48 h y 13:40 h.





Figura 18: Recolección de hojas vegetales en la RNL (20.03.2019).

8.3 DETERMINACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD.

Los experimentos de inflamabilidad se llevaron a cabo en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Para evaluar la inflamabilidad de las hojas de las especies seleccionadas, se adaptó el procedimiento desarrollado por diferentes investigadores (Valette, 1990; Petriccione, 2006; Alessio *et al.*, 2008; Ormeño *et al.*, 2009; Frejaville *et al.*, 2013; Rocca *et al.* 2015 y Blackhall y Raffaele, 2019) que consistió en someter 50 muestras sucesivas de hojas, (cada muestra de 1 gramo (g) \pm 0,1g), de cada especie forestal, bajo la acción constante de un foco calorímetro a 500 Watts (W) denominado epirradiator (tipo 534 RC2, Quartz Alliance, Francia) (figura 19) a una temperatura aproximada de 350 °C, colocando directamente la muestra vegetal sobre la superficie radiante. Se complementó con una llama piloto a una altura de 4 cm sobre la superficie del epirradiator, con el fin de originar la inflamación de la

mezcla de compuestos volátiles de origen orgánico que se volatilizan durante el proceso de calentamiento de la muestra vegetal. Al momento de encender el equipo se esperó alrededor de 5 minutos (min) para su estabilización en la temperatura.

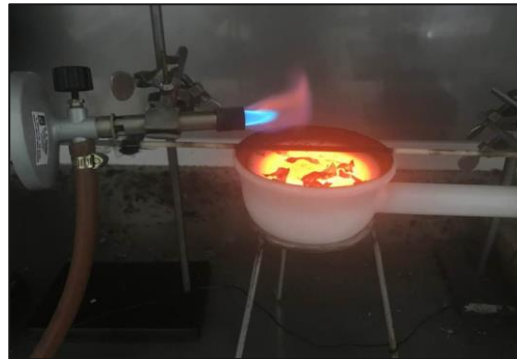


Figura 19: Hojas de combustible forestal bajo la acción del epirradiator. Laboratorio de Termodinámica UTFSM 2019.

La metodología aplicada inicialmente propuesta por Valette (1990), describen:

Tiempo de ignición (T_i): como el tiempo transcurrido desde el instante de contacto entre la muestra vegetal y el epirradiator hasta que se produjo la ignición de la materia, expresado en segundos. En el caso de varias inflamaciones sucesivas, si el tiempo de duración de la primera llama era igual o superior a 10 s, se tomó como el tiempo de inflamación. En caso contrario, si la duración de la primera llama era menor a 10 s, se tomó en consideración el medido al producirse la segunda inflamación, es decir, se desprecia la primera inflamación.

La Frecuencia de ignición (F_i): de los 50 ensayos realizados por especie se consideraron positivos los que producían ignición antes de 1 min. Esto permitió clasificar el grado de inflamabilidad.

Tiempo de llama (D_{II}): tiempo que dura la llama una vez encendida hasta su total desaparición, expresado en segundos.

Grado de inflamabilidad (G_i): es un índice numérico que varía de 0 a 5, indicando el grado de inflamabilidad de una especie vegetal, (Tabla 5 y 6) desarrollado por Valette 1990.

Tabla 5. Grado de inflamabilidad según tiempo de ignición y frecuencia de ignición. (Valette 1990).

Tiempo de inflamación (s)	Frecuencia de ignición (% de ensayos positivos)				
	100 - 95	94 - 90	89 - 85	84 - 80	Menor de 50
Menor de 12,5	5	4	3	3	1
12,5 - 17,5	4	3	3	2	1
17,5 - 22,5	3	3	2	2	0
22,5 - 27,5	3	2	2	1	0
27,5 - 32,5	3	2	2	1	0
Más de 32,5	3	1	2	0	0

Tabla 6. Clasificación de inflamabilidad en base al grado de inflamabilidad (Valette, 1990).

Inflamabilidad	Criterio
0	Inflamabilidad nula
1	Poco inflamable
2	Moderadamente inflamable
3	Inflamable
4	Altamente inflamable
5	Extremadamente inflamable

8.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

La determinación del contenido de humedad de las hojas de las especies forestales se realizó en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. El procedimiento aplicado para medir contenido de humedad de la muestra vegetal se adaptó al desarrollado por diferentes investigadores (Pellizaro, 2007; Alessio *et al.*, 2008; Ormeño *et al.*, 2009 y Murray *et al.*, 2013). Para esto, se trituraron en duplicado 10 g de hojas para cada especie y depositadas en placas Petri para luego colocarlas dentro de la estufa a una temperatura de 105°C durante 12 horas consecutivas (figura 20). Una vez transcurrido el tiempo en la estufa se procede a pesar inmediatamente el material seco para impedir la absorción de humedad en las hojas. Se calculó la humedad del material vegetal, representado en porcentaje, definido como el peso del agua en función del peso seco, según la ecuación 1 (Country, 1979; Behm *et al.* 2004).

$$\% \text{ PS} = \frac{P_H - P_S}{P_S} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Ps: Porcentaje peso seco de las hojas vegetales (%), PH: Peso total hojas forestales vegetales (g), Ps: Peso seco de las hojas vegetales (g).



Figura 20: Determinación del contenido de humedad de las hojas de las especies forestales. Laboratorio de termodinámica UTFSM.



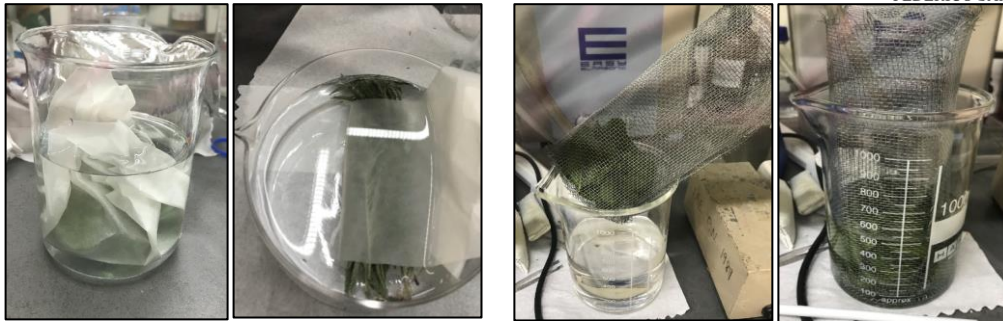
8.5 ETAPAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE TERPENOS.

Las hojas de las especies forestales seleccionadas fueron sometidas a diferentes etapas analíticas. La primera parte de etapas fueron: extracción cera cuticular, extracción soxhlet, extracción líquido-líquido, cromatografía en placa fina (desarrollado en el Laboratorio de Recursos Naturales del Departamento de Química de la UTFSM). La segunda parte consistió en realizar el análisis por cromatografía de gases espectrometría de masas (GC/MS) (desarrollado en el Laboratorio de Química Orgánica del Instituto de Química de la PUCV). Los procedimientos se detallan a continuación.

8.5.1 EXTRACCIÓN CERA CUTICULAR.

Físicamente, la cutícula se ubica sobre la pared celular compuesta por una capa superior de ceras epicuticulares, seguida por otra capa inferior formada por cutina, ceras intracelulares y sustancias de la pared celular (Heredia y guerrero, 2011). La cutina principalmente está constituida por ácidos grasos de cadena media (hexadecanoico, octadecanoico y docosanoico entre otros), formando enlaces tipo éster entre sí (Koch, 2008 y Madeiros, 2017). Mientras que las ceras son mezclas de compuestos alifáticos de cadena larga, generalmente con 19 o más átomos de carbono (nonacosano, hentriacontano y tritriacontano entre otros) asociados a ésteres, alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos grasos (Leide y Hildebrandt, 2011; Figueiredo 2012), particularmente, las ceras epicuticulares se caracterizan por ser de naturaleza hidrofóbica y baja reactividad.

Se realizó la extracción de las ceras cuticulares vegetales con el fin de extraer compuestos muy pesados, en general, compuestos de cadena larga como por ejemplo grasas que forman precipitados dificultando el correcto análisis de compuestos orgánicos volátiles en el equipo de GC/MS. Para la elección de los solventes y tiempo de extracción, se utilizó un procedimiento optimizado por los investigadores Figueiredo (2012) y Madeiros (2017), que estudiaron la proporción de diferentes solventes y tiempo de extracción necesario para la obtención de los compuestos de las ceras vegetales. La primera etapa consistió en sumergir las hojas intactas sin triturar en agua destilada durante 30 segundos (s) 3 veces para eliminar suciedad externa a la hoja (figura 21.A), luego fueron secadas cuidadosamente con ayuda de papel absorbente. La segunda etapa consistió ahora con ayuda de una rejilla de acero galvanizado, en sumergir las hojas en una solución afín para la extracción de ceras cuticulares: una solución apolar de hexano/diclorometano (DCM) 9:1, utilizando 450 mL y 50 mL respectivamente, esto se realizó durante 30 s 3 veces consecutivas (figura 21.B) (Medeiros, 2017 y Figueiredo, 2012). Se almacenó la solución para su posterior cuantificación.



A. Hojas vegetales en agua destilada

B. Hojas vegetales en solución hexano/DCM 9:1.

Figura 21: Extracción cera cuticular.

8.5.2 EXTRACCIÓN SOXHLET

Se pesaron 17,55 g, 17,30g, 17,17g, 17,16 g y 17,92 g de hojas correspondientes a *E. globulus*, *P. radiata*, *A. dealbata*, *Q. saponaria* y *C. alba*, respectivamente. Las hojas fueron trituradas en una procesadora, para luego colocarla en un cartucho de material poroso, en este caso papel filtro, que se situó en la cámara del extractor soxhlet (figura 22). Se calentó 80 mL de disolvente extractante ciclohexano situado en el balón de 500 mL a una temperatura de 80 °C durante 4 horas. Una vez alcanzado el tiempo de extracción, la solución de extracto se dejó enfriar a temperatura ambiente y para eliminar el solvente se concentró a sequedad utilizando un evaporador rotatorio. El procedimiento descrito se adaptó a los desarrollados por los investigadores (Concha, 2004; Ormeño *et al.*, 2011; y Wu *et al.*, 2015).

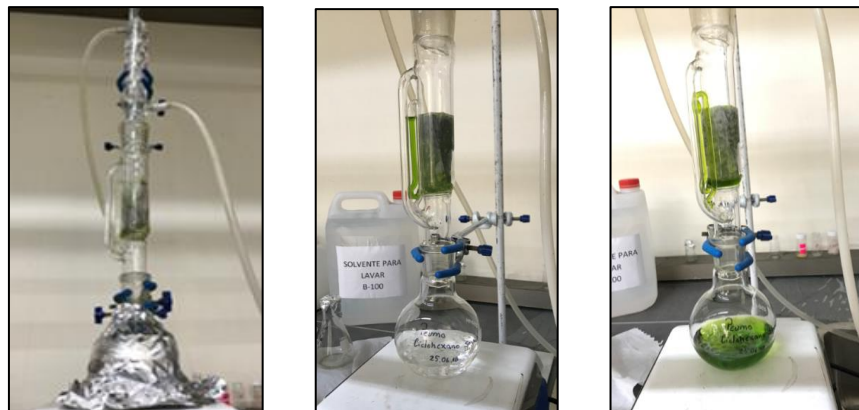


Figura 22: Extracción de compuestos químicos de la muestra vegetal bajo el método soxhlet.

8.5.3 EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO.

El concentrado resultante de la extracción soxhlet fue llevado a un embudo de decantación y se adicionaron 80 mL metanol y 50 mL ciclohexano. La elección de los solventes se realizó en base a la diferencia entre sus constantes dieléctricas, 33,0 para el metanol y 2,0 para el ciclohexano, medida

que nos indicó que tan inmiscibles son los solventes entre sí. De esta manera, se logró separar los compuestos polares y no polares de la muestra vegetal. El metanol por ser más denso se fue al fondo del embudo arrastrando los componentes polares, mientras que el ciclohexano subió con los compuestos apolares (figura 23). Para todas las especies, se formó una película de emulsión entre la fase polar y la fase apolar, esta emulsión se extrae aparte de las demás fases para luego ser cuantificada. Se repitió el procedimiento 2 veces más modificando los volúmenes de los solventes. Extracción 2 y 3: 50 mL metanol y 30 mL ciclohexano. Finalmente, de esta extracción se obtienen dos extractos para cada especie, uno con los compuestos polares y otro con los apolares.

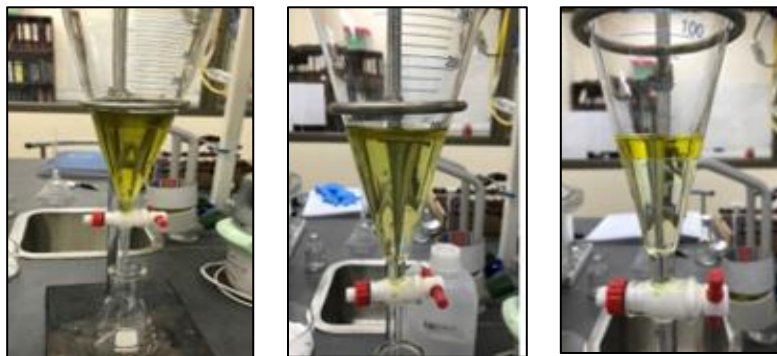


Figura 23: Extracción líquido-líquido de la muestra vegetal.

8.5.4 CROMATOGRAFÍA EN PLACA FINA.

Se aplicó cromatografía en placa fina con el fin de determinar la efectiva separación de los extractos, comparando la fase polar y apolar. La fase estacionaria utilizada es gel de sílice de carácter polar, inerte con las sustancias a analizar. Para la fase móvil se utilizó dos tipos de solventes, hexano y acetato de etilo (AcoEt), variando su composición en 100% hexano, 70% hexano / 30% AcoEt, 50% Hexano / 50% AcoEt y finalmente 100% ACoEt (ver anexo A).

8.5.5 RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN MASA-MASA.

Se concentró cada extracto de la fase polar y apolar en el rotavapor para la evaporación total de los solventes con el propósito de obtener la masa final de cada extracción.

El rendimiento de la extracción se determinó mediante la ecuación 2.

$$Y(m/m) = \frac{E}{MP} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Y: Rendimiento de la extracción (% m/m); E: Extracto obtenido (g); MP: Masa inicial de hojas (g).

