



UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE TITULACIÓN
MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA

**COMPORTAMIENTO DEL FUEGO A ESCALA EXPERIMENTAL EN UNA
PLANTACIÓN DE *Tectona grandis* Linn F. EN JIPIJAPA, MANABÍ, ECUADOR**

AUTOR:

Orlando Gabriel Pico Coronel

JIPIJAPA - MANABÍ - ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE TITULACIÓN
MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA

**COMPORTAMIENTO DEL FUEGO A ESCALA EXPERIMENTAL EN UNA
PLANTACIÓN DE *Tectona grandis* Linn F. EN JIPIJAPA, MANABÍ, ECUADOR**

AUTOR:

Orlando Gabriel Pico Coronel

TUTOR:

Ing. Marcos Pedro Ramos Rodríguez, Dr.C.

JIPIJAPA - MANABÍ - ECUADOR

2018

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Marcos Pedro Ramos Rodríguez, Dr.C., Catedrático de la Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, certifico que el Señor Orlando Gabriel Pico Coronel ha realizado el Proyecto de Investigación intitulado “Comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. en Jipijapa, Manabí, Ecuador”, bajo la dirección de quien suscribe, habiendo el estudiante cumplido con las disposiciones y requisitos que para el efecto se requiere.

Jipijapa, 19 de Febrero del 2018



Ing. Marcos Pedro Ramos Rodríguez, Dr.C.
DOCENTE TUTOR

APROBACIÓN DEL INFORME POR EL TRIBUNAL

PROYECTO DE INVESTIGACION

**APROBADO POR EL TRIBUNAL DE TITULACIÓN DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y LA AGRICULTURA**

Dr. Colon Alfredo González Vázquez, Mg.Sc.
PRESIDENTE



Ing. Mónica Virginia Tapia Zúñiga, Mg.Sc
MIEMBRO PRINCIPAL



Ing. Alfredo Jimenez González, Dr.C.
MIEMBRO PRINCIPAL



Ing. Cristóbal Gonzalo Cantos Cevallos, Dr.C.
MIEMBRO PRINCIPAL



DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a Dios y a mis padres, por darme el apoyo para salir adelante. Me siento contento y orgulloso de haber concluido esta primera etapa en mi vida de las muchas más que tengo que cumplir.

A mis hermanos Gabriela, Bernardo, Nathaly, Johan y a mi sobrino Mateo que son parte importante en mi vida.

Además, a todos y cada uno de los profesores que a lo largo de este tiempo me inculcaron los aprendizajes necesarios en especial. Gracias a ellos quienes me inculcaron los valores y principios transformándome en una persona capaz de resolver mis propios problemas y conseguir los objetivos propuestos.

Orlando Gabriel Pico Coronel

RECONOCIMIENTO

Mis sencillos reconocimientos, a la Universidad Estatal del Sur de Manabí, a los docentes de la Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, y sobre todo al Dr.C. Marcos Pedro Ramos Rodríguez, tutor del proyecto de investigación por la orientación y apoyo brindado para culminar el presente trabajo.

A mis padres por apoyarme en todo sentido a lo largo de mi vida.

Orlando Gabriel Pico Coronel

ÍNDICE

PORTADA

CONTRAPORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	¡Error! Marcador no definido.
APROBACIÓN DEL INFORME POR EL TRIBUNAL.....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	iv
RECONOCIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
RESUMEN.....	viii
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
3.1. Especie forestal <i>Tectona grandis</i>	4
3.1.1. Descripción botánica y taxonomía.....	4
3.1.2. Importancia de la especie	5
3.2. Conceptos sobre fuegos en los bosques	6
3.2.1. Incendios forestales.....	6
3.2.2. Proceso de combustión en los incendios forestales.....	7
3.2.3. Características de los incendios forestales	8
3.2.4. Quemadas prescritas y quemadas controladas	11
3.4.4.1. Técnicas de quema	12
3.4.4.2. Métodos de quema	15
3.3. Efectos del fuego	16
3.4.1. Parámetros del comportamiento del fuego	19
3.4.2. Factores que afectan el comportamiento del fuego.....	21
3.4.2.1. Condiciones meteorológicas.....	21
3.4.2.2. Topografía.....	23
3.4.2.3. Propiedades del material combustible.....	24
3.4.2.4. Clasificación del material combustible.....	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS	32
4.1. Caracterización del área experimental	32
4.2. Delimitación del área experimental y colecta de datos.....	33
4.3. Caracterización de los combustibles	34
4.4. Evaluación de parámetros del comportamiento del fuego	35

4.5. Correlación entre variables	36
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	37
5.1. Condiciones meteorológicas y características de los combustibles	37
5.2. Parámetros del comportamiento del fuego	38
5.3. Análisis de correlación	40
6. CONCLUSIONES.....	42
7. RECOMENDACIONES	43
8. BIBLIOGRAFÍA.....	44

RESUMEN

Una de las alternativas para disminuir las ocurrencias y la propagación del fuego, es reducir la cantidad de combustible depositado en el piso del bosque utilizando quemas prescritas, técnica que debe ser suficientemente argumentada a través de investigaciones científicas. Este trabajo tuvo el objetivo de analizar el comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Fueron delimitadas 10 parcelas de 2 m x 5 m en las que se aplicó el fuego utilizando la técnica de quema a favor del viento. Durante el desarrollo del experimento fueron medidas la velocidad del viento y la humedad relativa del aire a 0,50 m de altura del suelo y 1 m de distancia del extremo de la parcela por donde se inició el fuego. También se midió la dirección del viento. Para caracterizar el material combustible se obtuvieron informaciones sobre peso, espesura y contenido de humedad antes y después de la quema. Los parámetros del comportamiento del fuego considerados fueron velocidad de propagación, altura de las llamas, intensidad lineal del fuego y calor liberado por unidad de área. También se determinó la relación existente entre las variables utilizadas en el experimento. Se obtuvieron valores medios de cantidad de material combustible, profundidad de quema, altura de las llamas, velocidad de propagación del fuego e intensidad lineal de 0,46 kg.m⁻²; 0,58 cm; 0,57 m; 0,0101 m.s⁻¹ y 16,49 kcal.m⁻¹.s⁻¹, respectivamente.

1. INTRODUCCION

Incendios forestales catastróficos se desarrollaron durante el pasado año 2017 en Chile, California, Portugal y España. También en otros países se reportaron incendios de menores dimensiones. Estos fenómenos son un problema multicausal que provocan impactos multidimensionales en los ámbitos ecológicos, económicos y sociales, relacionados con los procesos de cambio climático global y la desertificación.

Los incendios forestales o de la cobertura vegetal, según Parra-Lara y Bernal-Toro (2011), afectan casi todas las ecorregiones de la Tierra, y en los trópicos y subtrópicos se presentan con mayor frecuencia (OIMT, 1997; Cochrane, 2003) debido principalmente al descontrol del fuego usado con propósitos agrícolas y pecuarios por los productores y comunidades rurales en ambientes con condiciones meteorológicas favorables para su propagación. Aunque estos incendios (Barlow y Pérez, 2004; Myers, 2005) presentan variaciones importantes en magnitud e impacto en contextos biofísicos y socioeconómicos distintos, tienen características comunes: la amenaza que representan para los ecosistemas, la biodiversidad, el clima, la vida y la salud humana, y para las economías locales y nacionales.

Los incendios forestales constituyen uno de los principales agentes de perturbación de los ecosistemas del planeta, donde millones de hectáreas son afectadas cada año. La elevada presión de las actividades humanas y el calentamiento global están incrementando la frecuencia, intensidad y tamaño de estos incendios, con importantes consecuencias tanto para las comunidades naturales como para la sociedad en su conjunto (Gómez-González, 2013).

La acumulación de material combustible sobre el piso de los bosques a lo largo de los años aumenta drásticamente el riesgo de incendios. Una de las alternativas para disminuir este riesgo o disminuir el potencial de daños es reducir periódicamente la cantidad de material combustible en el interior de los rodales mediante la ejecución de quemadas prescritas.

Tanto en el Cantón Jipijapa como en la provincia de Manabí y otras de la República del Ecuador, los productores de madera de *Tectona grandis* Linn F. tienen por costumbre quemar el material combustible existente bajo el dosel del bosque. Esta práctica se sustenta en las ideas de que con la quema aumenta la belleza de la madera, se favorece el incremento de las plantas y se limpia con facilidad el área. Sean estas ideas mitos o realidad, lo cierto es que todos los años se utiliza el fuego en los rodales de esta especie, alcanzando en algunos casos un comportamiento no deseado que pone en peligro el desarrollo adecuado de los árboles, lo cual ocurre también cuando en ocasiones el fuego llega a estos rodales proveniente de las áreas agrícolas colindantes.

En correspondencia con todo lo anterior es razonable desarrollar investigaciones que permitan establecer criterios con bases científicas según los cuales se pueda continuar utilizando el fuego en las plantaciones de *T. grandis* sin afectar el desarrollo de los árboles a la vez que esta técnica, al evitar la acumulación de combustibles, sería una medida preventiva eficiente para evitar el surgimiento y propagación de incendios forestales.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. en Jipijapa, Manabí, Ecuador

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el material combustible existente en el área experimental.
- Evaluar parámetros del comportamiento del fuego tales como velocidad de propagación, altura de las llamas, intensidad lineal de fuego y calor liberado por unidad de área en el área experimental.
- Determinar la correlación existente entre las variables utilizadas en el experimento.

3. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Especie forestal *Tectona grandis*

La especie *T. grandis* pertenece a la familia Verbenaceae y es originaria del sureste asiático. Su madera es altamente valorada por sus características tecnológicas y belleza, considerándose de primera clase. Combina cualidades como dureza, durabilidad y resistencia al ataque de termitas. Se utiliza para la construcción de puentes, yates, muebles, carpintería en general, enchapados y contra enchapados, madera para parques, postes y duela utilizados en la fabricación de barriles (Chávez y Fonseca, 1991; Mascareñas *et al.*, 1993; citados por Abdelnour y Muñoz, 2005).

Ladrach (2009), planteó que la teca es caducifolia, por tanto, pierde sus hojas durante la temporada seca. La teca puede aguantar sequías severas, tales como las que ocurren en el oriente de Java, en donde hay muy poca precipitación durante cinco meses del año. Además, la teca se adapta bien a sitios húmedos y se planta exitosamente en la isla de Borneo en lugares en donde hay lluvia durante todo el año y no hay una verdadera temporada seca.

De manera similar a muchos pinos tropicales tal como *Pinus caribaea* y *Pinus oocarpa*, la teca tiene una corteza bastante gruesa lo cual le permite resistir bien el calor de los incendios. Una vez que los árboles alcanzan alturas de 8 a 10 m y diámetros mayores de 10 a 15 cm, ya se han desarrollado lo suficiente como para tener una buena resistencia a los incendios (Centeno, 2004; citado por Ladrach, 2009).

La resistencia a los incendios es una ventaja importante para el manejo de la teca en turnos largos para aserrío y es un factor a tomar en cuenta cuando se contempla una inversión en plantaciones forestales (Ladrach, 2009).

3.1.1. Descripción botánica y taxonomía

La *T. grandis* es un árbol caducifolio de fuste recto que puede alcanzar los 30 m de altura, con corteza áspera y fisurada de color café claro. Los árboles generalmente presentan dominancia apical, que se pierde con la madurez o cuando florece a temprana edad, originando una copa más amplia con ramas numerosas. Las hojas son simples opuestas

de 11 a 85 cm de largo y de 6 a 50 cm de ancho, con peciolos gruesos. Su madera tiene buena demanda por su calidad y color (Ministro de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca [MAGAP], 2014).