8.5.6 ANÁLISIS DE TERPENOS POR GC/MS.

Previo al análisis de las muestras, se procede a filtrar los extractos al vacío con papel filtro y celita (material inerte), con el fin de separar los precipitados formados que puedan entorpecer el correcto uso del equipo GC/MS (figura 24).



Figura 24: Filtración al vacío de los extractos vegetales.

Para el análisis de los extractos, se utilizó el equipo SHIMADZU GC/MS QP2010 Ultra utilizando una columna capilar de sílice fundido RTX-5MS no polar (30 m x 0,32 mm de diámetro interno, espesor de 0,25 μm , Restek) y con un flujo de 1 mLmin^{-1} . La programación de la temperatura de la columna en el horno se realizó con un valor inicial de 50°C en 5 min, luego, aumentó hasta 300°C en 30 min. El tiempo total de programación es de 60 min. La inyección se efectuó en modalidad Split a 250°C (Vera *et al.*, 2016). El espectrómetro de masas operó en modalidad full scan. Para la identificación de los compuestos volátiles se realizó a partir de su espectro de masas con el software GC/MS postrun análisis librería NIST en conjunto con el cálculo de índice de retención (RI) en base a patrones de una mezcla estándar de n-alcamos ($\text{C}_8\text{-C}_{33}$), utilizando la ecuación 3 de Van den Dool y Kratz (1963):

$$\text{RI} = \frac{R_t(x) - R_t(n)}{R_t(n+1) - R_t(n)} * 100 + n * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

$R_t(x)$: Tiempo de retención del compuesto a analizar; $R_t(n)$: Tiempo de retención del alcano anterior conocido; n: N° de carbonos del alcano anterior.

8.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

Los resultados se expresan como la media \pm intervalo de confianza al 95% agregando el coeficiente de variación. Para las pruebas de inflamabilidad que contaban con 50 ensayos, se analizaron con la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. Por otro lado, las variables que contaban con 2 ensayos como la humedad se utilizó el método Kruskal-Wallis que utiliza la mediana para detectar



diferencias significativas. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para detectar diferencias estadísticas significativas entre una misma variable y la prueba de rangos múltiples para relacionar diferencias estadísticas entre cada combinación par de especies. Para relacionar entre variables diferentes se utilizó análisis de varianza (ANOVA) asociados al coeficiente de correlación de Pearson y Spearman (r) junto con el valor P. Todas las pruebas estadísticas se realizaron utilizando el programa STATGRAPHIC Centurion XV.

9 RESULTADOS

9.1 TIEMPO DE IGNICIÓN.

La variable tiempo de ignición según la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov resultó ajustarse adecuadamente a una distribución normal con un intervalo de confianza al 95% para las 5 especies analizadas de $n=50$ cada una. Los valores P obtenidos fueron: *Q. saponaria* ($P = 0,593$); *C. alba* ($P = 0,050$); *P. radiata* ($P = 0,998$); *E. globulus* ($P = 0,917$) y para *A. dealbata* ($P = 0,593$) (ver anexo B).

En la figura 25, se muestran los tiempos de ignición, donde *E. globulus* obtuvo el menor T_i ($3,98 \pm 0,21$ s), seguido de *C. alba* ($T_i = 6,85 \pm 0,33$ s), *A. dealbata* ($T_i = 9,64 \pm 0,65$ s), *P. radiata* ($T_i = 19,64 \pm 0,87$ s), y *Q. saponaria* ($T_i = 20,99 \pm 1,73$ s). Los coeficientes de variación obtenidos para *Q. saponaria*, *C. alba*, *P. radiata*, *E. globulus* y para *A. dealbata* fueron de 16,98%, 16,99%, 15,51%, 18,58% y 23,40% respectivamente.

Utilizando el método ANOVA, las diferencias entre las medias de la variable tiempo de ignición resultaron estadísticamente significativas dado que se obtuvo un valor P menor a 0,05 ($P = 0,00$), con un nivel de confianza al 95%. Adicionalmente, se realizó la prueba de rangos múltiples obteniéndose diferencias estadísticas significativas entre cada combinación par de especies, con un nivel de confianza al 95%. La mayor diferencia estadística significativa la registró el par *E. globulus* - *Q. saponaria* con una diferencia de 17,01 s, mientras que la menor la obtuvo el par *P. radiata* - *Q. saponaria* con 1,35s.

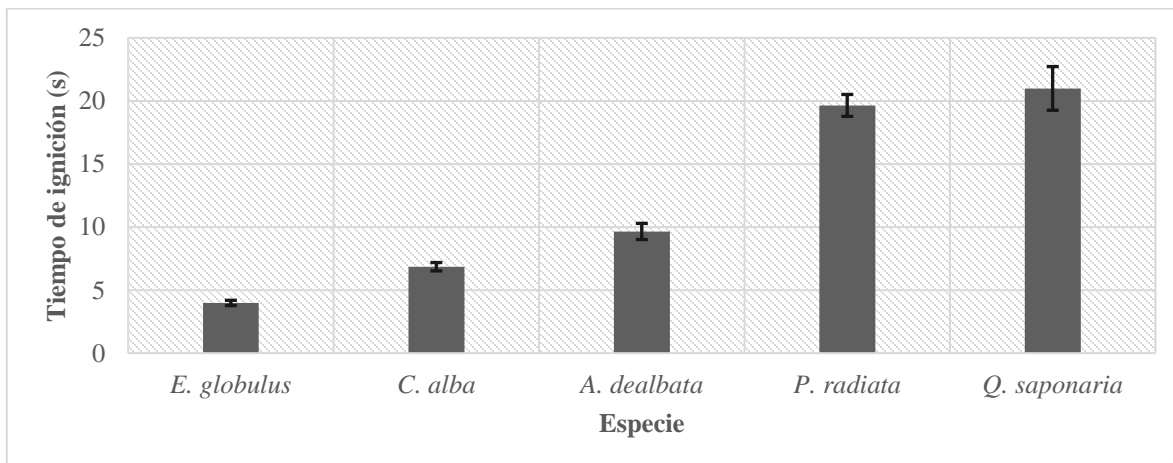


Figura 25: Gráfico de barras para el parámetro T_i con barras de error a un intervalo de confianza al 95%.

9.2 DURACIÓN DE LA LLAMA.

La variable duración de llama según la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov resultó ajustarse adecuadamente a una distribución normal con un intervalo de confianza al 95% para las 5 especies analizadas de $n=50$ cada una. Los valores P obtenidos fueron: *Q. saponaria* ($P = 0,531$); *C. alba* ($P = 0,609$); *P. radiata* ($P = 0,073$); *E. globulus* ($P = 0,444$) y para *A. dealbata* ($P = 0,660$) (ver anexo C).

En la figura 26, se muestran los tiempos de duración de la llama, donde la especie que registró una mayor Dll fue *A. dealbata* ($Dll = 18,11 \text{ s} \pm 1,73 \text{ s}$), seguido de *Q. saponaria* ($Dll = 11,47 \text{ s} \pm 1,66 \text{ s}$), *P. radiata* ($Dll = 10,10 \text{ s} \pm 1,20 \text{ s}$), *E. globulus* ($Dll = 9,50 \text{ s} \pm 0,74 \text{ s}$) y *C. alba* ($Dll = 8,71 \text{ s} \pm 0,66 \text{ s}$).

Los coeficientes de variación obtenidos para *Q. saponaria*, *C. alba*, *P. radiata*, *E. globulus* y para *A. dealbata* fueron de 50,56%, 26,53%, 42,53%, 27,32% y 33,52% respectivamente.

Se determinó mediante ANOVA que existe diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la variable duración de llama entre las 5 especies analizadas, dado que se obtuvo un valor P menor a 0,05, con un nivel de confianza al 95%. Adicionalmente, se realizó la prueba de rangos múltiples resultando la especie *A. dealbata* la que presentó mayor diferencia estadística significativa entre sus pares: *A. dealbata* - *C. alba* (Dif. = 9,41 s), *A. dealbata* - *E. globulus* (Dif. = 8,62 s), *A. dealbata* - *P. radiata* (8,02 s), *A. dealbata* - *Q. saponaria* (Dif. = 6,65 s). *Q. saponaria* también presentó diferencias estadísticas significativas con dos especies: *Q. saponaria* - *C. alba* (Dif = 2,76 s) y *Q. saponaria* - *E. globulus* (Dif = 1,97 s).

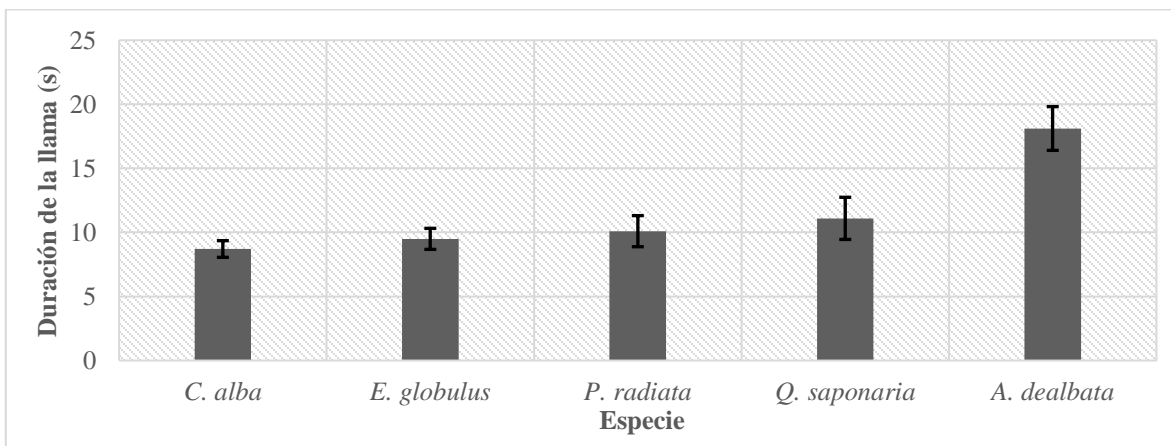


Figura 26: Gráfico de barras para el parámetro Dll y con barras de error a un intervalo de confianza al 95%.

9.3 GRADO DE INFLAMABILIDAD.

Según la tabla de Valette (1990), las especies se clasificaron con un grado de inflamabilidad de acuerdo con el valor medio del tiempo de ignición y la frecuencia de ignición. Todas las especies analizadas (*Q. saponaria*, *C. alba*, *P. radiata*, *E. globulus* y *A. dealbata*) obtuvieron una frecuencia de ignición de 100%. Las especies *C. alba*, *E. globulus* y *A. dealbata* registraron un grado de inflamabilidad ($G_i = 5$), catalogándolas como especies extremadamente inflamables, mientras que las especies *Q. saponaria* y *P. radiata* obtuvieron un grado de inflamabilidad ($G_i = 3$), clasificándolas como especies inflamables (tabla 7).

Tabla 7. Clasificación del grado de inflamabilidad de acuerdo con el valor medio del tiempo de ignición y frecuencia de ignición.

Especie	Media \pm Intervalo confianza 95% s	Fi%	G_i	Clasificación
<i>E. globulus</i>	3,98 \pm 0,74	100	5	Extremadamente inflamable
<i>C. alba</i>	6,85 \pm 1,16	100	5	Extremadamente inflamable
<i>A. dealbata</i>	9,65 \pm 2,26	100	5	Extremadamente inflamable
<i>P. radiata</i>	19,64 \pm 3,05	100	3	Inflamable
<i>Q. saponaria</i>	20,99 \pm 6,09	100	3	Inflamable

9.4 HUMEDAD DE LAS HOJAS EXÓTICAS Y NATIVAS

El mayor contenido de humedad (CH) la registró la especie *A. dealbata* con (CH = 126,91% \pm 7,71%), seguido de *E. globulus* (CH = 122,23% \pm 9,86%), *Q. saponaria* (CH = 112,66% \pm 0,69%), *P. radiata* (81,14% \pm 36,31%), y *C. alba* con (CH = 71,73% \pm 19,65%) (figura 27).

Los coeficientes de variación para las especies analizadas *A. dealbata*, *E. globulus*, *Q. saponaria*, *P. radiata* y *C. alba* fueron de: 1,11 %, 1,16 %, 0,00 %, 5,24 % y 3,00 % respectivamente.

Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, como la alternativa no paramétrica al método ANOVA, el valor P obtenido resultó de (P = 0,00), dado que el valor P es menor 0,05, existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias del CH de las 5 especies, con un nivel de confianza al 95%. Adicionalmente, se realizó la prueba de rangos múltiples, resultando diferencias estadísticas significativas para la mayoría de las combinaciones par entre especies. La mayor diferencia estadística significativa la obtuvieron las especies *A. dealbata* – *C. alba*, *E. globulus* – *C. alba*, *A. dealbata* – *P. radiata*, *C. alba* – *Q. saponaria* y *E. globulus* – *P. radiata* con valores de 56,50%, 51,50%, 46,00%, 42,50 % y 41,00 % respectivamente.

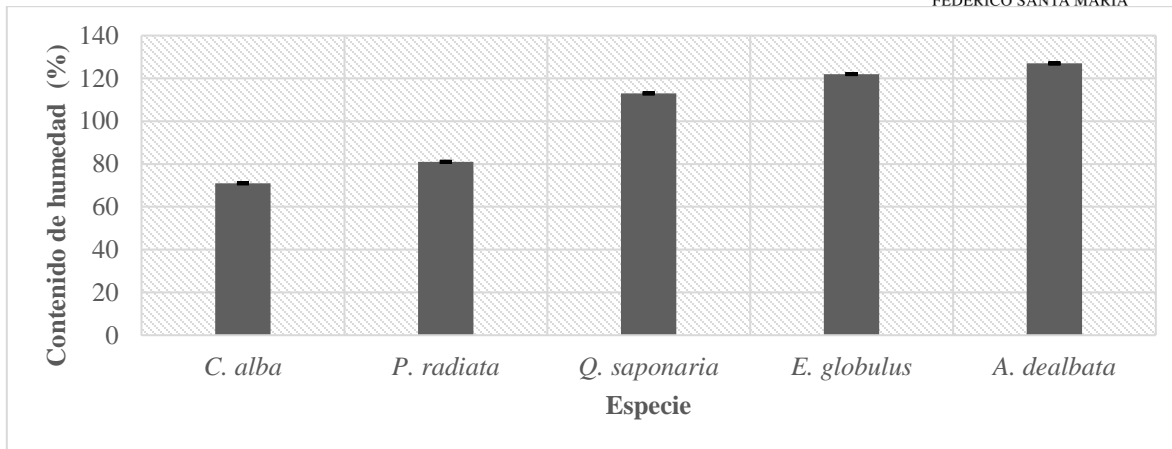


Figura 27: Gráfico de barras para el contenido de humedad y con barras de error a un intervalo de confianza al 95%.

9.5 TERPENOS Y OTROS COMPUESTOS ORGÁNICOS CONTENIDOS EN LAS HOJAS.

Los aceites esenciales (AE) son mezclas complejas de líquidos que presentan alta volatilidad, evaporándose al contacto con el aire y caracterizadas por ser sustancias aromáticas (Bello, 1999). Son obtenidos a partir de diferentes partes de las plantas como flores, yemas, semillas, hojas, ramas, corteza, madera, frutos y raíces, se producen en los pelos glandulares o tricomas de la epidermis y se almacenan en los canales secretores (Burt, 2007). Los AE prácticamente están presentes en todas las plantas y en general, químicamente están formados por terpenos, ácidos, ésteres, cetonas, acetona fenoles e hidrocarburos y hasta sustancias azufradas y nitrogenadas (Acevedo *et al.*, 2007). Se consideran producto del metabolismo secundario de las plantas al igual que algunos alcaloides, flavonoides, taninos, y saponinas (Bandoni *et al.*, 2009; Madsen y Bertelsen, 1995). La composición química de los AE puede verse afectada por el medio ambiente, la procedencia de la planta y el método de extracción (Combariza *et al.*, 1994). Cuando se utilizan solventes orgánicos para la extracción de AE, estos solventes solubilizan la esencia, pero también solubilizan y extraen otras sustancias tales como grasas y ceras, obteniéndose un AE impuro (Peredo *et al.*, 2009).

Para el presente trabajo, se obtuvieron las concentraciones de AE de las hojas para cada especie vegetal analizada expresado en porcentaje masa/masa y fueron: *E. globulus* (AE = 6,71%), *P. radiata* (AE = 5,01%) y *C. alba* (AE = 4,80%), *A. dealbata* (AE = 1,99%) y *Q. saponaria* (AE = 0,58%).

Del AE resultante, se obtuvieron 4 fracciones (separadas durante la extracción líquido-líquido): fracción de metanol (FM), fracción de ciclohexano (FCH), fracción de cera (FC) y fracción de emulsión (FE). Estas fracciones resultantes fueron para: *E. globulus* (FM = 6,35%, FCH = 0,24%, FC = 0,11% y FE = 0,01%), *P. radiata* (FM = 3,98%, FCH = 0,32%, FC = 0,05% y FE = 0,66%), *C.*

alba (FM = 4,23%, FCH = 0,44%, FC = 0,10% y FE = 0,03%), *A. dealbata* (FM = 1,11%, FCH = 0,16%, FC = 0,68% y FE = 0,05%) y *Q. saponaria* (FM = 0,46%, FCH = 0,06%, FC = 0,02% y FE = 0,05%). Las concentraciones se pueden visualizar de manera gráfica en la figura 28.

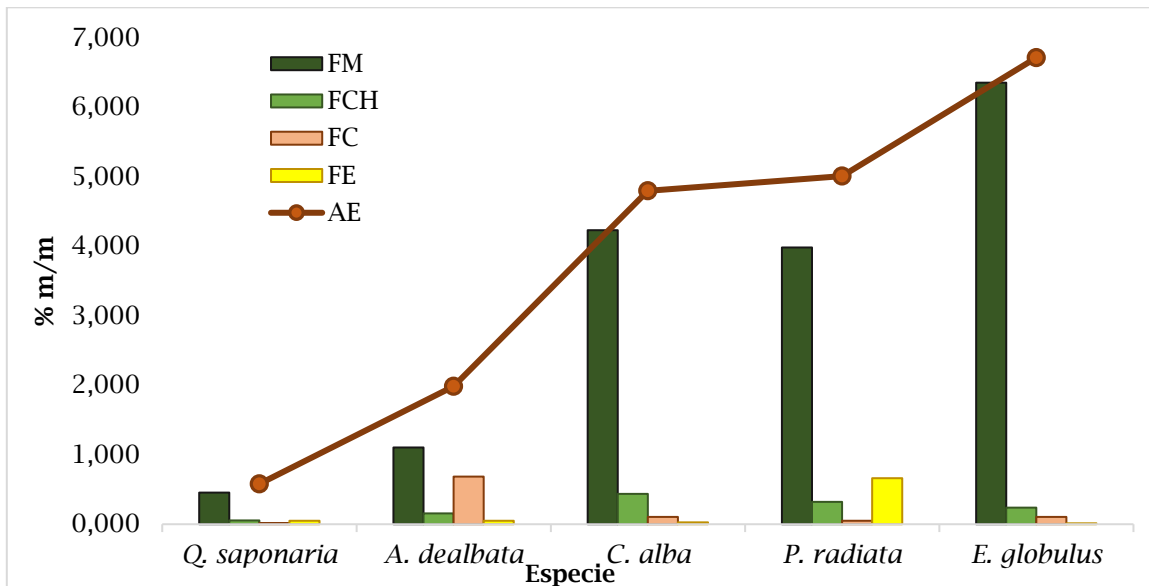


Figura 28: Fracción metanol, ciclohexano, cera, emulsión y aceite total de cada especie.

Se identificaron 6 grupos de compuestos químicos en total para las especies analizadas: sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, hidrocarburos alifáticos, ésteres, cetonas y alcoholes, además se encontraron sesquiterpenos e hidrocarburos que no pudieron ser identificados.

En la tabla 8, se muestra el porcentaje de área relativa (% AR) asociado a cada compuesto químico orgánico identificado en las diferentes especies seleccionada. En la especie *E. globulus* se identificaron 17 compuestos químicos orgánicos volátiles, donde el 87,36%; 9,0% y 3,7% del AR fueron sesquiterpenos, hidrocarburos alifáticos y esterés, respectivamente. Los compuestos mayoritarios fueron: aloaromadendreno (sesquiterpeno, AR = 47,37%), aromadendreno (sesquiterpeno, AR = 19,2%), β -copaene (sesquiterpeno, AR = 5,77%), nonacosano (hidrocarburo alifático, AR = 5,08%), heptacosano (hidrocarburo alifático, AR = 3,9 %) y ácido palmítico, metil éster (éster, AR = 3,67%). En la especie *P. radiata* se identificaron 21 compuestos químicos orgánicos volátiles donde el 57,3%, 17,7% y 12,9 del AR fueron ésteres, sesquiterpenos y un triterpeno no identificado, respectivamente. Los compuestos mayoritarios fueron: ácido láurico metil éster (éster, AR = 27,8%), tetradecanoato de metilo, (éster, AR = 7,11%), (E)- β -cariofileno (sesquiterpeno, AR = 6,34%), ácido palmítico, metil éster (éster, AR = 4,61%), ácido docosanoico, metil éster (éster, AR = 4,44%) y germacreno D (sesquiterpeno, AR = 4,05%). En la especie *A. dealbata* se identificaron 4 compuestos orgánicos volátiles, donde 80,5% y 6,3% del AR fueron hidrocarburos alifáticos y esterés respectivamente. Los compuestos corresponden a: nonacosano (hidrocarburo alifático, AR = 78,4%),



ácido palmítico, metil éster (éster, AR = 4,61%), octano, 4 etil (hidrocarburo alifático, AR = 2,16%) y estereato de metilo (éster, AR = 1,7%). En la especie *C. alba* se identificaron 33 compuestos orgánicos volátiles donde el 35,6%, 20,0%, 12,0% y 7,0% del AR fueron cetona, hidrocarburos alifáticos, ésteres y sesquiterpenos respectivamente. Los compuestos mayoritarios corresponden a: 16-hentriacontanona (cetona, AR = 35,6%), heptacosano (hidrocarburo alifático, AR = 7,32%), linolenato de metilo (éster, AR = 6,0%), ácido palmítico, metil éster (éster, AR = 4,28%), α -bergamoteno (sesquiterpeno, AR = 1,97%) y germacreno D (sesquiterpeno, AR = 1,78%). Finalmente, en la especie *Q. saponaria* se identificaron 17 compuestos orgánicos volátiles donde el 44,9%, 31,7% y 2,1% corresponden a hidrocarburos alifáticos, ésteres y sesquiterpenos. Los compuestos mayoritarios fueron: nonacosano (hidrocarburo alifático, AR = 31,99%), linolenato de metilo (éster AR = 17,79%), ácido palmítico, metil éster (éster, AR = 12,02%) hencosano (hidrocarburo alifático, AR = 7,69%) y aloaromadendreno (sesquiterpeno, AR = 1,65%).

Los cromatogramas con los compuestos químicos identificados para cada especie se encuentran en el anexo D.

Tabla 8. Identificación de compuestos químicos para especies exóticas y nativas verano 2019.

RI	C.Q.	F.M.	P.I. (°C)	P.E. (°C)	P.M. (gmol ⁻¹)	E. nativas		E. exóticas		
						<i>Q. saponaria</i>	<i>C. alba</i>	<i>P. radiata</i>	<i>E. globulus</i>	<i>A. dealbata</i>
						<i>Sesquiterpenos (% área relativa)</i>				
1386	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	0,79	-
1389	α-Ylangeno	C ₁₅ H ₂₄	105,10	248,50	204,35	-	0,16	-	-	-
1403	β-Elemeno	C ₁₅ H ₂₄	98,30	252,10	204,35	-	0,23	-	-	-
1426	α-Gurjuneno	C ₁₅ H ₂₄	101,30	263,90	204,35	-	-	-	2,77	-
1438	(E)-β-Cariofileno	C ₁₅ H ₂₄	104,90	268,40	204,35	-	-	6,34	1,22	-
1445	Patchoulene	C ₁₅ H ₂₄	110,20	262,50	204,35	-	-	-	1,03	-
1446	α-Bergamoteno	C ₁₅ H ₂₄	100,60	259,50	204,35	-	1,97	1,64	-	-
1451	β-Copaene	C ₁₅ H ₂₄	104,90	255,90	204,35	-	-	-	5,77	-
1457	Aromadendreno	C ₁₅ H ₂₄	106,50	258,10	204,35	0,44	-	-	19,26	-
1461	(E)-β-Farneseno	C ₁₅ H ₂₄	109,70	272,50	204,35	-	0,39	-	-	-
1472	(Z)-α-Bisabolene	C ₁₅ H ₂₄	110,50	276,90	204,35	-	0,23	1,12	1,36	-
1480	Aloaromadendreno	C ₁₅ H ₂₄	106,50	258,10	204,35	1,65	0,22	0,70	47,37	-
1491	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,15	0,40	1,27	-
1498	Germacreno D	C ₁₅ H ₂₄	111,90	279,70	204,35	-	1,78	4,05	-	-
1505	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,19	-	1,71	-
1508	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	1,03	-
1513	α-Farneseno	C ₁₅ H ₂₄	113,20	279,60	204,35	-	-	1,45	-	-
1514	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,20	-	-	-
1515	α-Chamigreno	C ₁₅ H ₂₄	107,00	272,70	204,35	-	-	0,96	1,56	-



1517	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,19	-	-	-
1530	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,19	-	1,02	-
1538	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	1,05	-	-
1539	(Z)-calameno	C ₁₅ H ₂₂	125,40	285,00	202,34	-	0,35	-	-	-
1540	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	1,19	-
1618	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,21	-	-	-
1633	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	0,21	-	-	-
2031	ST desconocido	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	-	-
					Total	2,09	6,67	17,71	87,35	-
							Diterpenos (% área relativa)			
2236	Andrographolide	C ₂₀ H ₃₀ O ₅	-	557,30	350,45	-	-	1,26	-	-
3016	DT desconocido	C ₂₀ H _x	-	-	-	-	1,01	-	-	-
							Triterpenos (% área relativa)			
3151	TP desconocido	-	-	-	-	-	-	12,90	-	-
							Hidrocarburos alifáticos (% área relativa)			
958	Octano, 4-etil	C ₉ H ₂₂	36,50	142,40	128,26	-	0,12	0,60	-	2,16
1199	Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	71,10	216,30	170,30	-	0,08	0,52	-	-
1600	Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	135,00	286,60	226,44	0,86	-	-	-	-
1799	Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	165,60	316,30	254,49	1,05	-	-	-	-
2000	Icosano	C ₂₀ H ₄₂	186,50	343,40	282,55	0,61	-	-	-	-
2100	Henicosano	C ₂₁ H ₄₄	198,80	356,10	296,57	7,69	-	-	-	-
2198	Docosano	C ₂₂ H ₄₆	210,90	368,30	310,60	0,35	-	0,40	-	-
2400	Tetracosano	C ₂₄ H ₅₀	234,50	391,10	338,65	0,47	0,43	-	-	-
2498	Pentacosano	C ₂₅ H ₅₂	246,10	401,90	352,68	-	0,31	-	-	-
2597	Hexacosano	C ₂₆ H ₅₄	257,60	412,20	366,71	0,98	0,69	-	-	-
2699	Heptacosano	C ₂₇ H ₅₆	268,90	422,10	380,70	-	7,32	-	3,90	-



2799	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	280,10	431,70	394,76	0,88	1,48	-	-	-
2899	Nonacosano	C ₂₉ H ₅₂	291,20	440,90	408,79	31,99	8,50	-	5,08	78,4
3098	Hentriacontano	C ₃₁ H ₆₄	313,10	458,40	436,84	-	1,28	-	-	-
					Total	44,88	20,21	1,52	8,98	80,56
<i>Esteres (% área relativa)</i>										
1526	Ácido láurico, metil éster	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	114,60	263,00	214,30	-	-	27,08	-	-
1726	Tetradecanoato de metilo	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	134,60	323,00	242,40	0,80	-	7,11	-	-
1841	3,7,11,15-Tetrametil-2-hexadecen-1-ol	C ₂₀ H ₄₀ O	-	377,90	296,50	1,29	-	-	-	-
1928	Ácido palmítico, metil éster	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	152,80	332,10	270,50	12,02	4,28	4,06	3,67	4,61
2099	Ácido linoleico, metil éster	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	96,90	373,30	294,50	-	1,67	-	-	-
2101	Linoleato de metilo	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	96,90	373,30	294,50	-	-	1,98	-	-
2109	Linolenato de metilo	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	101,40	364,40	292,50	17,79	6,00	9,00	-	-
2129	Estearato de metilo	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	169,30	355,50	298,50	1,10	-	-	-	1,70
2332	Metil 18-metilnonadecanoato	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	-	368,20	326,60	-	-	2,40	-	-
2533	Ácido docosanoico, metil éster.	C ₂₃ H ₄₆ O ₂	197,70	398,00	354,60	-	-	4,44	-	-
					Total	33,00	11,95	56,07	3,67	6,31
<i>Alcoholes (% área relativa)</i>										
1841	3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol	C ₂₀ H ₄₀ O	-	377,9	296,5	1,29	-	-	-	-
<i>Cetona (% área relativa)</i>										
3292	16-Hentriacontanona	C ₃₁ H ₆₂ O	35,6	499,5	450,8	-	35,60	-	-	-
<i>Hidrocarburos desconocidos (% área relativa)</i>										
2531	H desconocido	-	-	-	-	-	0,29	-	-	-
3045	H desconocido	-	-	-	-	-	8,13	-	-	-



3187	H desconocido	-	-	-	-	-	9,04	-	-	-
3248	H desconocido	-	-	-	-	-	3,46	-	-	-
					Total	-	20,92	-	-	-

C.Q.= Compuesto químico, F.M.= Fórmula molecular, P.I.= Punto de inflamación (°C), P.M.=Peso molecular (gmol⁻¹), P.E.=Punto de ebullición (°C).