La nomenclatura de la especie *Tectona grandis* L. f se muestra a continuación:

Reino: Plantas

Filum: Spermatophyta

Subphylum: Angiospermae

Clase: Dicotyledonae

Orden: Lamiales

Familia: Lamiaceae (Verbenaceae)

Género: *Tectona*.

Especie fenólica: *Grandis*.

Nombre científico: *Tectona grandis*.

(Centro de Biociencia Agrícola. CAB Internacional 2000, citado por Intriago, 2015)

3.1.2. Importancia de la especie

La teca es la especie de madera tropical de calidad más cultivada en el mundo. Sus cualidades ambientales son aceptables y, aunque se cultiva como especie exótica en muchos países, no es invasora (no amenaza a los ecosistemas locales). Además, junto con *Gmelina* y varias especies de pino, aparece en rodales puros en el bosque natural. Si se cultiva mediante buenas prácticas de manejo, la amenaza de erosión del suelo es mínima. Su manejo silvicultural es bien entendido. Entre las razones por las cuales es bastante usada en plantaciones están: es de fácil propagación, establecimiento y manejo y su madera es de excelente calidad. La reputación de la teca se debe a las propiedades de su madera: fuerte, liviana, durable, estabilidad dimensional; no se corroe en contacto con metales; buena trabajabilidad y dureza; resistente a las termitas, productos químicos, hongos y la intemperie (Keogh, 2013).

Según el autor anteriormente citado, la teca se emplea en una gran variedad de usos tradicionales y actuales; entre ellos, muebles de calidad, elementos estructurales, carpintería, chapas, pisos y usos marinos. Tradicionalmente se ha usado en la fabricación de puentes y embarcaderos.

3.2. Conceptos sobre fuegos en los bosques

3.2.1. Incendios forestales

Aunque parezca simple, este término no es asumido siempre por todos por igual, siendo con frecuencia muy discutido por las personas que se relacionan de una u otra forma con la protección contra incendios forestales. Hoy puede decirse que no se ha llegado a un consenso internacional en cuanto a si el incendio forestal es sólo cuando el fuego afecta a áreas cubiertas de bosques o si lo es también cuando se afectan otras áreas de vegetación silvestre (pastos, arbustos, gramíneas, vegetación de ciénaga, etc.). Igualmente se discute el problema de considerar o no como incendio forestal fuegos que han afectado menos de una hectárea de superficie (Ramos, 2010).

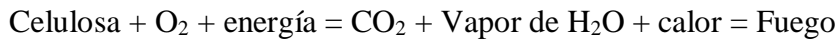
La FAO (1986), definió al incendio forestal como aquel fuego que ocurre sobre vegetación silvestre excepto los fuegos bajo prescripción. Esta definición es utilizada, en su esencia, por distintos autores, aunque en ocasiones tratan de ampliar la definición, especificando por ejemplo que son fuegos que queman incontroladamente tierras cubiertas total o en parte por árboles, arbustos, pastos, gramíneas, u otra vegetación inflamable.

Otros autores consideran el incendio forestal solo cuando el fuego afecta áreas cubiertas de bosques. Un ejemplo en este caso puede ser la definición dada por Batista (1990), quien planteó que es la combustión no controlada que se propaga libremente consumiendo los combustibles naturales de un bosque tales como: litera, gramíneas, ramas, hojas, troncos caídos y hasta la vegetación viva dependiendo de la intensidad.

De forma general se distinguen tres características fundamentales en los conceptos que desarrollan distintos autores. Primero que el fuego no esté confinado, es decir, que no esté encerrado en un área por líneas de control; segundo, que el fuego se propague libremente, es decir, que no se desarrolle bajo determinadas prescripciones; y tercero, que el fuego afecte vegetación forestal (Ramos, 2010).

3.2.2. Proceso de combustión en los incendios forestales

La combustión es un proceso físico – químico que consisten en una oxidación rápida que se lleva a cabo a altas temperaturas consumiendo oxígeno y combustible y que deja como resultado final un residuo que consiste mayormente en sales minerales (cenizas).



El Triángulo del fuego representa gráficamente los 3 elementos de la combustión. La combustión se interrumpe y el fuego se extingue, cuando uno o más de dichos componentes dejan de intervenir en la reacción (Ramos, 2010)

El oxígeno es uno de los elementos componentes del aire atmosférico. Normalmente está en una proporción del 21 %. Distintos estudios han demostrado que una reducción del mismo por debajo del 15 %, hace imposible el desarrollo de la combustión.

El calor es necesario para calentar al material combustible hasta el punto de inflamación. Este calor es suministrado por una fuente determinada, que, en el caso de los incendios forestales, coincide con las causas que los originan.

El combustible es fundamental para la ocurrencia y propagación del fuego. Es uno de los componentes tanto del triángulo de la combustión como del triángulo de la propagación. Todo lo que se encuentra en el bosque, es combustible.

Soares (1985), planteó que corresponde al material combustible disponible aproximadamente el 70 – 85 % de la cantidad total de combustible con diámetro inferior a 2,5 cm. Groski (2000), Batista (1995) y Vega *et al.* (2000) citados por Martínez (2006), reportaron reducciones del mantillo de un 92,7 % en áreas naturales de *Mimosa scabrella* Benth. (Bracatinga), un 30 % en plantaciones de *Pinus taeda* y una reducción de la hojarasca de más del doble en pinares de Galicia, España, en la primera aplicación del fuego prescrito respectivamente. Batista (1995) citado por Martínez (2006), obtuvo valores para la velocidad de propagación en plantaciones de *Pinus taeda* para las quemas a favor del viento, que normalmente representan una mayor velocidad debido a la influencia del viento. Por su parte Johansen (1975), encontró velocidades entre 0,0762 y 1,09 m.s⁻¹ en quemas a favor del viento en plantaciones de *Pinus elliottii*, mientras que

Vega *et al.* (2000), afirmó que el pH suele aumentar en suelos quemados por fuego prescrito debido al aporte de cationes procedente de las cenizas, aunque dependiendo de la intensidad de la quema y otras características edáficas, puede no haber cambios apreciables.

Por otra parte Batista (1995) citado por Martínez (2006), hizo referencia a que cuando la materia orgánica del suelo es quemada, las sustancias netas contenidas son liberadas en forma de óxidos o carbonatos que generalmente presentan reacción alcalina. De ese modo, cuando las cenizas son depositadas en el suelo la tendencia es a disminuir la acidez.

3.2.3. Características de los incendios forestales

Bajo esta denominación se tratan características tales como: tipos, formas, partes y dimensiones de los incendios.

La clasificación más apropiada y utilizada para definir los tipos de incendios se basa en el grado de participación de cada estrato de combustible forestal, desde el suelo mineral hasta la copa de los árboles, en el proceso de la combustión. En este caso los incendios son clasificados en subterráneos, superficiales y de copa (Ramos, 2010).

Los incendios superficiales se propagan por la superficie del suelo forestal, quemando los restos vegetales no descompuestos, tales como hojas y ramas caídas, gramíneas, arbustos, y otros materiales hasta cerca de 1,80 m de altura. Esos materiales, principalmente en el periodo de seca son bastante inflamables, por eso los incendios superficiales presentan propagación relativamente rápida, abundancia de llamas y mucho calor. No obstante, comparados con otros tipos, los incendios superficiales no son muy difíciles de combatir a no ser en condiciones extremadamente favorables a la propagación de los mismos. Los incendios superficiales son los más comunes entre los tipos de incendios y generalmente es la forma por la que comienzan todos los incendios. Un incendio superficial puede, y muchas veces ocurre, quemar árboles enteros, cuando el fuego sube por el fuste hasta las copas.

Los incendios subterráneos se propagan a través de las capas de humus y turba existentes sobre el suelo mineral y debajo del piso del bosque. Esos combustibles son de textura fina, relativamente compactados y aislados de la atmósfera. Estos ocurren

generalmente en bosques que presentan una gran acumulación de humus y en áreas pantanosas y cenagosas, que cuando se secan forman espesas capas de turba debajo de la superficie. Normalmente son precedidos por incendios superficiales.

Debido al poco oxígeno disponible en la zona de combustión, durante este tipo de incendio, el fuego se propaga lentamente, sin llamas y con poco humo. Por esta razón son difíciles de ser detectados y combatidos. La intensidad del calor y el poder de destrucción de estos incendios son bastante altos. Además de causar la muerte de las raíces y consecuentemente la de los árboles, pueden dañar seriamente la microbiología y la fertilidad del suelo, favoreciendo también la ocurrencia de la erosión. Este es el tipo de incendio menos común. En Cuba ha sido reportado en la Ciénaga de Zapata.

Los incendios de copa se caracterizan por la propagación del fuego a través de las copas de los árboles, independientemente del fuego superficial. Generalmente se considera incendio de copa aquel que ocurre en combustibles por encima de 1,80 m de altura. Con excepción de casos poco frecuentes en los cuales los incendios son causados por rayos, todos los incendios de copa se originan de incendios superficiales. Las condiciones fundamentales para que ocurran incendios de copa son follaje inflamable y presencia de viento para transportar el fuego de copa en copa. Durante los incendios de copa el follaje de los árboles es totalmente consumido por el fuego, ocasionando altas tasas de mortalidad en el bosque.

Forma: Esta característica se refiere a la forma del área quemada. Tres variables ejercen en la misma una influencia decisiva. Ellas son: pendiente del terreno, velocidad del viento, y homogeneidad del material combustible (Ramos 2010).

Un incendio superficial siempre comienza por una pequeña fuente de energía. Al comienzo tiende a propagarse hacia todos los lados de forma aproximadamente circular. Esta propagación continuaría siempre así, si no fuera por la influencia de los factores que determinan el comportamiento de los incendios. En terrenos planos el viento es el primer factor en manifestar su influencia, transformando la forma inicial de propagación de circular para ligeramente elíptica, donde uno de los lados se propaga más rápidamente que los otros. A pesar de ser el viento, tal vez la variable más importante relacionada con

la forma y dirección del incendio, no se puede olvidar a la topografía. Tanto el viento como la topografía juegan un papel importante en la transferencia del calor por radiación y convección. En el periodo inmediatamente después de la inflamación, el viento tal vez sea el factor dominante, pero a medida que la intensidad del fuego aumenta, la topografía asume el carácter dominante, especialmente en áreas de fuertes pendientes.

Las tres formas clásicas para los incendios forestales son:

- Circular, cuando se propagan en terreno llano, sin viento y con combustibles homogéneos
- Elíptica, cuando se propagan en terrenos inclinados, con materiales combustibles heterogéneos y/o con viento
- Irregular, cuando se propagan sobre terrenos con pendientes, con vientos variables y con combustibles heterogéneos

Las partes del incendio es una característica muy utilizada durante las actividades de extinción de los incendios y durante la evaluación de las mismas. Las partes fundamentales de un incendio forestal son el frente o cabeza, la cola, los flancos y el borde. El frente o cabeza es la parte que avanza con mayor intensidad y velocidad. La cola es la parte que avanza, a menor velocidad, en dirección opuesta al frente. En ocasiones puede extinguirse sola. Los flancos se propagan perpendicularmente a la dirección principal de avance del incendio y se ubican entre el frente y la cola. Su velocidad será menor que la del frente y mayor que la de la cola. El borde es el perímetro del área del incendio que se encuentra ardiendo. Cambios en las condiciones del viento y las características topográficas, pueden desarrollar otros frentes de fuego a partir de los flancos. Generalmente los flancos son los mejores puntos para iniciar el combate (Ramos, 2010).

3.2.4. Quemias prescritas y quemias controladas

El fuego es uno de los métodos utilizados para lograr la modificación estructural de los combustibles. Esto a través de quemias controladas o de quemias prescritas, conceptos sobre los cuales se presentan en ocasiones discusiones entre los que se dedican a la actividad de los incendios forestales. Mientras unos autores usan ambos términos con igual significado, otros identifican diferencias evidentes.

Chandler *et al.* (1983), definió a la quema prescrita como la aplicación relativamente controlada del fuego a combustibles silvestres en su estado natural o modificado, bajo condiciones ambientales específicas que llevan a confinar el fuego en un área predeterminada y al mismo tiempo, producir una intensidad calorífica y tasa de propagación requerida para atender objetivos planeados de manejo de recursos naturales.

Haltenhoff (1998), planteó que la quema prescrita es la aplicación cuidadosa del fuego en un sector con vegetación que se desea eliminar, bajo condiciones ambientales que permitan mantener el efecto dentro de un área predeterminada y que al mismo tiempo sea posible lograr un comportamiento del fuego tal, que se obtengan precisamente los objetivos o beneficios perseguidos, con un mínimo de daños, y siempre a un costo razonable.

Este último autor definió a la quema controlada como el uso del fuego para eliminar vegetación en forma dirigida, circunscripta o limitada a un área previamente determinada conforme a técnicas y procedimientos preestablecidos y con el fin primordial de mantener el fuego dentro de la línea de control perimetral instalada.

De acuerdo con lo anterior puede decirse que existe una diferencia sustancial entre los dos conceptos, estando en presencia de una quema controlada cuando se pone fuego a un área delimitada por líneas de control, bajo determinadas condiciones atmosféricas y tomando las medidas necesarias para evitar que ese fuego pase dichas líneas de control, sin prescribir cuál será el comportamiento del fuego en ese lugar.

Mientras que la quema prescrita además de desarrollarse dentro de determinadas líneas de control, requiere un conocimiento detallado del área a quemar, del método y la técnica de quema a utilizar, de los factores climáticos, de la topografía, del combustible, de los objetivos que persigue la misma, y el establecimiento detallado de prescripciones sobre el comportamiento del fuego en el área, algo que no es necesario en las quemas controladas.

3.4.4.1. Técnicas de quema

Existen varias técnicas de quemas que pueden ser utilizadas para atender los objetivos propuestos sobre diferentes condiciones meteorológicas, topográficas y de material combustible. Tomando como base el comportamiento del fuego y la velocidad de propagación, el fuego puede moverse en la misma dirección del viento (quema a favor del viento), en la dirección opuesta al viento (quema contra el viento) o formando un ángulo recto con el viento (quema de flancos).

La quema a favor del viento es la más intensa, por presentar las más rápidas tasas de propagación, las más amplias zonas de quemas y las mayores longitudes de las llamas. La quema contra el viento es menos intensa, presentando las menores tasas de propagación, una estrecha zona de quema y pequeña longitud de las llamas. La quema en flancos presenta intensidades intermedias entre la quema a favor y la quema contra el viento (Wade y Lunsford, 1989).

La quema contra el viento (retroceso) consiste básicamente en hacer el fuego progresivo en dirección contraria al viento o en el sentido descendiente a la inclinación de la pendiente. El fuego es iniciado a lo largo de una línea de base preparada, que puede ser una trocha, un camino u otra forma de barrera, y se deja que se propague contra la dirección del viento (en el sentido del declive). Esta técnica es la más fácil y segura de los tipos de quema controlada (Batista, 1995).

La quema en fajas a favor del viento consiste en colocar una línea de fuego o una serie de líneas de fuego en un área, de tal forma que ninguna línea individual de fuego pueda desarrollar alta intensidad antes de encontrar otra línea o un corta fuego.

Puede ser usado para reducciones periódicas de combustible en el interior de plantaciones. Las principales desventajas de la quema en fajas a favor del viento es la necesidad de acceso al interior del área y el aumento de la intensidad en el encuentro de las líneas de fuego, tornándose mayor posibilidad de secado letal a las copas (Brown y Davis, 1973; Wade y Lunsford, 1989; De Ronde *et al.*, 1990).

La técnica de quema en flancos consiste en encender líneas de fuego paralelas a la dirección del viento, de modo que el fuego se propague formando un ángulo recto con la dirección del viento. Esta técnica requiere conocimientos considerables del comportamiento del fuego. Algunas veces se utiliza también para auxiliar la quema contra el viento en áreas de combustibles finos en condiciones climáticas muy húmedas (Wade y Lunsford, 1989; De Ronde *et al.*, 1990).

Las quemas en manchas consisten en emplear una serie de pequeños puntos o círculos de fuego que queman en todas direcciones, encontrándose antes que se tornen muy grandes y se propaguen violentamente. La coordinación perfecta del tiempo y del espacio que se encienden los puntos de fuego es fundamental para la aplicación de este método, se usa fundamentalmente en áreas de residuos de explotación (Batista, 1995).

La propagación desde estos puntos de fuego se va acelerar a medida que la liberación de calor aumenta, formando una activa columna de convección. En áreas mayores de 4,0 ha, una segunda serie de puntos de fuego (formando un anillo que envuelva a la primera) es iniciada, entre 15 y 30 metros del límite externo del área. Debido a la fuerte columna de convección creada en la región central, el fuego no se propaga con mucha intensidad en la dirección de los límites externos del área. Esta técnica generalmente puede ser usada en cualquier época del año (Batista, 1995).

Existen varias técnicas de quema que pueden ser utilizadas para alcanzar los objetivos bajo diferentes condiciones de clima, topografía y de combustibles. Los objetivos de la quema y los factores climáticos, deben estar estrechamente correlacionados con la técnica de quema, a fin de prevenir efectos dañinos a los recursos forestales (Batista, 1990).

Tomándose como base el comportamiento y la velocidad de propagación, el fuego puede moverse en la misma dirección del viento (quema a favor del viento), en la dirección opuesta al viento (quema contra el viento), o formando un ángulo recto con el viento (quema de flancos). La quema a favor del viento es la más intensa, por presentar la mayor velocidad de propagación, una amplia zona de quema y las mayores alturas de llama. La quema contra el viento, es todo lo contrario y la de flancos presenta intensidades intermedias entre las dos anteriores.

Las técnicas de quema más utilizadas son: quema contra el viento o en retroceso, quema en fajas a favor del viento, quema de flancos, quema por manchones, quema central o en círculos, y quema en “V” o Chevron.

De acuerdo con Rodríguez (1996), en todos los casos, primero hay que abrir una amplia brecha cortafuego perimetral a la parcela. En varias técnicas, primero se hace una brecha más amplia o una línea negra o una quema de ensanche, del lado contrario al avance del fuego, a partir de una línea base, en contra de la pendiente (y/o viento) para ampliar la brecha, antes de quemar o antes de que las llamas alcancen ese lado.

La quema contra el viento o en retroceso consiste básicamente en hacer que el fuego progrese en la dirección contraria al viento. Se inicia en un cortafuego natural o preparado previamente y es la técnica más fácil y segura siempre y cuando la dirección y velocidad del viento sean constantes. Esta técnica produce una altura mínima de la llama y puede ser utilizada en grandes concentraciones de combustibles.

Una desventaja puede ser el tiempo empleado para realizarla debido a su baja tasa de propagación, generalmente entre 0,0055 y 0,0166 m.s⁻¹. También es necesario que el viento tenga velocidades entre 6,5 y 16 km.h⁻¹ para que el humo se disipe y el calor no suba directamente para la copa de los árboles. La quema en fajas a favor del viento consiste en colocar varias líneas de fuego de forma tal que ninguna pueda desarrollar alta intensidad antes de encontrar otra línea de fuego o un cortafuego. La distancia entre las líneas de fuego depende de las condiciones locales, aunque generalmente varía entre 20 y 60 metros.

Con esta técnica se quema más rápido un área pero tiene la dificultad de que es necesario entrar a la misma y cuando las líneas se encuentran, la intensidad sube aumentando la altura de secado letal.

Martínez (2006), planteó que las quemas prescritas no pueden realizarse durante aquellos meses del año cuando no llueve o cuando llueve excesivamente. Deben realizarse durante la época del año que exista una alta probabilidad de que después de una lluvia ligera (menos de 10 mm), sucederá un periodo corto sin lluvia.

Brown y Davis (1973), recomendaron las quemas en el hemisferio norte, entre diciembre y marzo, en condiciones de uno a tres días sin lluvias y con vientos de dirección norte entre 4,8 y 16 km.h⁻¹, como los mejores.

3.4.4.2. Métodos de quema

Según Martínez (2001), en EE.UU. desde hace muchos años, aparte del encendido terrestre, se emplea el encendido aéreo, utilizando en la ignición el sistema DAID (Mecanismo de Ignición Aérea Retardada), también denominado mecanismo de la bola de Ping-Pong o el lanzallamas suspendido desde helicópteros. El sistema DAID utiliza esferas pequeñas de Permanganato Potásico inyectadas con *etilen – glycol* que se lanzan inmediatamente antes de que se produzca la reacción química y la llama consume la bola. Este sistema de Ping-pong se utiliza normalmente cuando los combustibles son homogéneos, en caso de discontinuidad o heterogeneidad se emplea el lanzallamas.

En Cuba se han utilizado métodos de encendido terrestres. Por mucho tiempo se utilizaron ramas secas o las hojas de distintas especies de palmas. En la actualidad es posible utilizar las antorchas de goteo (Ramos, 2010).

En Ecuador, para quemar los desechos de cosechas los campesinos utilizan cañas bien secas, que una vez encendidas, permiten hacer una línea de fuego sin dificultades. Este método es utilizado también por los bomberos cuando necesitan hacer una contracandela o una faja quemada.

3.3. Efectos del fuego

Los efectos del fuego, al igual que los de cualquier otro fenómeno, pueden ser negativos o positivos. Si son negativos, estarán relacionados con los daños o consecuencias negativas que producen. Si son positivos, estarán relacionados con sus beneficios o ventajas.

Los efectos del fuego dependen de la interacción del comportamiento del fuego y las características del sitio específico, tales como las especies, la edad de la vegetación y el tipo de suelo (De Ronde *et al.*, 1990).

Por su parte Atzet, *et al.* (1988), plantean que los efectos del fuego dependen de su variabilidad en el tiempo y en el espacio. La frecuencia, intensidad y duración varía en el tiempo; la extensión y distribución varían en el espacio. Estas variables definen el régimen de fuego que es dependiente del ambiente del fuego, siendo los tres factores más importantes en el mismo las condiciones climatológicas, los combustibles y la topografía. La fuente de ignición puede ser importante.

Según Chandler *et al.* (1983), el fuego, cuando se usa adecuadamente, puede ser muy efectivo y la herramienta menos costosa en el mantenimiento de la sanidad y la economía de los bosques productores.

El fuego introduce efectos negativos y positivos sobre las propiedades de los suelos. La magnitud de estos efectos depende fundamentalmente de los valores que muestren las variables del comportamiento del fuego tales como su intensidad lineal, la velocidad de propagación y el calor liberado por unidad de área. Las magnitudes de estas variables dependerán de factores como el combustible, la topografía y el tiempo atmosférico (Martínez *et al.*, 2004).