P.I., P.E. y P.M. = Los datos se obtuvieron mediante Scifinder. Calculado con el software de desarrollo químico avanzado (ACD / Labs) V11.02.

9.6 RELACIÓN ENTRE INFLAMABILIDAD Y CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE FORESTAL.

Para relacionar los parámetros de la inflamabilidad (tiempo de ignición y duración de la llama) y factores naturales (Contenido de humedad, fracción total de aceite esencial y fracción de ciclohexano), se utilizó el análisis de varianza mediante el valor P, factor de correlación R, y factor de correlación ajustado R^2 con un intervalo de confianza de 95%, mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Relación obtenida entre los parámetros de la inflamabilidad y factores naturales de las hojas vegetales utilizando análisis de regresión simple.

	CH	FT	FCH
Ti	F=0,08; P=0,78	F= 4,50; P=0,31	F= 1,87; P=0,49
	R=-0,16; $R^2=0,27$	R=-0,58; $R^2=0,77$	R=-0,41; $R^2=0,27$
DII	F= 2,60; P=0,26	F=2,51; P=0,29	F= 2,83; P=0,35
	R=0,63; $R^2=-0,68$	R=-0,59; $R^2=0,67$	R=-0,54; $R^2=0,70$

F: Factor estadístico de Fisher, R: Coeficiente de correlación que entrega el signo de la relación (modelo lineal), R^2 : Coeficiente de correlación ajustado, P: Valor P. CH: Contenido de humedad, FT: Fracción total de aceite esencial, FCH: Fracción de ciclohexano, Ti: Tiempo de ignición, DII: Duración de la llama.



10 DISCUSIÓN

10.1 VARIACIÓN DE INFLAMABILIDAD SEGÚN ESPECIE FORESTAL.

Al evaluar los parámetros de la inflamabilidad para las especies exóticas: *E. globulus*, *P. radiata* y *A. dealbata* se observó que registraron resultados similares con otras investigaciones. Por ejemplo, la especie *E. globulus* fue la especie que obtuvo el menor tiempo de ignición, clasificándola como extremadamente inflamable ($G_i = 5$) y un tiempo de llama de poca duración, estos resultados eran de esperarse, pues ha sido reportada como especie forestal muy inflamable durante todo el año, registrando tiempos de ignición bajo los 10 s y con velocidades de propagación muy rápidas (Hernando *et al.*, 2014). La alta inflamabilidad de *E. globulus* ha sido explicado por (Hernando *et al.*, 2014) que la atribuyen principalmente a su alto contenido de aceites esenciales (corteza, ramas, hojas, flores, etc.) ricos en compuestos orgánicos volátiles (monoterpenos y sesquiterpenos) caracterizados por su bajo punto de inflamación. Sin embargo, los resultados obtenidos por Romero *et al.* (2019), muestran que, si bien el contenido de humedad es un factor importante, en muchos casos fue anulado por el grosor de la hoja, debido a que si un combustible es más espeso se requiere mayor cantidad de energía para evaporar el agua antes de la ignición, tomando en consideración que las hojas de *E. globulus* presentaban una de las hojas más densas, fue la especie que más rápido encendió. Por lo tanto, en el presente estudio su alta inflamabilidad se le atribuye principalmente a la mayor proporción de sesquiterpenos que se identificaron en comparación con las demás especies forestales, a pesar de su alto contenido de humedad y mayor grosor que presentaron sus hojas. Para el caso de *P. radiata*, resultó obtener un tiempo de ignición similar al estudio realizado por (Blackhall *et al.*, 2019), donde se analizó la inflamabilidad de especies nativas y exóticas tipo coníferas para el noroeste de la Patagonia incluyendo a *P. radiata*. No obstante, el tiempo de llama no resultó ser comparativo presentando una diferencia de 30 s, siendo mayor para el estudio realizado por Blackhall *et al.* (2019), estas diferencias se podrían explicar por las posibles diferencias en el contenido de compuestos orgánicos volátiles o contenido de humedad de las hojas bajo diferentes efectos del clima, considerando que el noroeste de la Patagonia presenta un clima tipo mediterráneo y templado (Blackhall *et al.*, 2019). La especie *P. radiata* a pesar de que se identificaron terpenos y bajo contenido de humedad, obtuvo un mayor tiempo de ignición comparación con las demás especies, resultando ser una especie inflamable ($G_i = 3$), y en este caso, un factor importante a considerar es su morfología, ya que *P. radiata* presenta hojas alargadas y rígidas que podrían retrasar el tiempo de ignición (Blackhall *et al.*, 2019). Para el caso de la especie *A. dealbata* estudiada por primera vez por Valette (1990), se observaron diferencias de 10 s en el resultado del tiempo de ignición (menor para el




presente estudio) y valores similares para la duración de llama. Estos valores similares se le pueden atribuir que ambos ensayos estaban relacionados a especies bajo el clima mediterráneo, y las pequeñas diferencias atribuidas a condiciones meteorológicas que posiblemente afectaron a los factores naturales de la planta como el contenido de humedad, terpenos, etc.

Lo llamativo de este estudio, son los parámetros de inflamabilidad obtenidos de las especies nativas: *C. alba* y *Q. saponaria*, debido a que en Chile no existe información importante relacionada a la inflamabilidad de las especies nativas bajo una técnica utilizada como la de Valette (1990), en comparación con las especies exóticas, considerando que Chile es un país fuertemente amenazado por los IF. Solo se encontró un estudio de Peña (2014), analizando tiempos de ignición para la especie exótica (*E. globulus*) y nativas (entre ellas *C. alba*), pero dentro de una cámara de calor a 485 °C, obteniendo para ambas especies tiempos de ignición de 8 s aproximadamente. Nuestros resultados muestran que existe una errónea concepción de que la vegetación nativa se quema más lento; por ejemplo, lo señalado por la investigadora Gómez S. en la revista Mundo Forestal (2017). El caso más notable fue para la especie nativa *C. alba* que obtuvo un bajo tiempo de ignición de 6,85 s ($G_i = 5$, extremadamente inflamable), similar a la especie exótica *E. globulus* de 3,98 s. En contraste, la especie nativa *Q. saponaria* se demora un tiempo de 20,99 s en encender ($G_i = 3$, inflamable), cinco veces más lento que *E. globulus*, pero de igual manera, resultó quemarse en un tiempo de ignición similar a la especie exótica *P. radiata* ($G_i = 3$, inflamable).

Por lo tanto, es importante estudiar a fondo las propiedades naturales de las especies nativas en el territorio nacional y su relación en la inflamabilidad, con el fin de obtener información científica que respalde que tan bien enciende una especie forestal, sobre todo si es nativa. Si bien, en el presente estudio se centró en analizar solo la parte del follaje del árbol que es lo primero que enciende en un IF (Ormeño *et al.*, 2011), no se conoce qué es lo que sucede con las demás secciones del árbol (ramas, tronco, flores entre otros).

Bajo este contexto, para obtener consistencia y coherencia en nuestros resultados, se determinó el grado de inflamabilidad utilizando la tabla de Valette (1977), bajo el instrumento del epirradiator debido a que fue una técnica inicialmente utilizada para especies dominantes del clima mediterráneo, como es en la zona central de Chile. Además, porque hasta el día de hoy diferentes estudios siguen clasificando la inflamabilidad de las hojas forestales en base al procedimiento de Valette. Sin embargo, en la práctica se habla mucho de la poca reproducibilidad en sus ensayos, como resultó ser en este estudio, esto se refleja en los coeficientes de variación obtenidos, entre 1,20% y 7,60%. A continuación, en la tabla 10 se muestra el grado de inflamabilidad en orden según los tiempos de ignición para el follaje de cada especie forestal estudiada.

Tabla 10. Tabla resumen inflamabilidad.



Especie	Ti s	Fi %	Gi	Criterio
<i>E. globulus</i>	3,98	100	5	Extremadamente inflamable
<i>C. alba</i>	6,85	100	5	Extremadamente inflamable
<i>A. dealbata</i>	9,65	100	5	Extremadamente inflamable
<i>P. radiata</i>	19,64	100	3	Inflamable
<i>Q. saponaria</i>	20,99	100	3	Inflamable

Ti: Tiempo de ignición (s); Fi: Frecuencia de ignición %; Gi: Grado de inflamabilidad.

10.2 VARIACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD SEGÚN ESPECIES EXÓTICAS Y NATIVAS.

Se midió el contenido de humedad debido a que diversos estudios aseguran la fuerte influencia que tiene este parámetro sobre la inflamabilidad. Generalmente, se describen tendencias positivas entre el contenido de humedad y tiempo de ignición. Esto quiere decir, que una alta hidratación foliar tiene mayor dificultad en la ignición, así lo han demostrado autores (Pellizzaro *et al.*, 2007; Alessio *et al.*, 2008; Dimitrakopoulos *et al.*, 2010 y Blackhall y Raffaele 2019) para especies dominantes del clima mediterráneo. Los valores obtenidos con respecto al contenido de humedad resultaron similares a estudios previos respecto a hojas esclerófilas para *Q. saponaria* y *C. alba*. (Gómez de la Cruz *et al.*, 2015), también las especies introducidas *P. radiata*, *E. globulus* y *A. dealbata*, registraron valores dentro del rango conocido, entre un 50% y 150% en los meses de verano para especies que habitan dentro del clima mediterráneo (Pellizzaro *et al.*, 2007). El mayor contenido de humedad la obtuvieron las especies exóticas *A. dealbata* y *E. globulus* con 127% y 122% respectivamente, en comparación a las especies nativas *Q. saponaria* y *C. alba* con 113% y 71%. Muchos estudios aseguran que las especies introducidas consumen una mayor cantidad de agua por su alta tasa de crecimiento y otros procesos propios de evo transpiración, en contraste con las especies esclerófilas de crecimiento lento (Oyarzún, 1990; Huber *et al.*, 2010 y Fuentes *et al.*, 2010), esto podría explicar la diferencia en el contenido de humedad. Sin embargo, las hojas esclerófilas son caracterizadas por poseer hojas duras y perennes evitando la evaporación en tiempo de sequías extremas y así retener mayor cantidad de agua. Pero según (Pellizzaro *et al.*, 2007) para este grupo de vegetación esclerófila generalmente en verano ocurre una evidente disminución del contenido de humedad cuando la



cantidad de lluvia es menor y el período de sequía es más largo. La especie *P. radiata* presentó bajo contenido de humedad de 81% a diferencia de las otras especies exóticas.

10.3 VARIACIÓN DE TERPENOS SEGÚN ESPECIES EXÓTICAS Y NATIVAS.

Se encontraron diversidad de terpenos (sesquiterpenos) para la mayoría de las especies: *C. alba*, *Q. saponaria*, *P. radiata* y *E. globulus*, resultados esperados debido a que los terpenos constituyen un sistema defensivo crucial para la supervivencia de las especies vegetales en la región mediterránea (veranos cada vez más calurosos, sequías más pronunciadas y frecuentes) como es el caso de la zona centro sur de Chile (Ormeño y Fernández, 2012).

La identificación de terpenos en las hojas de las 3 especies exóticas reveló que solo 2 especies contenían terpenos (sesquiterpenos): *E. globulus* y *P. radiata*. Para el caso de *E. globulus*, los sesquiterpenos mayoritarios identificados (aloaromadendreno, aromadendreno, β -copaene y α -gurjuneno) fueron consistentes con los compuestos detectados por estudios previos (Mulyaningsih *et al.*, 2010; Özgenç *et al.*, 2017 y Yong *et al.*, 2019). Para *P. radiata* los sesquiterpenos mayoritarios identificados (E - β -cariofileno, germacreno D, α -bergamoteno y α -farneseno) en su mayoría coinciden con investigaciones anteriores (Cool *et al.*, 1992 y Lomabardo *et al.*, 2013.), incluso el estudio de (Ormeño *et al.*, 2009) que identificó compuestos terpenoides, pero en hojarasca para diferentes especies de pinos, se encontraron los mismos compuestos detectados de sesquiterpenos. Sorprendentemente, para la especie *A. dealbata*, no se registraron terpenos, en contraste con publicaciones que si han encontrado diversidad de sesquiterpenos (Özgenç *et al.*, 2017), reportando en mayor cantidad los compuestos: aromadendreno, α -gurjuneno y β -bisabolene, además de compuestos triterpenoides (Lorenzo *et al.*, 2006). Al comparar los resultados del presente estudio de *A. dealbata* con las investigaciones previas, el hecho de no encontrar terpenos en las hojas de esta especie forestal nos hace replantearnos si algún paso previo afectó a los resultados. Por ejemplo, se observó que las hojas compuestas de *A. dealbata* presentaban foliolos muy débiles y delicados en comparación con las otras especies exóticas y nativas estudiadas, por lo que el paso previo de extracción de cera cuticular con solventes hexano y diclorometano (antes de la extracción soxhlet) pudo extraer parte importante de los sesquiterpenos.