La eliminación de la cubierta vegetal, la combustión de la materia orgánica y la temperatura desarrollada por el fuego producen en el suelo cambios de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, cuya magnitud depende, por un lado, de la intensidad y duración del incendio y, por otro, de la disposición, estructura y grado de humedad del propio suelo. El calor consume parte de la materia orgánica y destruye los agregados, que

acaban dispersando los impactos de las gotas de lluvia. En el suelo descubierto tras el incendio, y frecuentemente ennegrecido por las partículas de carbón, con un albedo o poder de reflexión generalmente muy inferior al de una superficie cubierta de vegetación, aumentan la temperatura y la evaporación, al tiempo que disminuyen la absorción y retención de agua, la porosidad, la aireación y la capacidad de infiltración superficial. El balance suele ser una reducción de las disponibilidades de agua y un aumento de la escorrentía y del peligro de erosión. Otra alteración frecuente e importante en muchos suelos calcinados es la formación de capas impermeables al agua. Las sustancias hidrófobas presentes en el tejido esponjoso que forma el mantillo, al arder éste se condensan bajo la zona recalentada del suelo, a varios centímetros de la superficie, formando una capa que puede impedir el paso del agua (Ruiz, 2000).

La destrucción de árboles huecos en pie y de árboles muertos caídos tiene efectos negativos sobre la mayor parte de las especies de mamíferos (como los monos *tarsius*, los murciélagos y los lemures) y sobre las aves que anidan en las cavidades (Kinnaird y O'Brien, 1998).

Según Nasi *et al.* (2002), aunque el fuego es una perturbación natural frecuente en los bosques boreales, que se regeneran fácilmente después de un incendio, los incendios frecuentes de gran intensidad pueden alterar este equilibrio. A causa de los incendios extremadamente violentos que se produjeron en 1998, más de 2 millones de hectáreas de bosque de la Federación de Rusia han perdido la mayor parte de sus principales funciones ecológicas para un período que oscilará entre 50 y 100 años (Shvidenko y Goldammer, 2001). Los incendios intensos han tenido efectos negativos importantes sobre la diversidad vegetal. Son especialmente vulnerables las especies meridionales que se encuentran en el límite septentrional de su área de distribución geográfica. Por ejemplo, en Primorsky Kray (Federación de Rusia), los incendios de origen humano han contribuido a una reducción drástica de las poblaciones de 60 especies de plantas vasculares, 10 especies de hongos, ocho de líquenes y seis de musgo durante los dos o tres últimos decenios (Shvidenko y Goldammer, 2001). En los bosques quemados se reducen las poblaciones de mamíferos pequeños, aves y reptiles y también los carnívoros tienden a evitar las zonas quemadas.

3.4. Comportamiento del fuego

Algunas definiciones de comportamiento del fuego, pueden ser las siguientes:

El comportamiento del fuego se refiere a la manera en que el material combustible se inflama, cómo se desarrollan las llamas y cómo el fuego se propaga y presenta otros fenómenos (Heikkilä *et al.*, 1993; Rodríguez, 1966; citados por Ramos, 2010).

Soares (1985), planteó que comportamiento del fuego es un término general usado para indicar lo que el fuego hace, o sea, para describir las principales características de un incendio forestal.

Por su parte Rodríguez (1996), plantea que el comportamiento del fuego se refiere a la velocidad de propagación del incendio, su dirección de avance, su forma, el largo de llamas, su intensidad, la probabilidad de que se produzcan fuegos secundarios, se convierta de superficial a incendio de copas, etc.

Heikkilä *et al.* (1993), citados por Martínez (2006), plantearon que las condiciones climatológicas determinan el comportamiento del fuego, destacándose dentro de estas las variables precipitación, viento, temperatura y humedad relativa.

El comportamiento del fuego es un término que ha sido empleado para designar la forma de desarrollo del fuego y sus características físicas durante el transcurso del incendio. Corresponde al conjunto de efectos, principalmente de carácter físico y mecánico, que se observan en el ambiente afectado por la propagación del fuego Julio (2007).

El fuego tiene un papel relevante en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres, pero cuando se propaga sin control en selvas, bosques o vegetación de zonas áridas o semiáridas, contribuye directamente en el incremento de bióxido de carbono en la atmósfera y en la deforestación, con sus consecuencias como la erosión de los suelos o el cambio en la estructura y composición de los bosques (Ruíz, 2006).

El fuego ha sido una de las principales fuerzas evolutivas que han moldeado la estructura, la composición y la distribución geográfica de los ecosistemas con coberturas vegetales del mundo, al impactar sobre sus componentes estructurales, sus dinámicas, sus interrelaciones y sus procesos (Bond y Keeley, 2005; citados por Parra-Lara y Bernal-Toro, 2011).

3.4.1. Parámetros del comportamiento del fuego

Los parámetros del comportamiento del fuego utilizados en este trabajo se presentan a continuación:

a) Dimensiones de las llamas

Indirectamente esta variable puede ser estimada a partir de la intensidad lineal del fuego (Ecuación 1) o medida directamente en el momento de la quema.

$$h_c = 0,15 * I^{0,46} \quad (1)$$

Donde I = intensidad lineal del fuego en $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$; h_c = longitud de la llama en m

b) Tasa de propagación

Trabaud (1979) citado por Soares y Batista (1998), estudiando el comportamiento del fuego en las quemas de vegetación arbustiva de hasta 1,5 m de altura, obtuvo las Ecuaciones 2 y 3.

$$r = 0,066 * V^{0,439} * h_v^{0,345} \quad (2)$$

$$r = \frac{5,72 * V^{0,400} * h_v^{0,352}}{U^{1,12}} \quad (3)$$

Donde r = velocidad de propagación del fuego, en cm.s^{-1} ; V = velocidad media del viento, en cm.s^{-1} ; h_v = altura de la vegetación, en cm; U = contenido de humedad de la vegetación, en % del peso verde.

c) Intensidad lineal del fuego (Ecuación 4) (Byram, 1959, citado por Küçük *et al.* 2008).

$$I = H * w * r \quad (4)$$

Donde I = intensidad lineal del fuego en $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$; H = calor de combustión en kcal.kg^{-1} ($\pm 4000 \text{ kcal.kg}^{-1}$); w = peso del combustible disponible en kg.m^{-2} ; r = velocidad de propagación del fuego en m.s^{-1}

El calor de combustión del material húmedo se calcula a través de la Ecuación 5 (Soares, 1985).

$$H_w = Hd \left(\frac{100 - U/7}{100 + U} \right) \quad (5)$$

Donde H_w = Calor de combustión del material húmedo; Hd = Calor de combustión del material seco; U = contenido de humedad del material combustible en %

d) Calor liberado por unidad de área (Ecuación 6).

$$Ha = \frac{I}{r} \quad (6)$$

Donde Ha = calor liberado por unidad de área en kcal.m^{-2} ; I = intensidad del fuego en $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$; r = velocidad de propagación del fuego en m.s^{-1}

e) Altura de secado letal (Ecuaciones 7 y 8) (Van Wagner, 1973, citado por Ramos, 2010).

$$h_s = 0,385 * I^{2/3} \quad (7)$$

$$h_s = \frac{3,94.I^{7/6}}{(0,107.I + V^3)^{1/2} (60 - T)} \quad (8)$$

Donde h_s = altura de secado letal en m; I = intensidad del fuego en $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$; V = velocidad el viento en m.s^{-1} ; T = temperatura del aire en °C. La constante 60, asociada a la temperatura del aire, representa aproximadamente la temperatura letal del follaje de los árboles. De acuerdo con la estructura de la ecuación, la altura de secado letal es proporcional a la intensidad del fuego y a la temperatura del aire e inversamente proporcional a la velocidad del viento.

3.4.2. Factores que afectan el comportamiento del fuego

Los tres componentes que controlan el comportamiento del incendio son la meteorología, la topografía y los combustibles. Para que un incendio se desarrolle se necesita la interacción de factores biológicos que influyen en la ocurrencia y comportamiento de los incendios forestales, estos factores son principalmente el clima, el tiempo atmosférico, la topografía del lugar y el material combustible (De Bano, 1998). Siendo estos últimos una variable de gran importancia que determinan el peligro establecimiento y desarrollo de los incendios forestales, ya que estos materiales influyen directamente en el comportamiento del fuego.

3.4.2.1. Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas son otro de los factores que determinan la propagación del fuego. Según Batista (1990), existen pocas actividades que dependan más de los elementos meteorológicos que los bosques y el control de los incendios forestales. El tiempo, es decir, las condiciones meteorológicas, son el estado momentáneo de la atmósfera en un lugar determinado. Serían la temperatura, la humedad, la velocidad y dirección de los vientos, etc. en un momento determinado.

Temperatura: Tanto la del material combustible como la del aire atmosférico, afecta directa e indirectamente la probabilidad de ocurrencia y principalmente, el potencial de propagación de los incendios forestales (Soares, 1985). La temperatura del aire varía considerablemente tanto en tiempo como en espacio por varios motivos, la mayoría de los cuáles están relacionados con el calentamiento o enfriamiento de la superficie de la tierra.

La mayoría de los efectos de la temperatura son indirectos. La temperatura del aire raramente será un factor que determine si el fuego se va a iniciar o a continuar quemando.

La temperatura afecta la capacidad del aire de contener vapor de agua. Normalmente cuando la temperatura aumenta, la humedad generalmente decrece y de ese modo ayuda a bajar el contenido de humedad de los combustibles, aumentando las posibilidades de desarrollo de un incendio Ramos (2010).

El aire se calienta fundamentalmente por el calentamiento de la superficie de la tierra producido previamente por el sol. Diferencias en el calentamiento de la superficie produce contrastes en la temperatura del aire, que a su vez, pueden afectar los patrones de los vientos locales, las lluvias y las tempestades Ramos (2010).

Varios factores afectan la temperatura de la superficie por la reducción de la incidencia de la radiación del sol o por la absorción de calor emitido por la radiación de la tierra. Los principales factores son: ángulo del sol, duración del día y las nubes Ramos (2010).

Humedad atmosférica: Es un elemento clave en la determinación de las condiciones de un potencial incendio. Ella tiene un efecto directo en la inflamabilidad de los combustibles forestales y a través de las interrelaciones con otros factores del tiempo, presenta efectos indirectos sobre algunos aspectos del comportamiento del fuego Ramos (2010).

La humedad, en forma de vapor, se mezcla con otros gases de la atmósfera, pero manteniendo su propia identidad y características (Soares, 1985). Existen varias maneras de expresar la cantidad de vapor de agua presente en una cierta muestra de aire.

Humedad absoluta, por ejemplo, es la razón entre una masa de vapor de agua y el volumen de aire que contiene esa masa de vapor. La humedad específica es la razón entre la masa de vapor de agua y la masa de aire considerada. La humedad relativa es la razón, en porcentaje, entre la presión real de vapor de agua (cantidad de vapor de agua contenido en un cierto volumen de aire) y la presión máxima de vapor de agua (cantidad que este mismo volumen contendría si estuviera saturado), a una misma temperatura.

Precipitación: A pesar de ser un factor limitante tanto en la inflamación como en la propagación de los incendios, el efecto de la precipitación muchas veces es subestimado, tal vez por la gran evidencia de su influencia sobre el fuego.

Viento: Es el movimiento del aire de áreas de alta presión para áreas de baja presión. De manera general las áreas próximas al ecuador son más calientes y por tanto de menor presión. Además de esa circulación general en el sentido polos - ecuador. Se deben considerar otros efectos tales como el movimiento de rotación de la tierra, la fricción, la

topografía y las masas de agua. En función de esos efectos existen muchos otros movimientos locales que tornan bastante compleja la distribución de los vientos en la superficie terrestre (Soares, 1985). Agrega este autor que los vientos de origen local o vientos convectivos, causados por diferencias locales de temperatura, pueden ser tan importantes en la propagación de los incendios como los vientos producidos por la diferencia de presión en escala sinóptica, o macroescala. En muchas áreas los vientos locales predominan, sobreponiéndose a la circulación general de la atmósfera. Los vientos locales que más afectan la propagación de los incendios, los que deben ser cuidadosamente analizados en las operaciones de combate a los incendios son las brisas de mar y de tierra y los vientos de montañas y de valles.