Para las especies nativas *C. alba* y *Q. saponaria* también se encontraron sesquiterpenos. Por ejemplo, los sesquiterpenos encontrados en las hojas de *C. alba* (α -bergamoteno, germacreno D, (Z)-calameno, β -elemeno y α -farneseno) fueron detectados ya por los investigadores (Montes *et al.*, 1988; Di Cosmo *et al.*, 2015; Pinto *et al.*, 2016 y Bravo *et al.*, 2017), pero en general los sesquiterpenos registrados en las publicaciones mencionadas difieren entre ellas. La especie *Q. saponaria*, presentó muy bajo % de área relativa (2,10%) identificando a dos sesquiterpenos (aromadendreno y aloaromadendreno) en



comparación con las demás especies analizadas, sin embargo, estudios previos (Guo *et al.*, 2000 y Nasri *et al.*, 2012) no reportaron ningún tipo de monoterpenos o sesquiterpenos en *Q. saponaria*, solo sapononinas triterpenoides con 30 átomos de carbono, caracterizados como una mezcla compleja de glicósidos y ésteres azucarados de ácido quillaico; y ocasionalmente, de ácido equinocístico, 22p-hidroxi-quillaico o fitolacagénico (Guo *et al.*, 2000; Arrau *et al.*, 2011 y Nasri *et al.*, 2012), no obstante en el presente estudio no se identificaron tales compuestos triterpenoides.

Bajo este contexto, los terpenos son un factor natural importante que influyen en la inflamabilidad de las especies forestales, debido a que poseen un alto valor de calentamiento y principalmente por los bajos puntos de inflamación, siendo para los sesquiterpenos alrededor de 100 °C. Por lo tanto, al someter las hojas de las especies forestales a temperaturas bajas, los terpenos son capaces de generar una mezcla de gases inflamables generando una llama si está en presencia de una fuente de calor (Cicciole *et al.*, 2014 y Ormeño *et al.*, 2009). A partir de lo anterior, ha de esperarse que las especies forestales que presentaron sesquiterpenos sean inflamables como fue para *E. globulus*, *P. radiata* *C. alba* y *Q. saponaria*.

Como información adicional, para entender mejor los parámetros de la inflamabilidad, se determinó en el Laboratorio de Termodinámica de la Universidad Federico Santa María, los puntos de inflamación de las hojas de las especies estudiadas, (*C. alba*: 272,50°C; *E. globulus*: 284,00°C; *A. dealbata*: 287,50°C, *P. radiata*: 305,00°C y *Q. saponaria*: 322,50°C). Si consideramos que la temperatura del epirradiator osciló entre 350°C, los puntos de inflamación obtenidos están bajo y cercanos a este valor, dando coherencia y consistencia al método aplicado por Valette (1990).

Pero no solo se encontraron sesquiterpenos, también se logró identificar otros compuestos químicos como hidrocarburos alifáticos, ésteres, cetonas y alcoholes, que pueden también contribuir en la inflamabilidad de las hojas de las especies forestales. Estos compuestos químicos identificados son sustancias extraíbles de las hojas de las especies forestales (Rosales *et al.*, 2016), formadas por el metabolismo secundario de las plantas y que están constituidos además de los terpenos, por ácidos grasos, alcoholes grasos, ácidos resinosos, fenoles, taninos, esteroides, alcaloides, compuestos nitrogenados, azúcares, grasas y ceras, así lo han detectado investigadores como parte de la estructura de las hojas del combustible forestal (Rowell *et al.*, 2005 y Taiz y Zeiger, 2006). Los puntos de inflamación de estos compuestos químicos son variados, por lo tanto, es importante considerarlos al momento de estudiar la inflamabilidad, ya que pueden disminuir o aumentar el tiempo de encendido y duración de la llama, sin embargo, no se encontraron estudios que relacionen estos compuestos químicos sobre los parámetros de la inflamabilidad. Por ejemplo, para la especie *Q. saponaria* se identificó el hidrocarburo alifático nonacosano en mayor proporción, mientras que este compuesto presenta un tiempo de inflamación de 291°C, por lo que podría explicar por qué fue la especie que



tardo más en encender, si consideramos su baja área relativa en sesquiterpenos (2,1%). La especie *C. alba* presentó un compuesto muy particular: 16-hentriacontanona, una cetona con muy bajo punto de inflamación de 35°C, por lo tanto, no resulta extraño ser la segunda especie que encendió más rápido.

10.4 RELACIÓN ENTRE FACTORES NATURALES Y LA INFLAMABILIDAD.

Al estudiar en conjuntos los diferentes factores naturales de las hojas del combustible forestal y su relación con la inflamabilidad conlleva a un mejor entendimiento al desarrollo del fuego, en vez de concluir de forma aislada cada parámetro que rige los parámetros de la inflamabilidad. No obstante, es necesario notar que al considerar una mayor cantidad de variables sugieren complejas interrelaciones entre estas características.

Bajo nuestras condiciones experimentales, los resultados obtenidos muestran que los terpenos si afectaron a la inflamabilidad, puesto que las especies nativas y exóticas que presentaron estos tipos de compuestos terminaron por encenderse dentro de los 20 s. Sin embargo, el contenido de humedad no afectó significativamente al tiempo de ignición como se ha reportado, por ejemplo, la especie exótica *E. globulus*, que registró mayor diversidad de sesquiterpenos, a pesar de presentar alto contenido de humedad, fue la que registró menor tiempo de encendido, esto se podría explicar por los estudios de Page *et al.* (2012) donde sus resultados confirman que la inflamabilidad de una hoja dependía en gran medida de su estado de hidratación; pero dado que los isoprenoides se disuelven en agua, un alto contenido de humedad también puede implicar altas tasas de emisión de isoprenoides y/o concentraciones, si este es el caso, los tejidos frescos pueden inflamarse a niveles de hidratación más altos, más significativo que el grosor de las hojas.. Así también lo sugieren Ciccioli *et al.* (2014), donde sus resultados explican el papel del agua como portador de terpenos, favoreciendo su volatilización y contribuyendo al encendido. Por otro lado, *P. radiata* presento también diversidad de sesquiterpenos, pero un bajo contenido de humedad, por lo que se esperaba que esta especie obtuviera un tiempo de ignición bajo, pero no fue así, y es que De Lillis *et al.*, (2009) observaron particularmente en especies coníferas que los conductos de resina/depósito glandulares donde están contenidos los sesquiterpenos están bien selladas y solo se rompen cuando las temperaturas alcanzan valores muy altos, explicando porqué se tardó más en encender. Asimismo, Blackmarr (1972) recalco la importancia de estudiar en conjunto el grosor y contenido de humedad de las hojas y su efecto en la inflamabilidad, esto se destacó para *Q. saponaria*, puesto que registró mayor tiempo de encendido atribuyéndolo a que presentaba hojas más gruesas y duras y menor área relativa en cuanto a sesquiterpenos. Para el caso de la especie nativa *C. alba*, resultó ser la segunda especie en encender, atribuyéndolo a su bajo contenido de humedad y diversidad de sesquiterpenos encontrados, y además se observó que presentaban hojas menos gruesas.



Según predicciones del cambio climático asegurando condiciones climáticas más severas como son las altas temperaturas y sequías extremas ha de esperarse una fuerte influencia en los factores naturales de las especies vegetales como la disminución en el contenido de humedad de las hojas del combustible forestal. Sumado a lo anterior, se ha evidenciado que en condiciones de sequía y calor extremos, las plantas responden emitiendo mayor cantidad de terpenos para contrarrestar los efectos oxidativos que provoca esta disminución de agua y excesivo calor (aumento de cariofileno para *Cistus monspeliensis*, así como en α -pineno y delta-3-careno para *Pinus halepensis* según Llusia y Peñuelas (1998); y aumento de monoterpenos para *Salvia officinalis* según Nowak *et al.* (2010), contribuyendo a que las hojas de las especies forestales se vuelvan más inflamables. Por lo tanto, el efecto del contenido de terpenos sobre la inflamabilidad probablemente será más pronunciado en un futuro a medida que aumenten las sequías y la temperatura. En efecto, resulta de gran importancia el conocimiento de los factores naturales del combustible forestal nativos dentro del territorio nacional, principalmente en zonas climáticas del tipo mediterráneo, y su relación sobre la inflamabilidad, si consideramos que Chile es un país frecuentemente amenazado por los IF.



11 CONCLUSIÓN

En la presente investigación se pudo llevar a cabo ensayos de inflamabilidad de las hojas de especies exóticas y nativas bajo el instrumento del epirradiator, y como resultado se logró obtener un índice de inflamabilidad con el fin de clasificar el combustible forestal.

Se realizó con éxito la caracterización química como el contenido de humedad y aceite esencial de las hojas de las especies exóticas y nativas. Se logró identificar terpenos (sesquiterpenos) mediante extracción soxhlet y el análisis por Cromatografía Gaseosa acoplada a un Espectrómetro de Masa.

Si bien al relacionar estadísticamente los factores naturales con la inflamabilidad mediante análisis de varianza (ANOVA) no se obtuvieron relaciones estadísticamente significativas, puesto que se necesita un mayor número de individuos y especies forestales para realizar un análisis estadístico completo, se concluye que a pesar de lo anterior, el presente trabajo demostró que las hojas de las especies nativas y exóticas contienen sesquiterpenos y otros tipos de moléculas (hidrocarburos alifáticos, alcoholes, cetonas) de bajo punto de inflamación que contribuyen en la inflamabilidad de las especies forestales analizadas.

Adicionalmente el sesquiterpeno denominado aloaromadendreno se encontró en la mayoría de las hojas de las especies forestales, lo que puede indicar un patrón que representa un ecosistema mediterráneo esclerófilo en la zona central de Chile.

Los resultados de la inflamabilidad muestran que las hojas de *E. globulus*, *A. dealbata* y *C. alba* resultaron ser las más inflamables (menor tiempo de ignición = 3,98 s, e índice de inflamabilidad 5, extremadamente inflamable). Por otro lado, las especies *P. radiata* y *Q. saponaria* resultaron ser menos inflamables (mayor tiempo de ignición = 20,99, e índice de inflamabilidad 3, inflamable).

La principal contribución de esta investigación es básicamente proporcionar información de las propiedades termoquímicas y fisicoquímicas de las especies nativas analizadas, que contribuyen al entendimiento de la complejidad del comportamiento del fuego en relación con las condiciones ambientales cambiantes en épocas del año cuando los riesgos a nivel regional son altos como en verano. En efecto, la información generada por esta investigación puede desempeñar un papel importante en la toma de decisiones de los gestores de incendios evaluando el riesgo del combustible forestal a través de modelos de riesgos, considerando los diferentes comportamientos de fuego de las especies forestales analizadas.

Si bien se estudió el follaje de 2 especies nativas, se recomienda un estudio más acabado de las diversas especies forestales nativas que habitan en la zona central de Chile, además de analizar las diferentes secciones del árbol (ramas, flores, corteza, etc.), con el fin de obtener un mayor conocimiento sobre la inflamabilidad.



12 REFERENCIAS

- Alessio G., Peñuelas J., Llusà J., Ogaya, R., Estiarte, M., & De Lillis, M. (2008). Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. *International Journal of Wildland Fire*, 17(2), 274–286.
- Aliaga. (1999). Velocidad de propagación del fuego en *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Acacia melanoxylon*: un estudio de laboratorio XVI Jornadas de Evaluación de Manejo del Fuego Chillán.
- Anderson, H.E. (1970) Forest fuel ignitibility. *Fire Technology* 6,312–319, 322.
- Arrau, S., Delporte, C., Cartagena, C., Rodríguez-Díaz, M., González, P., Silva, X., ... & Miranda, H. F. (2011). Antinociceptive activity of *Quillaja saponaria* Mol. saponin extract, quillaic acid and derivatives in mice. *Journal of ethnopharmacology*, 133(1), 164-167.
- Atisba. (2017). Zona de Riesgo Incendios Valparaíso. <http://www.atisba.cl/wp-content/uploads/2017/04/Reporte-Atisba-Monitor-Riesgo-Incendio-Valparaiso.pdf>
- Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. Bogotá DC: nota técnica del IDEAM.
- Behm, A. L., Duryea, M. L., Long, A. J., & Zipperer, W. C. (2004). Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems and implications for the wildland–urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 13(3), 355-365.
- Blackhall, M., & Raffaele, E. (2019). Landscape and Urban Planning Flammability of Patagonian invaders and natives : When exotic plant species affect live fine fuel ignitability in wildland–urban interfaces. *Landscape and Urban Planning*, 189 (April), 1–10.
- Blackmarr W. (1972) Moisture content influences ignitability of slash pine litter. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Research Note SE-173. (Asheville, NC, USA).
- Bravo, J., Carbonell, V., Sepúlveda, B., Delporte, C., Valdovinos, C. E., Martín-Hernández, R., & Higes, M. (2017). Antifungal activity of the essential oil obtained from *Cryptocarya alba* against infection in honey bees by *Nosema ceranae*. *Journal of invertebrate pathology*, 149, 141-147.
- Brooks, M.L., D'Antonio, C.M., Richardson, D.M., 2004. Effects of invasive alien plants on fire regimes. *Bioscience* 54, 677–688.
- CAL. Departamento de silvicultura y protección contra incendios de California 2017. <https://www.fire.ca.gov/>
- CONAF (Corporación Nacional forestal, CL) (2018). <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>.



- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL) (2004). Chile forestal. <http://www.conaf.cl/cms/editorweb/chifo/CHIFO-359.pdf>
- CONAF (Corporación Nacional forestal, CL) (2017). <http://www.conaf.cl/>.
- Countryman, C. M., & Dean, W. A. (1979). Measuring moisture content in living chaparral: a field user's manual. General Technical Report PSW-036. Berkeley, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 28 p, 36.
- Carmona, C.P., Azcárate, F.M., de Bello, F., Ollero, H.S., Lepš, J., Peco, B. 2012. Taxonomical and functional diversity turnover in Mediterranean grasslands: interactions between grazing, habitat type and rainfall. *Journal of Applied Ecology* 49: 1084–1093.
- Castellnou, M., Álvarez, R., Almodóvar, J., Martins, F., Mayoral, P. C., Alfonso, L., & Basile, G. (2017). Informe Técnico: Situación de incendios forestales en Chile entre Enero-Febrero 2017, 11.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(3), 44-53.
- Castillo, Miguel; Julio-Alvear, Guillermo; y Garfias, Roberto (2015). Current wildfire risk status and forecast in Chile: Progress and future challenges. *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters*, (pp. 59–75). 1.2.2.1, 1.1a, 1.1b
- Concha-Graña, E., Turnes-Carou, M. I., Muniategui-Lorenzo, S., López-Mahía, P., Fernández-Fernández, E., & Prada-Rodríguez, D. (2004). Development of pressurized liquid extraction and cleanup procedures for determination of organochlorine pesticides in soils. *Journal of Chromatography A*, 1047(1), 147-155.
- Cool, L. G., & Zavarin, E. (1992). Terpene variability of mainland *Pinus radiata*. *Biochemical systematics and ecology*, 20(2), 133-144.
- Correa M., Nartínez A., (2013). Información tecnológica de productos forestales no madereros del bosque nativo en Chile.
- De Lillis M., Bianco P.M. & Loreto F. (2009) The influence of leaf water content and isoprenoids on flammability of some Mediterranean woody species. *International Journal of Wildland Fire* 18, 203–212.
- Di Cosmo, D., Santander, R., Urzúa, A., Palacios, S. M., & Rossi, Y. E. (2015). Insecticidal effect of *Cryptocarya alba* essential oil on the housefly, *Musca domestica* L.
- Díaz-Hormazábal, I., & González, M. E. (2016). Análisis espacio - temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 147-158.



- Dicke M., van Poecke R.M.P., de Boer J.G. Inducible indirect defence of plants: from mechanisms to ecological functions. *Basic Appl. Ecol.* 2003; 4:27–42.
- Dimitrakopoulos, A. P., & Papaioannou, K. K. (2001). Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37(2), 143-152.
- Dirección meteorología de Chile (2019). <http://www.meteochile.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>.
- Domínguez, E., Heredia-Guerrero, J. A., & Heredia, A. (2011). The biophysical design of plant cuticles: an overview. *New Phytologist*, 189(4), 938-949.
- EIRD. Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres. 2000. Incendios Globales - Un Mensaje del Centro Global para el Monitoreo de los Incendios.
- Figueiredo, K., Oliveira, M., Oliveira, A., Silva, G. Santos, M. (2012). Epicuticular-wax removal influences gas exchange and water relations in the leaves of an exotic and native species from a Brazilian semiarid region under induced drought stress. *Australian Journal of Botany*, 60(8), 685-692.
- Frejaville, T., Curt, T., & Carcaillet, C. (2013). Bark flammability as a fire-response trait for subalpine trees. *Frontiers in plant science*, 4, 466.
- Fuentes-Ramírez, A., Pauchard, A., Marticorena, A., & Sánchez, P. (2010). Relación entre la invasión de *Acacia dealbata* Link (Fabaceae: Mimosoideae) y la riqueza de especies vegetales en el centro-sur de Chile. *Gayana. Botánica*, 67(2), 188-197.
- Ganteaume A, Jappiot M, Lampin C, Guijarro M, Hernando C (2013b) Flammability of some ornamental species in wildland–urban interfaces in south-eastern France: laboratory assessment at particle level. *Environmental Management* 52, 467–480.
- George, I. J., Black, R. R., Geron, C. D., Aurell, J., Hays, M. D., Preston, W. T., & Gullett, B. K. (2016). Volatile and semivolatile organic compounds in laboratory peat fire emissions. *Atmospheric environment*, 132, 163-170.
- Giglio, L., Csiszar, I., & Justice, C. O. (2006). Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G2).
- Gómez-de la Cruz, F. J., Palomar-Carnicero, J. M., Casanova-Peláez, P. J., & Cruz-Peragón, F. (2015). Experimental determination of effective moisture diffusivity during the drying of clean olive stone: Dependence of temperature, moisture content and sample thickness. *Fuel processing technology*, 137, 320-326.
- Gotor, B. (2008). Caracterización y comparación anatómica de hojas de Peumo (*Cryptocarya alba* (Mol.) Looser) y Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) sometidas a condiciones de riego



- permanente y de restricción hídrica. Santiago. Chile: Escuela de ciencias forestales. Departamento de Silvicultura. Universidad de Chile.
- Gudmundsson, L., Rego, F. C., Rocha, M., & Seneviratne, S. I. (2014). Predicting above normal wildfire activity in southern Europe as a function of meteorological drought. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084008.
- Guerrero F. En revisión. FONDECYT 2019.
- Guo, S., Kenne, L., Lundgren, L. N., Rönnerberg, B., & Sundquist, B. G. (1998). Triterpenoid saponins from *Quillaja saponaria*. *Phytochemistry*, 48(1), 175-180.
- Guo, S., & Kenne, L. (2000). Characterization of some O-acetylated saponins from *Quillaja saponaria* Molina. *Phytochemistry*, 54(6), 615-623.
- Hauenstein, E., Muñoz-pedrerros, A., Yáñez, J., Sánchez, P., & Möller, P. (2009). Flora y vegetación de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Reserva de la Biósfera, Región de Valparaíso, Chile. *Flora and vegetation of the National Reserve Lago Peñuelas, Biosphere Reserve, Region of Valparaiso, Chile*, 30(3), 159–179.
- Heinrich J. (1822). *Enumeratio Plantarum Horti Regii Berolinensis Altera. Acacia Dealbata* Link.
- Hernando C., guijarro M., Perez P., Vega J., Fonturbel T., Diez C, Martinez E., Madrigal J. (2014). Inflamabilidad de la hojarasca de diferentes especies forestales: influencia de la humedad y de la densidad aparente del combustible.
- Holz, A., Paritsis, J., Mundo, I. A., Veblen, T. T., Kitzberger, T., Williamson, G. J., Grau, H. R. (2017). Southern Annular Mode drives multicentury wildfire activity in southern South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9552–9557.
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., & Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Effect of Pinus radiata and Eucalyptus globulus plantations on water resource in the Coastal Range of Biobío región. Chile*, 31(3), 219–230.
- Katz R., Sierralta L. Allonza J., Cavieres A., Gracia J., Hernández E. (2017) Incendios forestales. Implicancias de política pública. *Debate de política pública*.
- Inventario nacional de especies forestales. MMA. (2019).
<http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/Default.aspx>
- Koepen, W. 1931. *Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde*. 2. Aufl. Berlin. 182 pp.
- Koch, K., & Ensikat, H. J. (2008). The hydrophobic coatings of plant surfaces: epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly. *Micron*, 39(7), 759-772.



- Leide, J., Hildebrandt, U., Vogg, G., & Riederer, M. (2011). The positional sterile (ps) mutation affects cuticular transpiration and wax biosynthesis of tomato fruits. *Journal of plant physiology*, 168(9), 871-877.
- Liodakis, S., Bakirtzis, D., & Dimitrakopoulos, A. (2002). Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 390(1-2), 83-91.
- Llusia` J, Pen ~uelas J (1998) Changes in terpene content and emission in potted Mediterranean woody plants under severe drought. *Canadian Journal of Botany* 76, 1366–1373.
- Lombardi, F., Cherubini, P., Tognetti, R., Coccozza, C., Lasserre, B., & Marchetti, M. (2013). Investigating biochemical processes to assess deadwood decay of beech and silver fir in Mediterranean mountain forests. *Annals of Forest Science*, 70(1), 101-111.
- Lorenzo, P., Pereira, C. S., Rodríguez-Echeverría, S. (2013). Differential impact on soil microbes of allelopathic compounds released by the invasive *Acacia dealbata* Link. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 156-163.
- Marín-Loaiza, J. C., & Céspedes, C. L. (2007). Compuestos volátiles de plantas. Origen, emisión, efectos, análisis y aplicaciones al agro. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 327-351.
- Martin, R. E., Gordon, D. A., Gutierrez, M. E., Lee, D. S., Molina, D. M., Schroeder, R. A., ... & Chambers, M. (1993). Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. In *Proceedings of the 12th conference on fire and forest meteorology* (pp. 26-28).
- Medeiros, C. D., Falcão, H. M., Almeida-Cortez, J., Santos, D. Y. A. C., Oliveira, A. F. M., & Santos, M. G. (2017). Leaf epicuticular wax content changes under different rainfall regimes, and its removal affects the leaf chlorophyll content and gas exchanges of *Aspidosperma pyrifolium* in a seasonally dry tropical forest. *South African Journal of Botany*, 111, 267-274.
- Montgomery, K. R., & Cheo, P. C. (1971). Effect of leaf thickness on ignitibility. *Forest Science*, 17(4), 475-478.
- Montes M, Valenzuela T, Wilkomirsky T, Sanguinetti A, Von Baer D. 1988. Etude de la composition de l'huile essentielle de *Cryptocarya alba* (Mol) Looser (Lauraceae) du Chili. *Ann Pharm Fr* 46: 41 - 47.
- Moody, J.A., and D.A. Martin. 2009. Forest fire effects on geomorphic processes. In: A. Cerdà, P. R. Robichaud (eds). *Fire effects on soils and restoration strategies*. Science Publishers. p. 41–79
- Morgan, Varner, J. (2015). The flammability of forest and woodland litter: a synthesis. *Current Forestry Reports* 1.2 (2015): 91-99.
- Mulyaningsih, S., Sporer, F., Zimmermann, S., Reichling, J., & Wink, M. (2010). Synergistic properties of the terpenoids aromadendrene and 1, 8-cineole from the essential oil of *Eucalyptus*



- globulus against antibiotic-susceptible and antibiotic-resistant pathogens. *Phytomedicine*, 17(13), 1061-1066.
- Nasri, S., Luciano, G., Vasta, V., Aouadi, D., Priolo, A., Makkar, H. P. S., & Salem, H. B. (2012). Effect of *Quillaja saponaria* dietary administration on colour, oxidative stability and volatile profile of muscle longissimus dorsi of Barbarine lamb. *Meat science*, 92(4), 582-586.
- Navarrete, A. (2006). Estado de desarrollo ex-situ de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), keule (Gomortega keule Baillon) y belloto del sur (Beilschmiedia berteriana Kosterm.) en Valdivia. Valdivia. Chile: Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile.
- Nowak M, Manderscheid R, Weigel H-J, Kleinwachter M, Selmar D (2010) Drought stress increases the accumulation of monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*), an effect that is compensated by elevated carbon dioxide concentration. *J Appl Bot Food Qual* 83, 133–136.
- Ormeño, E., Cespedes, B., Sanchez, I. A., Velasco-García, A., Moreno, J. M., Fernandez, C., & Baldy, V. (2009). The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 471-482.
- Ormeño, E., Goldstein, A., & Niinemets, Ü. (2011). Extracting and trapping biogenic volatile organic compounds stored in plant species. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(7), 978-989.
- Ormeño, Elena, and Catherine Fernández. "Los terpenos de las plantas." *Investigación y ciencia* (2012).
- Oyarzun, C.E. (1990). Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Turrialba*. 40, 503-508
- Owens, M., Lin, C., Taylor, C., y Whisenant, S. (1998). Seasonal patterns of plant flammability and monoterpenoid content in *Juniperus ashei*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(12), 2115-2129.
- Özgenç, Ö., Durmaz, S., Çelik, G., Korkmaz, B., & Yaylı, N. (2017). Comparative phytochemical analysis of volatile organic compounds by SPME-GC-FID/MS from six coniferous and nine deciduous tree bark species grown in Turkey. *South African journal of botany*, 113, 23-28.
- Page W.G., Jenkins M.J. & Runyon J.B. (2012) Mountain pine beetle attack alters the chemistry and flammability of lodgepole pine foliage. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 1631–1647.
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., & Vallejo, R. (2009). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review. *International Journal of wildland fire*, 17(6), 713-723.
- Pausas, J. G., Keeley, J. E., Bond, W. J., Bradstock, R. A., & Rundel, P. W. (2012). *Fire in Mediterranean ecosystems: ecology, evolution and management*. Cambridge University Press
- Pausas, J. G., Alessio, G. A., Moreira, B., & Segarra-Moragues, J. G. (2016). Secondary compounds enhance flammability in a Mediterranean plant. *Oecologia*, 180(1), 103-110.



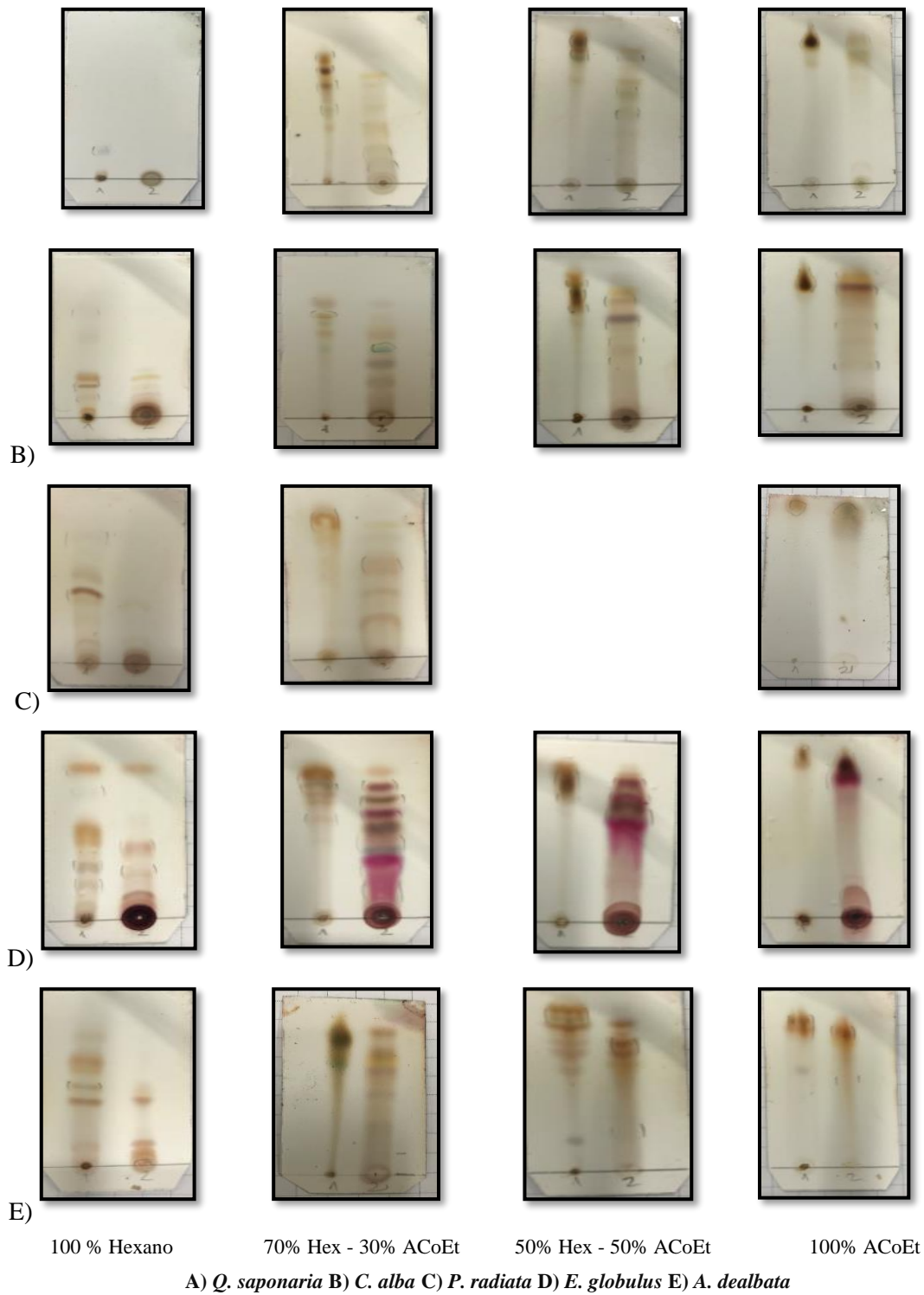
- Peña E. (2014). Consideraciones para la creación de una franja de prevención de incendios en el interfaz urbano rural.
- Pellizzaro, G., Duce, P., Ventura, A. y Zara, P. (2007). Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin, 633–641.
- Peredo H., García. (2009), Aceites esenciales: Métodos de extracción.
- Petriccione, M., Moro, C., & Rutigliano, F. A. (2006). Preliminary studies on litter flammability in Mediterranean region.
- Pinto, J. J., Silva, G., Figueroa, I., Tapia, M., Urbina, A., Rodríguez, J. C., & Lagunes, A. (2016). Insecticidal activity of powder and essential oil of *Cryptocarya alba* (Molina) Looser against *Sitophilus zeamais* Motschulsky. Chilean journal of agricultural research, 76(1), 48-54.
- Raison, R.J., P.K. Khanna, K. Jacobsen, J. Romanya, and I. Serrasolses. 2009. Effect of fire on forest nutrient cycles. In: A. Cerdà, P. R. Robichaud (eds). Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers. p. 225–256.
- Rocca, G. Della, Madrigal, J., Marchi, E., Michelozzi, M., Moya, B., & Danti, R. (2017). Relevance of terpenoids on flammability of Mediterranean species: An experimental approach at a low radiant heat flux.
- Romero B, Fernandez K., Lecareux C., Ormeño B. and Ganteaume A. (2019). How terpene content affects fuel flammability of wildland–urban interface vegetation.
- Rosales-Castro, M., Honorato-Salazar, J. A., Santos-García, A. B., Pérez-López, M., Colotl-Hernández, G., & Sánchez-Monsalvo, V. (2016). Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica. Madera y bosques, 22(2), 131-146.
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S. y Tshabalala, M. A. (2005). Cell Wall Chemistry. En R. M. Rowell (Ed.), Handbook of wood chemistry and wood composites (pp. 35-74). Boca Raton, Florida, EUA.
- Sandoval, D., Reyes, R., & Oyarzún, G. (2019). Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales. Revista chilena de enfermedades respiratorias, 35(1), 49-57.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., & Marquis, M. (Eds.). (2007). Climate change 2007- the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge university press.
- Simms, D. L. & Law, M. 1967 The ignition of wet and dry wood by radiation. Combust. Flame 11, 377–388.