El viento puede afectar el comportamiento del fuego en el bosque de diversas maneras:

- Acelera el secado de los combustibles, pues transporta el aire cargado de humedad
- Puede “avivar” ciertos materiales en brazas y estos dar origen al fuego
- Suministra oxígeno a la combustión
- Inclina las llamas hacia los combustibles que aún no se han quemado
- Puede producir focos secundarios por saltos del fuego principal
- Determina la dirección de propagación del fuego

3.4.2.2. Topografía

El término topografía se refiere a las características físicas de la superficie de la tierra. El conocimiento de la topografía es importante para comprender el comportamiento del fuego (Heikkilä *et al.*, 1993).

Se acostumbra decir que la topografía hace al clima y determina el tipo de combustible en un área determinada. Considerándose que el comportamiento del fuego es en gran parte el resultado del clima y del combustible disponible, puede decirse que la topografía dicta el comportamiento del fuego (Batista, 1990). Puede decirse que la topografía modifica a los otros componentes del triángulo de la propagación, los cuáles están presentes también en el triángulo de la combustión. También se caracteriza por ser el factor más constante, por lo que es más fácil predecir la influencia que tendrá en un incendio. La dificultad estaría en que no es posible modificarlo.

Según Lemos *et al.* (2010), citados por Amaral *et al.* (2017), el grado de inclinación del terreno es el más importante de los factores topográficos, y actúa especialmente en la velocidad de propagación. Los incendios quemar más rápidamente que mueren por encima de lo que mueren abajo, o sea, cuanto más empinada el terreno, mayor será la velocidad de propagación del fuego, debido al efecto de la convección y radiación sobre los combustibles que aún no han sido quemados.

3.4.2.3. Propiedades del material combustible

El material combustible es fundamental para la ocurrencia y propagación del fuego. Es uno de los componentes tanto del triángulo de la combustión como del triángulo de la propagación. Todo lo que se encuentra en el bosque, es combustible.

En un incendio, el foco calórico que lo inicia suele ser puntual y efímero (un rayo, una colilla, etc.). Si no existiera combustible suficiente alrededor de ese punto que desprenda calor para continuar el proceso de combustión iniciado, lo que se denomina “reacción en cadena”, el incendio se extinguiría por sí mismo (Vélez, 2000).

Batista y Soares (1997), plantearon que el material combustible es fundamental para la ocurrencia y propagación del fuego porque es uno de los componentes del triángulo del fuego. No hay posibilidad de ocurrencia de fuego si no hay combustible para quemar. La cantidad de combustible existente en un área indica si el fuego se va a propagar o no y determina la cantidad de calor que será liberada en la quema. Esa cantidad es generalmente expresada en toneladas por hectárea o kilogramos por m².

Los materiales combustibles tienen varias características, las cuales para su estudio pueden agruparse en intrínsecas (composición química y densidad, calor de combustión o poder calorífico) y extrínsecas (cantidad o carga, relación superficie/volumen, compactación o densidad aparente, humedad, continuidad y homogeneidad). A partir de estas características básicas se derivan otras dos: inflamabilidad y combustibilidad. (Arnaldos *et al.*, 2004).

a) Composición química y densidad: Los tejidos de las plantas están formados esencialmente por moléculas orgánicas de cadena larga denominadas polímeros, con un contenido aproximado de 50 % de carbono, 44 % de oxígeno y 5 % de hidrógeno (% en masa). Las moléculas cuantitativamente más importantes son la celulosa, hemicelulosa y la lignina, pero las plantas tienen también otros compuestos (como los terpenos y las resinas) que, aunque son cuantitativamente mucho menos importantes, tienen un papel relevante en la inflamabilidad de los vegetales. Otros componentes minoritarios que pueden influir en relación a la inflamabilidad son los minerales (Arnaldos *et al.*, 2004). Según los mismos autores, el calor de combustión de la celulosa y de la hemicelulosa es de $16\,103\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que el de la lignina es de $24,4\cdot 103\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, sin embargo, como que esta última solo volatiliza el 50 % aproximadamente, en realidad contribuye menos a la propagación del incendio (combustión con llama). El resto queda en forma de carbón y quema en forma de brasa (combustión incandescente). Los terpenos son sustancias olorosas con un punto de ebullición bajo, por lo que volatilizan fácilmente. Su contenido en las hojas varía generalmente entre el 0 y el 2 %. Las resinas son compuestos poco volátiles formados por ácidos grasos, ácidos resínicos y fitoesteroles. Los terpenos y las resinas consideradas conjuntamente, tienen un calor de combustión de aproximadamente $32,2\cdot 103\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, un poco más del doble de la celulosa. Esto produce más poder calorífico en los incendios de combustibles ricos de estos compuestos. Los minerales son componentes minoritarios de los vegetales, pero pueden influir en el proceso de combustión. Los vegetales ricos en minerales queman con más dificultad y forman llamas más pequeñas que los que son pobres en minerales.

La densidad (masa por unidad de volumen) de los combustibles vegetales varía en función de la humedad. El contenido en agua de las plantas es variable, y afecta tanto a la densidad como al volumen. Considerando el combustible seco, los valores de densidad están comprendidos entre 320 y $720\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Arnaldos *et al.*, 2004).

b) Calor de combustión o poder calorífico: La energía que mantiene la reacción de combustión es el poder calorífico o calor de combustión el cual puede ser definido como la cantidad de calor liberada cuando este material fue sometido a una quema completa. El poder calorífico de los combustibles forestales varía de acuerdo con la especie y el tipo concreto de material combustible.

El poder calorífico es distinto, y a veces con valores muy distantes en maderas procedentes de copas, ramas, tocones, etc., de un mismo árbol, de distintos árboles de una misma especie y, desde luego, entre unas especies y otras, puesto que los componentes de la madera son distintos en tales circunstancias. Así, por ejemplo, un aumento del contenido de lípidos y proteínas eleva el poder calorífico de la planta (Elvira y Hernando, 1989).

Según estos autores, podría decirse que el poder calorífico de la madera varía en función de su constitución elemental (composición) y ésta es consecuencia de la vida del árbol, suelo, clima, especie, época de corta, humedad del material, etc. Ello es lógico puesto que, en definitiva, el calor desprendido en la combustión es el mismo que la planta ha logrado acumular del sol durante su formación, a través de sus hojas que son realmente pequeños captadores solares.

c) Cantidad o carga de combustible: La cantidad o carga de material combustible indica si el fuego se va o no a propagar y determina la cantidad de calor liberado por el fuego durante el incendio. De acuerdo con algunas investigaciones, debe existir un mínimo de $1,23 \text{ t.ha}^{-1}$ de material combustible fino, seco, disperso en un área para que un incendio superficial pueda propagarse. La intensidad del fuego es directamente proporcional a la cantidad de combustible que se quema y es un factor fundamental en la propagación de un incendio. Una cantidad grande de combustible aumenta las dificultades en el combate de los incendios, no solo por la cantidad de calor y la longitud de las llamas, sino también por las dificultades operacionales para tratar de romper la continuidad horizontal del material a través de cortafuegos.

La acumulación de materiales combustibles en el piso del bosque, constituye uno de los factores que determinan el riesgo de incendio cuando estos alcanzan niveles de continuidad y cantidad peligrosos. La cuantificación de los materiales combustibles se considera indispensable cuando se piensa realizar acciones preventivas contra los incendios y en particular si estas están enfocadas a la aplicación de quemas prescritas.

Para poder evaluar la efectividad de una quema de acuerdo con Sánchez y Zerecero (1983), se requiere conocer la cantidad de combustibles existentes en el bosque antes y después de efectuarla.

d) Relación superficie / volumen: Esta propiedad asocia la forma y el tamaño de los combustibles. De acuerdo con Rodríguez (1996), los combustibles más pequeños tienden a arder más fácilmente porque por cada unidad de volumen tienen una mayor superficie de contacto con las llamas, lo que le hará perder más rápidamente la humedad y alcanzar más pronto la temperatura a la que puede arder. Los valores altos en la relación superficie/volumen indicarán tamaño pequeño y mayor facilidad para arder que los valores bajos.

e) Compactación o densidad aparente del combustible: La compactación mide el volumen de aire en el interior del combustible forestal. A menor volumen mayor compactación y, en general, más dificultad para la propagación. Por el contrario, con compactaciones bajas el aire penetra con comodidad en el combustible y facilita la combustión (Arnaldos *et al.*, 2004).

Los mismos autores plantean que la compactación se acostumbra a expresar en términos de densidad aparente que se define como la masa de materia vegetal dividida por el volumen que ocupa en una determinada distribución. La densidad aparente es siempre menor que la densidad del material, ya que esta última no considera al aire, mientras que en la densidad aparente parte del volumen está ocupado por aire, es por esta razón que la densidad aparente es un buen indicador de la porosidad.

f) Humedad: Batista y Soares (1997), destacaron que la humedad del material combustible es el reflejo del clima y de las condiciones atmosféricas y puede variar rápidamente. El contenido de humedad del material vivo es más estable y mayor que el del material muerto. De este modo, el material muerto es más seco y responde más rápidamente a las variaciones meteorológicas, siendo por tanto el principal responsable de la propagación de los incendios. El contenido de humedad del material muerto puede presentar una gran variación, raramente descendiendo por debajo del 2 %, pudiendo exceder el 200 % después de largos periodos de precipitación.

El contenido de humedad de la vegetación viva es menos variable. En los materiales vivos que normalmente queman en un incendio de media o alta intensidad, tales como hojas y acículas verdes, ramas y arbustos de hasta 7 cm de diámetro, el contenido de humedad generalmente varía de 75 a 150 % de su peso seco. Este contenido de humedad varía según los estados de desarrollo de los vegetales, así se observa que los brotes nuevos al inicio del ciclo de crecimiento tienen alrededor del 300 % de humedad, el follaje maduro aun creciendo con vigor, alcanza el 200 %, el follaje maduro sin crecimiento, llega al 100 %, mientras que entrando en el periodo de latencia llegan tan solo al 50 %. Los materiales combustibles muertos tratan de alcanzar una humedad de equilibrio entre ellos y el ambiente. En este punto los materiales ni ganan ni pierden humedad. Cuando cambia la del ambiente, la de ellos también cambia. La velocidad con la que lo hacen nos da el tiempo de retardo (*timelag*).

Un término relacionado con la humedad del material combustible y utilizado por los especialistas y algunos sistemas de modelación del comportamiento del fuego, es la humedad de extinción. Esta se define como el contenido de humedad mínimo para que un combustible no arda. Al alcanzar esta humedad ya los combustibles están saturados. A partir de aquí no es posible el inicio de la combustión. Normalmente esta humedad para la madera es de 30 a 35 % aunque en algunas coníferas puede llegar al 45 %.

g) Continuidad y homogeneidad de los combustibles: La continuidad se refiere a la distribución de los combustibles, tanto horizontal como verticalmente. La continuidad controla parcialmente hacia donde el fuego puede ir y la velocidad con que se propaga. La continuidad horizontal puede ser entendida como una distribución uniforme o no de los combustibles. Afecta directamente las posibilidades de propagación de los incendios. La continuidad vertical de los combustibles se manifiesta a través de la disposición de los combustibles a diferentes alturas, como si fueran los peldaños de una escalera, es la responsable por la propagación de las llamas desde la base hasta las copas de los árboles (Ramos, 2010).