- Syphard A., Radeloff V., Keeley J., Hawbaker T., Clayton M., Stewart S., Hammer R. (2007) Human influence on California fire regimes. *Ecological Applications* 17, 1388–1402.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. Volumen 1. Castellón de la Plana: Universitat Jaume.
- Turco, M.; Von Hardenberg, J.; AghaKouchak, A.; Llasat, M. C.; Provenzale, A., y Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific Reports*, marzo de 2017.
- Trabaud L (1974) Experimental study on the effects of prescribed burning on a *Quercus coccifera* L. garrigue: early results. *Tall Timbers Fire Ecology Conference Proceedings* 13, 97–129.
- Valette, J.C. (1990). Inflammabilités des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. *Revue Forestière Française*, v.42, n. sp., p.76–92.
- Vera, W., Parra, L., Quiroz, A., & Bergmann, J. (2016). Attraction to host plant volatiles and feeding performance of *Naupactus xanthographus* (Coleoptera: Curculionidae) is affected by starvation. *Journal of insect behavior*, 29(1), 48-56.
- Vicencio, J.; CORTÉS, C.; CAMPOS, D.; TUDELA, V.; 2017. Informe especial enero 2017: un mes de grandes extremos. Dirección Meteorológica de Chile. 13 pp.
- White, R. H., & Zipperer, W. C. (2010). Testing and classification of individual plants for fire behaviour: plant selection for the wildland–urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 19(2), 213-227.
- Wu, C., Wang, F., Liu, J., Zou, Y., & Chen, X. (2015). A comparison of volatile fractions obtained from *Lonicera macranthoides* via different extraction processes: ultrasound, microwave, Soxhlet extraction, hydrodistillation, and cold maceration. *Integrative medicine research*, 4(3), 171-177.
- Yong, W. T. L., Ades, P. K., Goodger, J. Q., Bossinger, G., Runa, F. A., Sandhu, K. S., & Tibbits, J. F. (2019). Using essential oil composition to discriminate between myrtle rust phenotypes in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus obliqua*. *Industrial Crops and Products*, 140, 111595.

13 ANEXOS

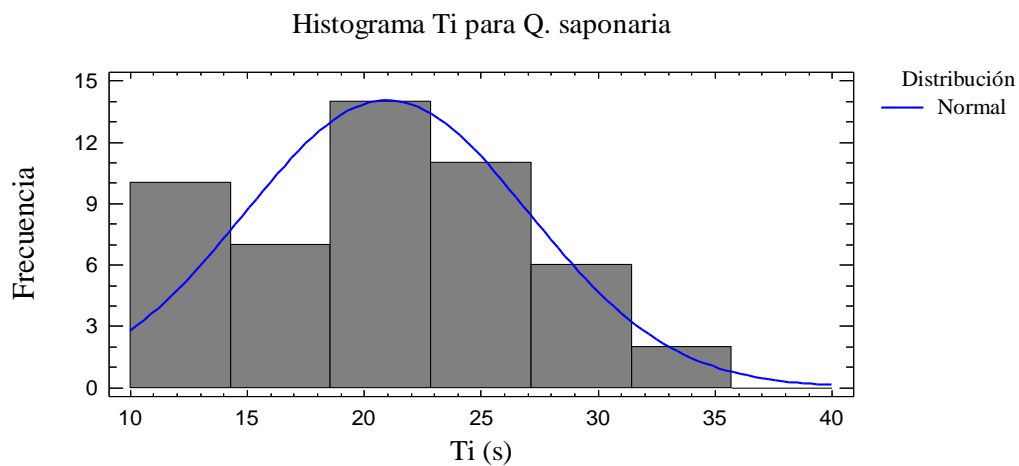
Anexo A: Cromatografía en placa fina.



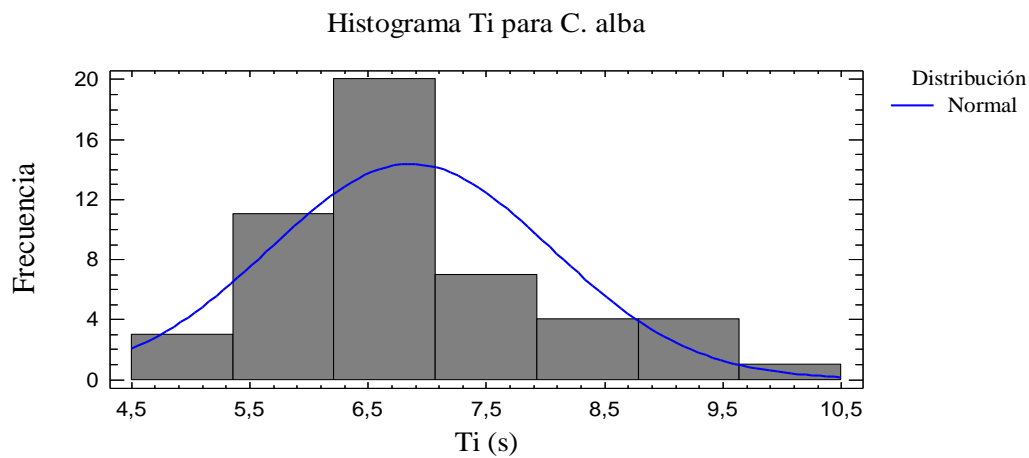


Anexo B: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable tiempo de ignición.

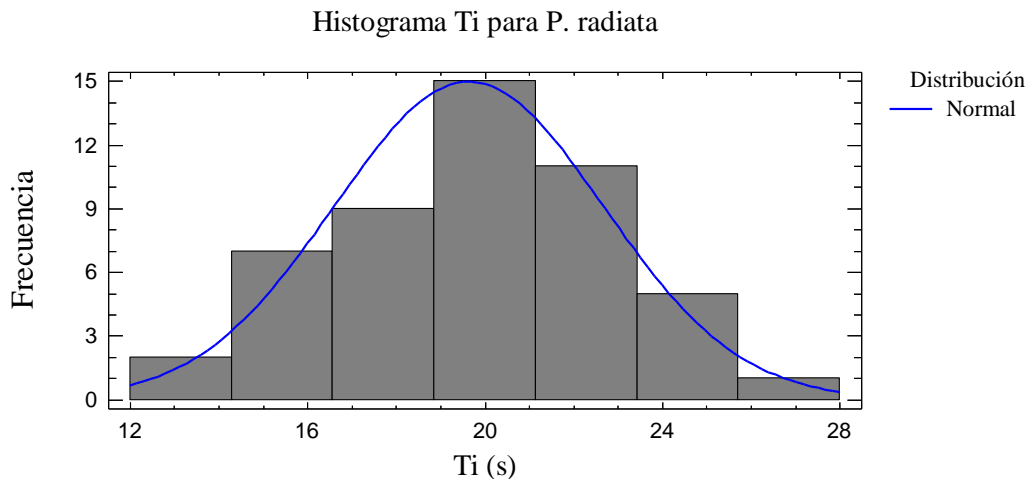
B.1 *Q. saponaria*



B.2 *C. alba*

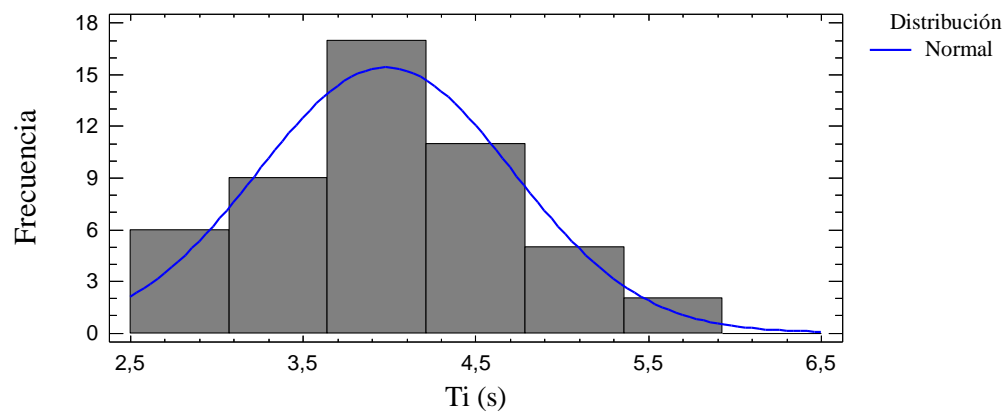


B.3 *P. radiata*



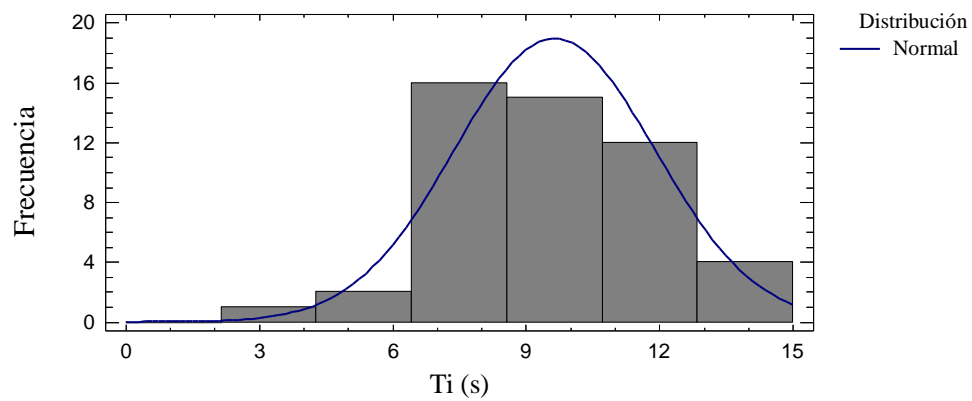
B.4 *E. globulus*

Histograma T_i para *E. globulus*



B.5 *A. dealbata*

Histograma T_i para *Acacia dealbata*

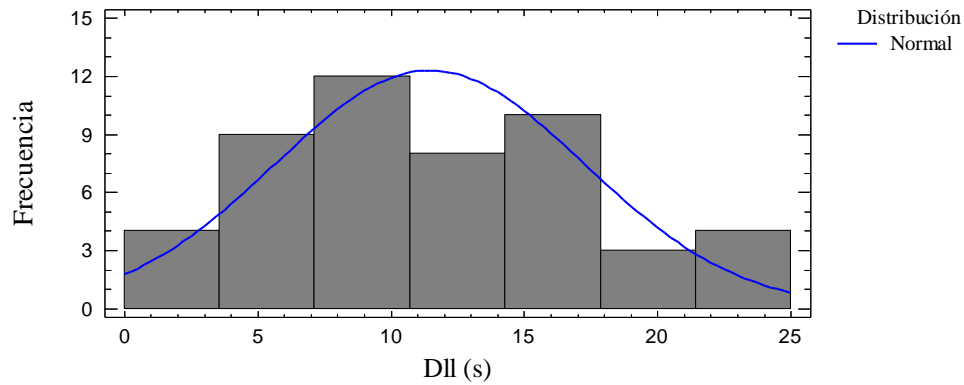




Anexo C: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable duración de llama.

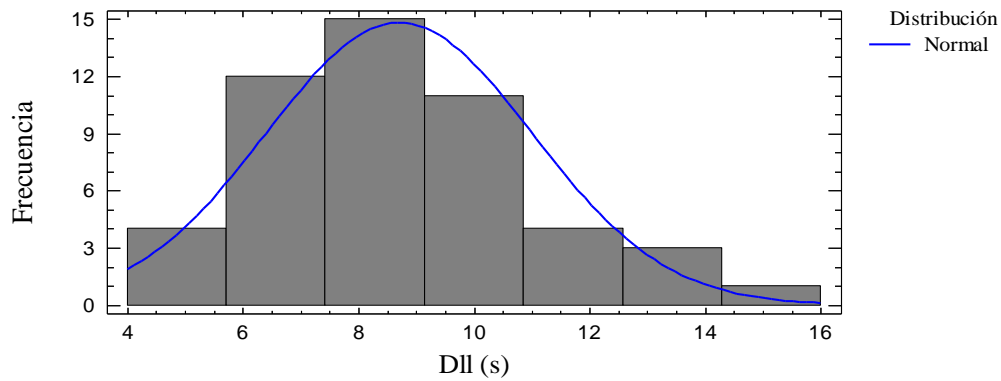
C.1 *Q. saponaria*

Histograma Dll para *Q. saponaria*



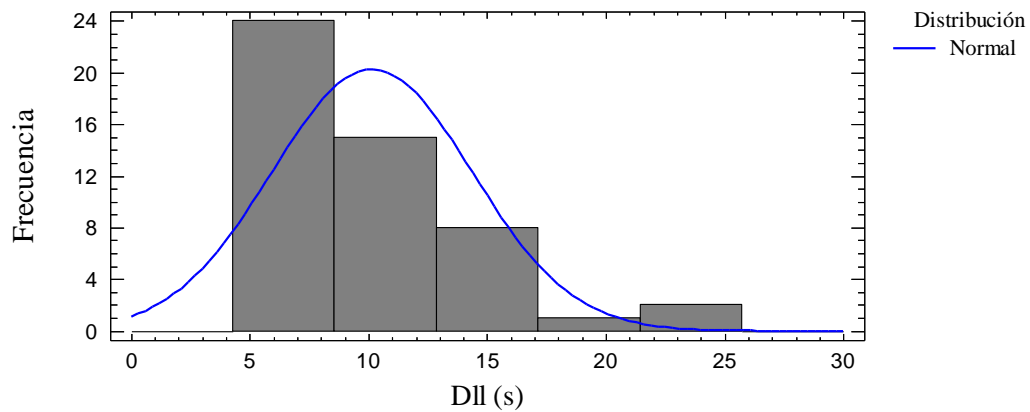
C2 *C. alba*

Histograma Dll para *C. alba*



C3 *P. radiata*

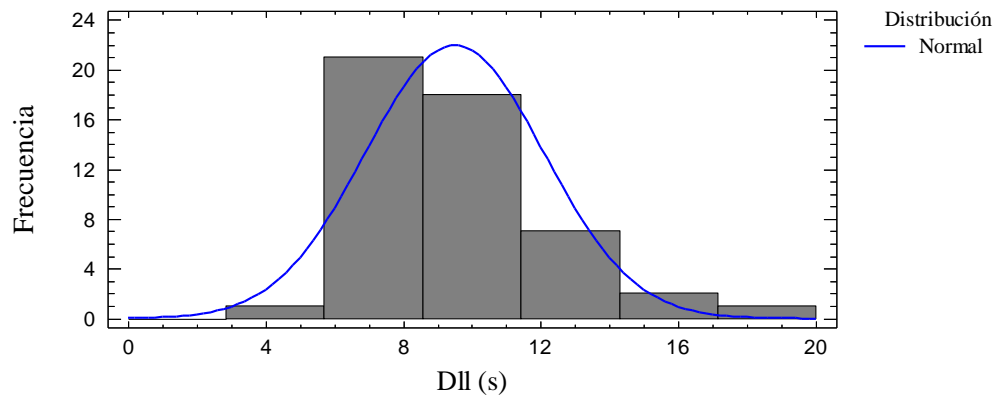
Histograma Dll para *P. radiata*





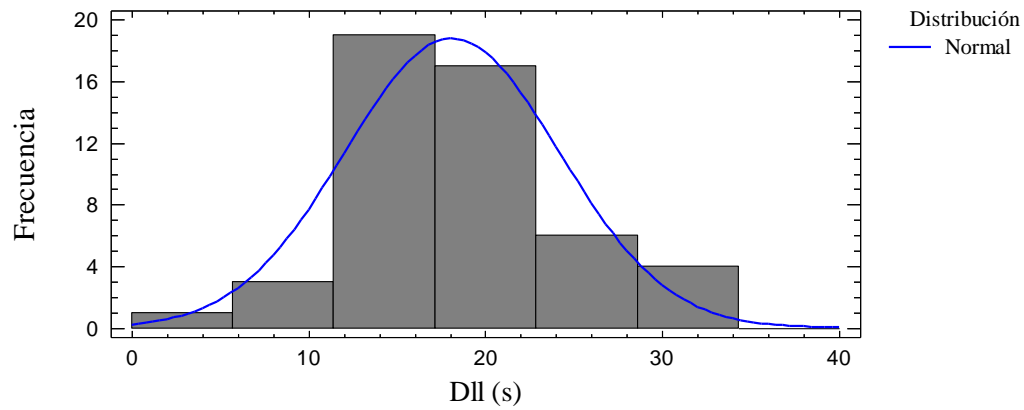
C4 *E. globulus*

Histograma Dll para *E. globulus*



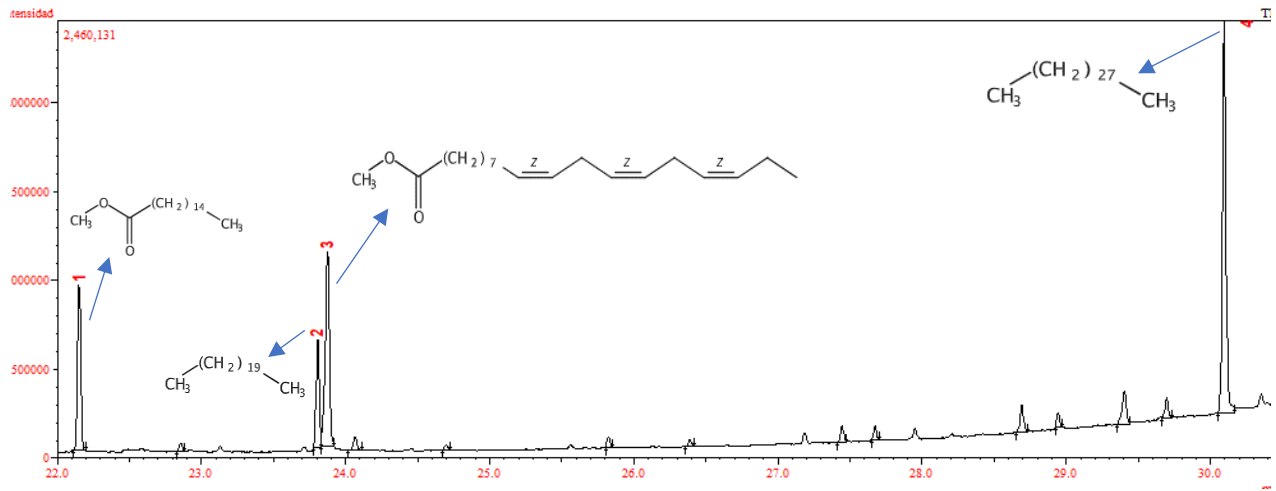
C5 *A. dealbata*

Histograma Dll para *A. dealbata*



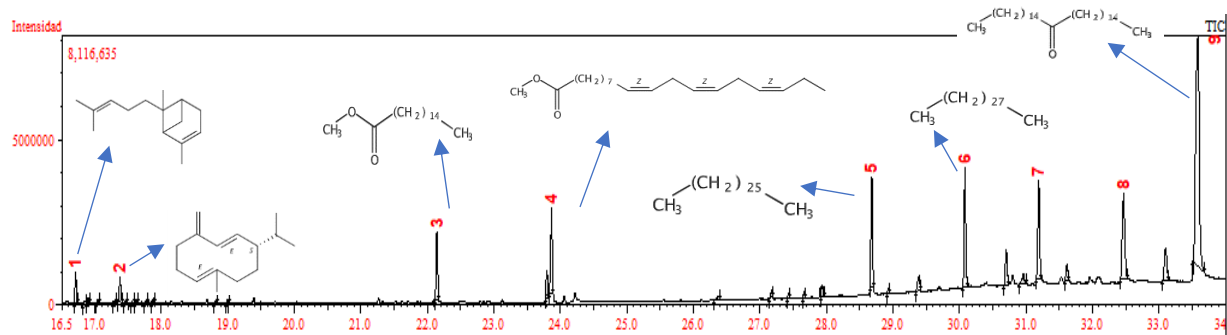
Anexo D: Cromatogramas especies verano 2019.

D.1 *Q. saponaria*



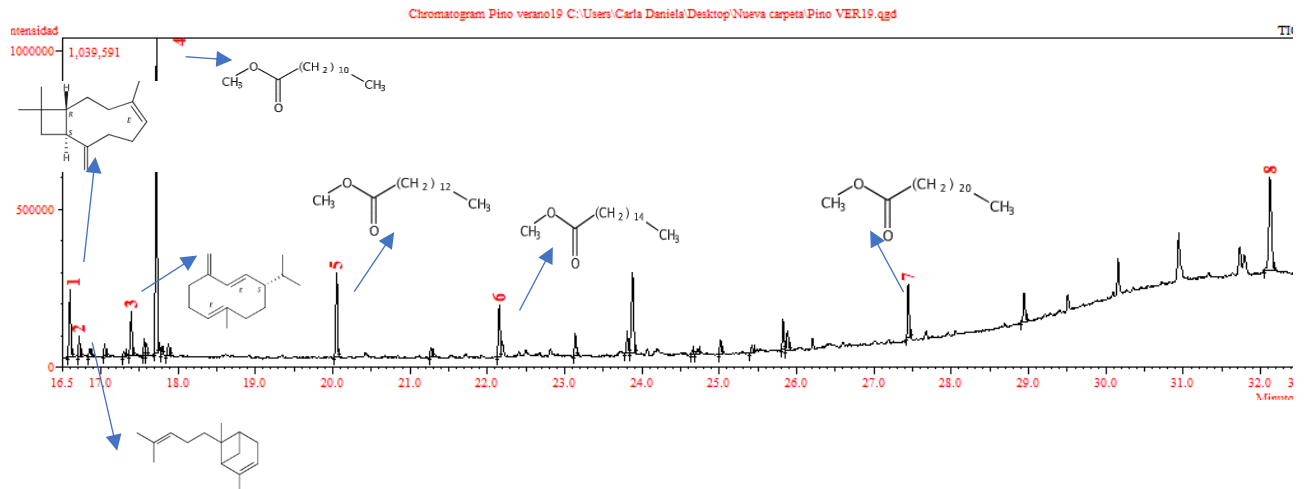
1: ácido palmítico, metil éster; 2: henicosano; 3: linolenato de metilo; 4: nonacosano.

D.2 *C. alba*



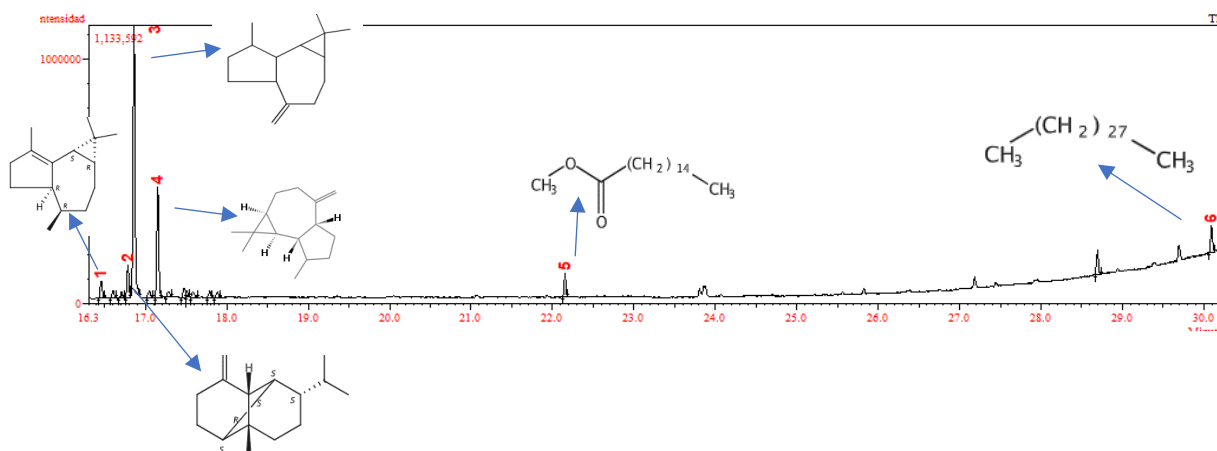
1: α -bergamoteno; 2: germacreno D; 3: ácido palmítico, metil éster; 4: linolenato de metilo; 5: heptacosano; 6: nonacosano; 7: hidrocarburo desconocido; 8: hidrocarburo desconocido. 9: 16-hentriacontanona

D.3 *P. radiata*



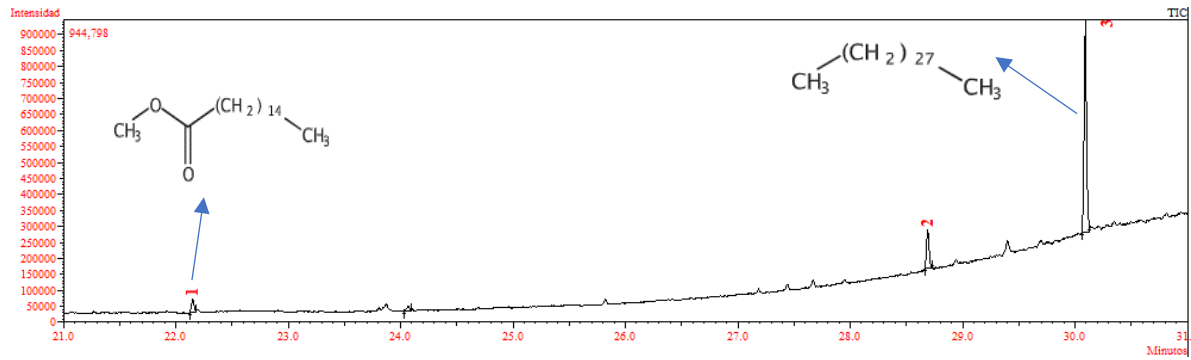
1: (E)- β -cariofileno; 2: α -bergamoteno; 3: germacreno D; 4: ácido láurico, metil éster; 5: tetradecanoato de metilo; 6: ácido palmítico, metil éster; 7: ácido docosanoico, metil éster.; 8: triterpeno desconocido.

D.4 *E. globulus*



1: α -gurjunene; 2: beta-copaene; 3: aromadendreno; 4: aloaromadendreno; 5: ácido palmítico, metil éster; 6: nonacosano.

D.5 A. dealbata



1: ácido palmítico, metil éster; 2: desconocido; 3: nonacosano.