De acuerdo con el mismo autor, la homogeneidad de los combustibles está muy relacionada con la continuidad horizontal y vertical existente. Si existe una buena continuidad en un área determinada, pero además, esto se presenta en toda ella uniformemente, es decir, con una homogeneidad evidente, el fuego no encontrará dificultades para propagarse.

h) Inflamabilidad: La inflamabilidad de las especies vegetales se define por el tiempo transcurrido hasta que se emiten gases inflamables bajo la acción de un foco de calor constante (Instituto para la Conservación de la Naturaleza [ICONA], 1993).

Por su parte Trabaud (1976), citado por Hernando (2000), considera a la inflamabilidad como la propiedad que posee un vegetal para inflamarse desde que una fuente de calor entra en contacto con él, y la combustibilidad como la forma en que se queman los vegetales una vez que se han inflamado.

Según Delabrazze y Valette (1977) citados por Hernando (2000), la inflamabilidad viene caracterizada por la facilidad con la que se inflama un vegetal al ser expuesto a una radiación calorífica constante, y la combustibilidad por la mayor o menor facilidad a la que arde un vegetal, desprendiendo la energía suficiente para consumirse y provocar la inflamación de la vegetación vecina.

De acuerdo con Valette (1990), citado por Hernando (2000 y 2009), el conocimiento de la inflamabilidad resulta de utilidad para seguir la evolución del riesgo de inicio de incendios que presentan las principales especies, clasificar las especies según este criterio, integrar este criterio en los índices de riesgo de incendios, establecer mapas de riesgo a partir de los mapas de vegetación y orientar operaciones silvícolas.

Anderson (1970), citado por Hernando (2000), consideró la inflamabilidad de un combustible como el conjunto de los tres fenómenos siguientes: a) Ignitabilidad: facilidad con la que un material entra en ignición, la que se describe por el tiempo transcurrido hasta que tiene lugar la ignición; b) Sostenibilidad: se refiere a la propiedad de un combustible para continuar quemándose una vez encendido; y c) Combustibilidad: la que está relacionada con la velocidad a la que se quema un combustible.

Martin *et al.* (1994) citados por Hernando (2000) y por Marino *et al.* (2010), sugirieron un cuarto componente, identificado como consumibilidad, direccionando la intensidad del fuego en términos de cantidad de material consumido en el proceso de combustión.

3.4.2.4. Clasificación del material combustible

Existen varias clasificaciones del material combustible. Cianciulli (1981), lo clasificó en peligrosos, semipeligrosos y verdes. La categoría de materiales peligrosos incluye pequeñas ramas de diámetro igual o inferior a 1,0 cm, hojas pequeñas, musgos y gramíneas, todos en estado seco.

Los semipeligrosos incluyen ramas con diámetros superiores a 1,0 cm, troncos caídos, humus y turba. Son por tanto, materiales leñosos o en descomposición y compactados, que por sus características queman lentamente. Los verdes incluyen a la vegetación viva. Debido a su alto contenido de humedad, los combustibles verdes, excepto las coníferas resinosas, son a veces considerados no inflamables (Ramos, 2010).

De acuerdo con la localización, los combustibles forestales pueden clasificarse en aéreos y superficiales. Cada una de estas clases puede ser aún evaluada según la cantidad, tipo y disposición. Los combustibles superficiales son todos aquellos situados sobre o inmediatamente encima del piso del bosque. Pueden ser materiales vivos o muertos tales como hojas, ramas y troncos caídos, gramíneas, hierbas, arbustos, humus y turbas. Los combustibles aéreos comprenden las copas y ramas de los árboles, tocones, musgos y arbustos altos (por encima de 1,80 m). Ellos pueden ser vivos o muertos y están físicamente separados del suelo, formando el dosel del bosque.

Otra clasificación los agrupa en combustibles totales, residuales y disponibles, siendo estos últimos los que normalmente se queman. Se dice que el combustible disponible representa el 70 u 85 % del total del material con diámetros menores de 2,5 cm.

Una clasificación también puede ser la siguiente:

- Combustibles muertos ligeros o finos: hierbas, hojas, acículas, ramillas
- Combustibles muertos pesados: troncos, ramas, raíces
- Combustibles vivos: las plantas vivas con su follaje

El contenido de humedad de los combustibles muertos fluctúa principalmente en función de variaciones de la temperatura, la humedad relativa del aire y las precipitaciones. Partículas finas de combustibles pueden cambiar su contenido de humedad considerablemente en pocas horas. Por el contrario, son necesarios varios días o semanas para variar significativamente el contenido de humedad de materiales combustibles gruesos. Por tanto, combustibles de diferentes diámetros, responden distintamente a las variaciones del ambiente. Según Fosberg (1976) citado por Batista (1990), Byram propuso un método para expresar la respuesta de los diferentes combustibles al ambiente, estableciendo el principio de “*timelag*”. *Timelag* puede ser definido como el intervalo de tiempo necesario para que la humedad del material combustible pierda $(1-1/e)$, o aproximadamente 63% de diferencia entre un valor inicial uniforme de equilibrio, después de ser cambiado el ambiente instantáneamente. De acuerdo con este principio, los combustibles muertos pueden ser clasificados de acuerdo a su *timelag* o tiempo de respuesta o retardo, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Timelag* para las distintas clases de combustibles muertos.

Clases	Diámetro (cm)	Timelag (horas)
I	< 0,7	1
II	0,7 - 2,5	10
III	2,5 - 7,6	100
IV	> 7,6	1000

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Caracterización del área experimental

El trabajo se realizó en una plantación de *T. grandis* ubicada en el Cantón Jipijapa, provincia de Manabí, Ecuador (Figura 1). El clima predominante de Jipijapa es cálido seco en la zona oeste y cálido húmedo con temporadas secas en la zona este, con una temperatura media de 25°C, afectada por la presencia de dos estaciones: invierno (mayo a octubre) y verano (noviembre a abril). Los valores más altos de humedad y temperatura se registran en el mes de marzo, donde se alcanza una temperatura media del aire de 28°C. La precipitación promedio anual es de 670 mm, concentrándose la mayor cantidad entre los meses de febrero y marzo. La altitud del sitio es de 320 msnm.

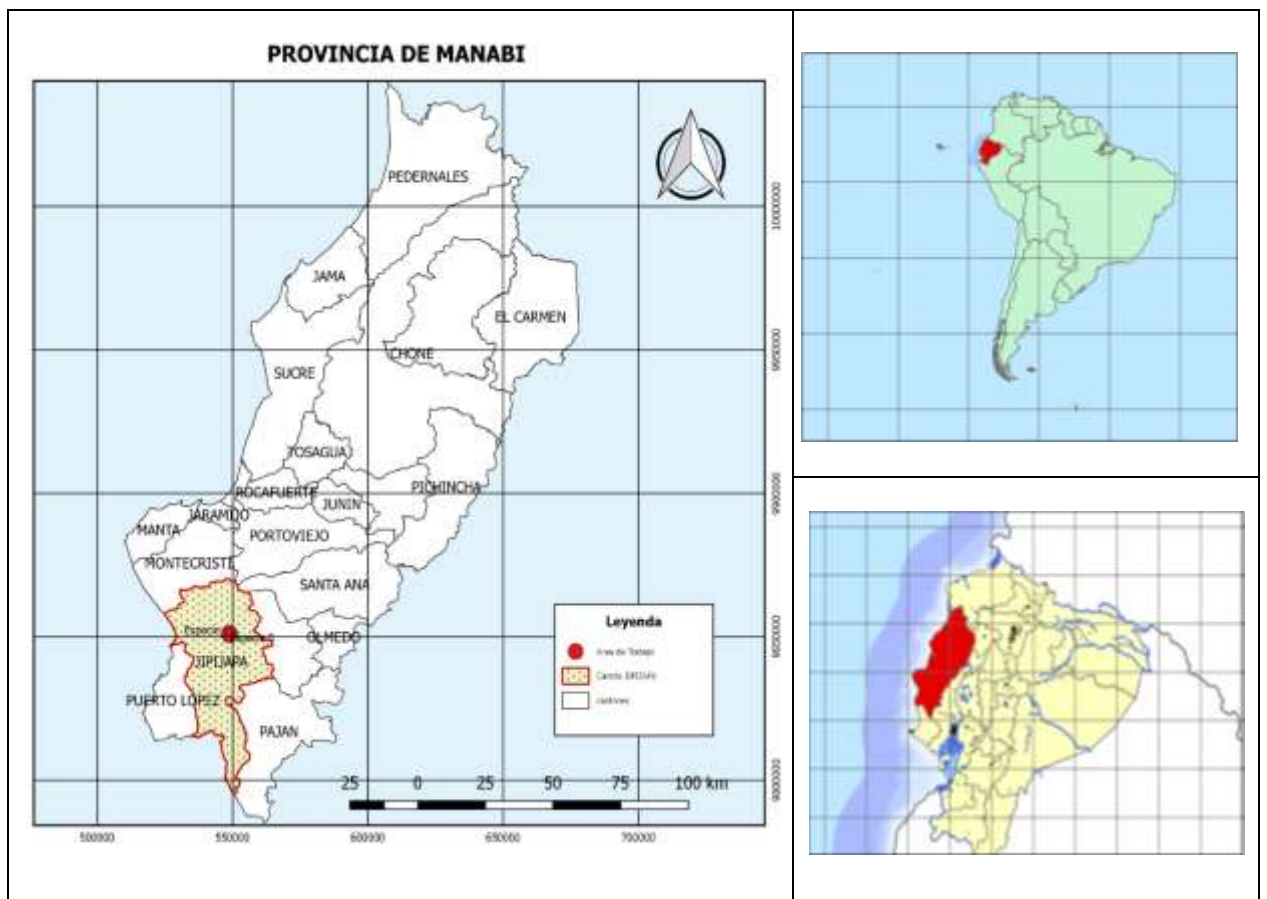


Figura 1. Ubicación del área experimental

La vegetación herbácea y arbustiva en el área objeto de estudio es poca, compuesta por hierbas y arbustos aislados de menos de un metro de altura. El estrato arbóreo está formado por individuos de *T. grandis* con valores medios de diámetro a 1,30 m y de altura de 16,87 cm y de 9,95 m, respectivamente, con una altura promedio de fuste sin ramas de 6,04 m. El modelo de combustible, de acuerdo a la modelación Cuba 19 (Ramos *et al.*, 2012), es CHL2 que corresponde al grupo de Hojarasca con Combustibles Leñosos (HCL). En este modelo el fuego se propaga por una capa de hojarasca compacta de especies de latifolias, con presencia continua de combustible leñoso o herbáceo muerto. La profundidad del complejo hojarasca-restos es mayor a 15 cm. En este modelo es difícil la transición a copas.

4.2. Delimitación del área experimental y colecta de datos

Fueron delimitadas 10 parcelas de 2 m x 5 m haciendo un área total de 100 m² en la que se aplicó una quema controlada utilizando la técnica de quema a favor del viento. No obstante, esta variable fue muy inestable mostrando cambios repentinos de dirección, comprobándose una vez más las dificultades que se presentan cuando se desarrollan estos experimentos en condiciones naturales. El terreno del lugar era llano. Las parcelas se ubicaron una a continuación de la otra entre las dos líneas de plantación centrales del rodal. Alrededor del área a quemar se construyó un cortafuego de 1 m de ancho para evitar que el fuego pasara al área externa del tratamiento (Figura 2). Para facilitar el inicio del fuego se colocaron fragmentos de papel periódico debajo del combustible situado en el lugar por donde debía comenzar el fuego.



Figura 2. Ubicación y delimitación de las parcelas de quema en el rodal de *T. grandis*

La quema aplicada fue superficial y se realizó el 25 de noviembre de 2017, 31 días después de la última lluvia superior a 10 mm ocurrida en el área, la cual fue de 36 mm. El experimento se inició a las 11:47 horas con una duración de una hora y 47 minutos entre el inicio de la primera parcela y la extinción total de la última, con una variación del tiempo de quema entre las parcelas de 5 a 11 minutos.

Durante el desarrollo del experimento fueron medidas la velocidad del viento y la humedad relativa del aire con ayuda de un medidor meteorológico digital (Kestrel 3500 *Pocket Weather Station*) a 0,50 m de altura del suelo y 1 m de distancia del extremo de la parcela por donde se inició el fuego. También se midió la dirección del viento con una brújula.

4.3. Caracterización de los combustibles

Para caracterizar el material combustible se obtuvieron informaciones sobre peso, espesura de la capa de combustible depositado sobre el suelo y contenido de humedad. La determinación del peso o cantidad de material combustible o materia seca, antes y después de la quema, se basó en el método destructivo propuesto por Brown *et al.* (1982) citados por Londe de Camargos *et al.* (2015). De acuerdo con esto en el centro de cada parcela se colectó una muestra de 2 500 cm² delimitada por un cuadro de madera de 50 x 50 cm, de cuyo interior se retiró todo el material. Después de la quema se colectó el material no carbonizado. El material colectado antes y después de la quema fue colocado en fundas de nailon y pesado con balanza de gancho de 0,01 g de precisión. Posteriormente se colocó en estufa a 75° hasta alcanzar peso constante. La diferencia observada entre la cantidad de combustible seco antes (combustible total) y después de la quema (combustible residual) proporcionó la cantidad de material consumido por el fuego (combustible disponible). Con los mismos datos se determinó también la variable consumo de combustible (ConsC) utilizando la Ecuación 9 (Amaral *et al.*, 2014) modificada.

$$ConsC = \frac{m_{i\ comb} - m_{f\ comb}}{m_{i\ comb}} * 100 \quad (9)$$

Donde ConsC: Consumo de combustible (%); $m_{i\ comb}$: masa inicial de combustible seco (kg); $m_{f\ comb}$: masa residual de combustible seco (kg).

La espesura de la capa de combustible depositado sobre el suelo se determinó a través de tres mediciones realizadas en los extremos y en el centro de cada parcela. Después de la quema se midió nuevamente la espesura del material que no fue consumido (material residual). La diferencia entre la espesura de la capa antes y después de la quema permitió estimar la variable profundidad de la quema (PQ).

La humedad de los combustibles el día de la quema fue determinada a través de la Ecuación 10 (Batista, 1990 citado por Seger *et al.*, 2013).

$$Hm = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps} \right) * 100 \quad (10)$$

Donde *Hm*: Humedad del combustible; *Ph*: Peso húmedo; *Ps*: Peso seco

4.4. Evaluación de parámetros del comportamiento del fuego

La evaluación del comportamiento del fuego durante el experimento se basó en la medición de los parámetros velocidad de propagación, altura de las llamas, intensidad lineal del fuego y calor liberado por unidad de área. La velocidad de propagación del fuego fue calculada midiendo el tiempo utilizado por el fuego para recorrer los 5 m de cada parcela ($m.s^{-1}$) considerando esto cuando el 50 % de la línea de fuego llegaba al final de la parcela, mientras que la altura de las llamas se midió en cada parcela con una baliza graduada a los 2 y 4 m del extremo por donde se inició la quema, es decir, dos mediciones en cada parcela.

La intensidad lineal del fuego, el calor desprendido por unidad de área y la altura de secado letal se estimaron a través de las Ecuaciones 4, 6 y 8, respectivamente. El calor de combustión del material húmedo se calculó a través de la Ecuación 5. Se consideró un calor de combustión seco de $4\,000\text{ kcal.kg}^{-1}$ ($16\,720\text{ kJ.kg}^{-1}$), el cual utilizaron con fines similares a los de esta investigación Batista (1995) y Martínez (2006). El calor de combustión húmedo obtenido en cada parcela osciló entre $3\,155,99$ y $3\,659,48\text{ kcal.kg}^{-1}$ ($13\,213,55$ y $15\,321,57\text{ kJ.kg}^{-1}$). Batista *et al.* (2013), utilizaron en quemas experimentales en *Pinus elliottii* un valor medio de $H = 15\,490\text{ kJ.kg}^{-1}$ de acuerdo a determinaciones hechas por Soares y Hakkila (1987). Londe de Camargo *et al.* (2015), determinaron valores de poder calorífico seco entre $4\,093$ y $4\,623\text{ kcal.kg}^{-1}$ ($17\,136,63$ y $19\,355,65\text{ kJ.kg}^{-1}$) en un bosque estacional semidesiduo.

En la Tabla 2 se presentan y describen las variables relacionadas con el material combustible, las condiciones meteorológicas y el comportamiento del fuego utilizadas en el experimento.

Tabla 2. Variables utilizadas en el experimento de quema prescrita realizado en un rodal de *T. grandis* en Jipijapa, Manabí, Ecuador

Variables	Descripción	Unidad
Hll	Altura de las llamas	cm
Vpf	Velocidad de propagación del fuego	m.s ⁻¹
I	Intensidad lineal del fuego	kcal.m ⁻¹ .s ⁻¹
hs	Altura de secado letal	m
Ha	Calor liberado por unidad de área	kcal.m ⁻²
T	Temperatura del aire	°C
Hr	Humedad relativa	%
Vv	Velocidad del viento	m.s ⁻¹
PcA	Peso del material combustible seco antes de la quema	kg.m ⁻²
PcD	Peso del material combustible seco después de la quema	kg.m ⁻²
PcC	Peso de material combustible consumido por el fuego	kg.m ⁻²
ConsC	Consumo de combustibles	%
EspA	Espesura de la capa de combustible antes de la quema	cm
EspD	Espesura de la capa de combustible después de la quema	cm
PQ	Profundidad de la quema	cm
Hcom	Humedad de los combustibles el día de la quema	%

4.5. Correlación entre variables

Para determinar la relación entre las variables analizadas se utilizaron los valores medios correspondientes a cada parcela de quema. De acuerdo con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks se obtuvo que las variables humedad de los combustibles y velocidad de propagación del fuego no tenían una distribución normal ($p < 0,05$), por lo que se determinó el coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman, considerando una probabilidad de significación del 5 %, como medida de la relación. La interpretación de los valores de la correlación fue hecha de acuerdo con la propuesta de Bisquerra (2004), la cual se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Interpretación de los valores de las correlaciones de Spearman.

Valor de r	Interpretación
0,00	Nula
0,01 – 0,19	Muy baja
0,20 – 0,39	Baja
0,40 – 0,59	Moderada
0,60 – 0,79	Alta
0,80 – 0,99	Muy alta
1,00	Perfecta

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Condiciones meteorológicas y características de los combustibles

Las condiciones meteorológicas relacionadas con el experimento de quema se muestran en la Tabla 4. Se observa poca variabilidad los valores de las variables temperatura del aire y humedad relativa expresado esto en los bajos valores del coeficiente de variación. Este comportamiento fue diferente para el caso de velocidad y dirección del viento.

Tabla 4. Condiciones meteorológicas el día de la quema en cada parcela

Parcelas	T (°C)	Hr (%)	Vv (m.s ⁻¹)	Dv (Grados)
1	30,30	60,00	0,60	340
2	30,60	63,00	0,90	180
3	28,20	68,00	0,50	180
4	31,70	65,00	0,40	180
5	29,40	76,00	0,30	340
6	31,80	62,00	0,40	200
7	27,00	77,00	1,10	200
8	30,70	61,00	0,50	160
9	29,20	69,00	1,10	320
10	30,50	56,00	1,40	20
Media	29,94	65,70	0,72	212
CV	0,0504	0,1040	0,5230	0,4647

Nota: T: Temperatura del aire; Hr: Humedad relativa; Vv: Velocidad del viento; Dv: Dirección del viento; CV: Coeficiente de variación

La Tabla 5 muestra los valores referentes a las características del combustible antes y después de la quema. En sentido general el coeficiente de variación obtenido expresa poca variabilidad de los datos en todas las variables.

Tabla 5. Características del combustible antes y después de la quema en cada parcela

Parcelas	PcA (kg.m ⁻²)	PcD (kg.m ⁻²)	PcC (kg.m ⁻²)	ConsC (%)	EspA (cm)	EspD (cm)	PQ (cm)	Hcom (%)
1	0,54	0,08	0,46	84,40	13,33	5,50	7,83	10,58
2	0,50	0,13	0,37	74,29	14,33	6,67	7,67	11,87
3	0,72	0,13	0,59	81,92	15,33	6,17	9,17	10,44
4	0,58	0,11	0,47	81,38	16,33	5,17	11,17	10,11
5	0,54	0,07	0,47	87,41	13,67	5,83	7,83	11,52
6	0,57	0,09	0,48	84,22	16,67	6,67	10,00	11,60
7	0,54	0,21	0,33	61,27	12,00	6,00	6,00	11,73
8	0,62	0,08	0,53	86,71	14,00	3,33	10,67	10,37
9	0,50	0,12	0,38	75,52	13,33	5,33	8,00	11,98
10	0,68	0,13	0,55	80,29	13,33	5,83	7,50	11,78
Media	0,58	0,12	0,46	79,74	14,23	5,65	8,58	11,20
CV	0,1273	0,3532	0,1790	0,0976	0,1030	0,1697	0,1885	0,0651

Nota: PcA: Peso del material combustible seco antes de la quema; PcD: Peso del material combustible seco después de la quema; PcC: Peso de material combustible consumido por el fuego; ConsC: Consumo de combustibles; EspA: Espesura de la capa de combustible antes de la quema; EspD: Espesura de la capa de combustible después de la quema; PQ: Profundidad de la quema; Hcom: Humedad de los combustibles el día de la quema; CV: Coeficiente de variación

5.2. Parámetros del comportamiento del fuego

Los valores obtenidos para los parámetros del comportamiento del fuego evaluados en el experimento de quemas se muestran en la Tabla 6. Wade (1986), citado por De Ronde *et al.* (1990), describieron niveles de intensidades asociados con el comportamiento del fuego para auxiliar los planes de quemas prescritas en poblaciones de *Pinus elliottii* en el sur de los EUA. Según estos autores existen dos niveles: el límite de óptima variación que estaría entre 17 y 60 kcal.m⁻¹.s⁻¹ y el máximo de intensidad de quema que no debe sobrepasar las 165 kcal.m⁻¹.s⁻¹. De acuerdo con esto el valor medio obtenido para este parámetro puede clasificarse en el rango óptimo.

Julio y Giroz (1975), realizaron diversos experimentos con quemas controladas en plantaciones de diferentes especies en Valdivia, Chile, variando la intensidad del fuego en estas quemas entre 77 y 289 kcal.m⁻¹.s⁻¹ para *Ulex* sp.; entre 18,5 y 42,4 kcal.m⁻¹.s⁻¹ en *Pinus radiata* mezclado con zarzamora; entre 155 y 447 kcal.m⁻¹.s⁻¹ en restos de

explotación de *P. radiata* (8 meses) mezclado con murra. Por su parte, Kauffman y Martín (1989), obtuvieron valores de intensidades muy variables, desde 4,78 hasta 144,63 kcal.m⁻¹.s⁻¹ en plantaciones de *Pinus radiata* en Australia, mientras que Burrows *et al.* (1989), obtuvieron para la misma especie y país, intensidades del fuego entre 4,78 y 144 kcal.m⁻¹.s⁻¹. En plantaciones de *Pinus taeda*, Batista (1995), obtuvo intensidades de fuego entre 2,88 y 25,22 kcal.m⁻¹.s⁻¹. En *Mimosa scabrella*, Grodzki (2000), obtuvo un valor medio de 384,08 kcal.m⁻¹.s⁻¹. Flores y Benavides (1994), reportaron valores de altura de la llama de 0,5 m para quemas en retroceso y hasta 5 m para quemas en avance para bosques de pinos en Jalisco. Por otra parte Vega *et al.*, (2000), obtuvieron longitud de llama entre 0,30 a 1,50 metros en pinares de Andalucía y Galicia, en España.

Las alturas de secado letal estimadas en cada parcela de quema muestran valores entre 1,21 y 2,84 metros, los cuales son inferiores a altura promedio del fuste sin ramas, lo cual indica que el calor no afectará a las ramas inferiores de los árboles.

Tabla 6. Valores de los parámetros del comportamiento del fuego en cada parcela de quema

Parcelas	Hll	Vpf	I		hs	Ha
	(cm)	(m.s ⁻¹)	(kcal.m ⁻¹ .s ⁻¹)	(kw.m ⁻¹)	(m)	(kcal.m ⁻²)
1	0,56	0,0093	15,11	63,21	2,33	1631,56
2	0,41	0,0076	9,90	41,41	1,45	1307,34
3	0,67	0,0119	25,21	105,46	3,18	2117,39
4	0,86	0,0104	17,64	73,79	2,84	1693,37
5	0,57	0,0093	15,36	64,25	2,41	1659,00
6	0,36	0,0076	12,90	53,96	2,30	1702,49
7	0,52	0,0093	10,72	44,84	1,21	1158,14
8	0,47	0,0083	15,90	66,51	2,51	1907,51
9	0,73	0,0167	22,10	92,45	2,46	1326,05
10	0,51	0,0104	20,01	83,70	1,99	1920,49
Media	0,57	0,0101	16,49	68,96	2,27	1642,33
CV	0,2669	0,2659	0,2960	0,3264	0,2606	0,1845

Nota: Hll: Altura de las llamas; Vpf: Velocidad de propagación del fuego; I: Intensidad lineal del fuego; hs: Altura de secado letal; Ha: Calor liberado por unidad de área; CV: Coeficiente de variación

5.3. Análisis de correlación

La relación entre las características del comportamiento del fuego y su asociación con las propiedades de los combustibles y las condiciones meteorológicas se muestra en la Tabla 7. Se observa que las relaciones lineales significativas ($p < 0,05$) se manifestaron por lo general solo entre variables del comportamiento del fuego y no entre estas y variables meteorológicas y de los combustibles. La asociación entre la altura de las llamas y la intensidad del fuego fue significativa ($p = 0,048$). Según Seger *et al.* (2013), varios investigadores han desarrollado modelos para estimar la intensidad del fuego mediante esa correlación (Byram, 1959, Bidwell; Engle, 1991, Batista; Soares, 1993, Beutling *et al.*, 2012).

La altura de secado letal presentó relación significativa con la profundidad de la quema y la humedad de los combustibles el día de la quema con $p = 0,005$ y $p = 0,038$, respectivamente. La no relación de la velocidad del viento con las variables del comportamiento del fuego puede explicarse por el comportamiento errático del mismo caracterizado por cambios continuos de dirección y de velocidad durante la quema de las parcelas. Esta es una de las dificultades verificadas normalmente cuando se realizan experimentos de quema en ambiente abierto.

Tabla 7. Matriz de correlación entre las variables utilizadas en los análisis

	Hll	Vpf	I	hs	Ha	T	Hr	Vv	PcC	PQ	Hcom
Hll	1,000										
Vpf	0,840**	1,000									
I	0,636*	0,852**	1,000								
hs	0,624	0,500	0,745*	1,000							
Ha	-0,006	0,216	0,636*	0,564	1,000						
T	-0,418	-0,525	-0,212	0,067	0,285	1,000					
Hr	0,455	0,253	-0,030	0,055	-0,467	-0,600	1,000				
Vv	-0,116	0,274	0,049	-0,502	-0,269	-0,404	-0,165	1,000			
PcC	-0,024	0,201	0,626	0,547	0,997**	0,255	-0,450	-0,279	1,000		
PQ	0,243	0,050	0,377	0,802**	0,474	0,559	-0,122	-0,656*	0,442	1,000	
Hcom	-0,273	0,006	-0,212	-0,661*	-0,491	-0,285	0,127	0,661*	-0,468	-0,669*	1,000

Nota: Hll: Altura de las llamas; Vpf: Velocidad de propagación del fuego; I: Intensidad lineal del fuego; hs: Altura de secado letal; Ha: Calor liberado por unidad de área; T: Temperatura del aire; Hr: Humedad relativa; Vv: Velocidad del viento; PcC: Peso de material combustible consumido por el fuego; PQ: Profundidad de la quema; Hcom: Humedad de los combustibles el día de la quema; CV: Coeficiente de variación.

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

6. CONCLUSIONES

La realización del proyecto de investigación permitió llegar a las conclusiones siguientes:

- Es posible analizar el comportamiento del fuego a escala experimental en plantaciones de *T. grandis* siempre que sean adecuadamente descritas las características del material combustible y de las condiciones meteorológicas.
- Los valores del comportamiento del fuego observados en esta investigación son importantes para fundamentar el uso del fuego en plantaciones de *T. grandis*.
- De forma general no se obtuvieron correlaciones significativas entre los parámetros del comportamiento ni con las características del material combustible ni con las variables meteorológicas.

7. RECOMENDACIONES

El trabajo realizado permite recomendar:

- Repetir la investigación en rodales de la misma especie en otros cantones y provincias de Ecuador utilizando una superficie experimental mayor.
- Monitorear con mayor frecuencia las condiciones meteorológicas durante la ejecución de la quema.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelnour, A., y Muñoz, A. (2005). Micropropagación de teca. *Kurú: Revista Forestal* 2(5), 1–11. Recuperado de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7222/Micropropagacion_teca.pdf?sequence=1
- Amaral, S. S., de Carvalho Junior, J. A., Costa, M. A. M., Neto, T. G. S., Dellani, R., y Leite, L. H. S. (2014). Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions. *Bioresource technology*, 164, 55-63. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.060
- Arnaldos, J., Navalón, X., Pastor, E., Planas, E., y Zárata, L. (2004). *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Atzet, T., Wheeler, D., y Gripp, R. (1988). The Fire Environment. *Fire Report*, 9(4) (Winter) Special Fire Issue. Extension Service, Oregon. U.S.A. 4-7.
- Batista, A. C. (1990). *Incêndio Florestais*. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.
- Batista, A. C. (1995). *Avaliação da queima controlada em povoamentos de Pinus L. no norte do Paraná*. (Tese de Doutor). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Batista, A. C., Beutling, A., y Pereira, J. F. (2013). Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliottii*. *Revista Árvore*, 37(5), 779-787. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v37n5/01.pdf>
- Batista, A. C., y Soares, R.V. (1997). *Manual de prevenção e combate a incêndios florestais*. Curitiba. Paraná. Brasil.
- Bisquerra, R. (2004). *Metodología de la investigación educativa*. Madrid: Editorial La Muralla.

- Brown, A. A., y Davis, K. P. (1973). *Forest Fire – Control and use*. New York, U.S.A.: Mc Graw Hill, 2 nd Ed.
- Burrows, N. D., Woods, Y. C., Ward, B. G., y Robinson, A. D. (1989). Prescribing low intensity fire to kill wildings in *Pinus radiata* plantations in Western Australia. *Australian Forestry*, 52(1): 45–52. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00049158.1989.10674535>.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. y Williams, D. (1983). *Fire in Forestry*. Vol. II. New York, U.S.A.: Forest Fire Management and Organization. John Wiley and Sons.
- Cianciulli, P. L. (1981). *Incêndios Florestais. Prevenção e Combate*. São Paulo, Brasil: Livraria Nobel S.A.
- DeBano, L. 1998, *Fire's Effects on Ecosystems*, John Wiley and Sons, Inc.
- De Ronde, C., Goldammer, J. G., Wade, D. D. y Soares, R. V. (1990). Prescribed fire in industrial plantations. En J. G. Goldammer (Ed.), *Fire in the Tropical Biota-Ecosystem and global Challenges*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag, (Ecological Studies, Vol. 84).
- Kinnaird, M.F. y O'Brien, T.G. 1998. Ecological effects of wildfire on lowland rainforest in Sumatra. *Conservation Biology*, 12(5): 954-956.
- Elvira, L. M., y Hernando, C. (1989). *Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque*. España: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Flores, G., Benavides, J. G. (1994). *Influencia de dos tipos de quemas controladas en bosque de pino en Jalisco*. Folleto Técnico Núm. 5 Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco, México.
- Gómez-González, S. (2013). Comentario de libro: Incendios Forestales. *Gayana Botánica*, 70(2), 401-406. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/gbot/v70n2/art20.pdf>

- Grodzki, L. (2000). *Efeitos do fogo sobre variáveis micrometeorológicas em uma floresta de bracinga (Mimosa scabrella Benth.) manejada sob o sistema agroflorestal em Colombo, PR.* (Tese Doutor). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Haltenhoff, H. (1998). *Silvicultura Preventiva*. Manual Técnico N°18. Corporación Nacional Forestal. Chile.
- Heikkilä, T.V.; Grönqvist, R. y Jurvélius, M. (1993). *Handbook on Forest Fire Control. A Guide for Trainers*. Helsinki, Finlândia: Foresry Training Programme, Publication 21.
- Hernando, C. (2000). Combustibles forestales: Inflamabilidad. En R. Vélez (Ed.) *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias*. (pp. 6.3-6.15). España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- Hernando, C. (2009). Combustibles forestales: Inflamabilidad. En R. Vélez (Ed.) *La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias*. 2ª Edición. (pp. 123-130). España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U. Madrid.
- Instituto para la Conservación de la Naturaleza. (1993). *Manual de Operaciones contra Incendios Forestales*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España.
- Intriago, R. A. (2015). Evaluación de cinco procedencias de teca (*Tectona grandis* Linn f.) en la empresa Seragroforest, cantón Santo Domingo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. (Trabajo de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Johansen, R. W. (1975). Prescribed burning may enhance growth of young slash pine. *Journal of Forestry*, 73(3), 148-149.
- Julio, G. (2007) Apuntes del curso: Control de incendios forestales. Universidad de Chile. Depto. Manejo Recursos Forestales.
- Julio, G., y Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 1(1), 18-27.

- Kauffman, J. B. y Martin, R. E. (1989). Fire behavior, fuel consumption, and forestfloor changes following prescribe understory fires in Sierra Nevada mixed conifer forest. *Can. J. For. Res.*, 19, 455-462.
- Keogh, R. M. (2013). La teca y su importancia económica a nivel mundial. En R. De Camino, y J.P. Morales (Eds). *Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades*. (pp. 8-28). Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Küçük, Ö.; Bilgili, E.; Sağlam, B.; Başkaya, Ş.; y Dinçdurmaz, B. (2008). Some Parameters Affecting Fire Behavior in Anatolian Black Pine Slash. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32: 121–129.
- Ladrach, W. (2009). Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos. ISTF Noticias. Florida, U.S.A. Recuperado de http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_tek/teca.pdf
- Londe de Camargos, V., Assunção Ribeiro, G., da Silva, A. F., Martins, S. V., da Silva Carmo, F. M. (2015). Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. *Ciência Florestal*, 25(3), 537-545. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53441497001>
- Marino, E., Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C, Fernández, C. (2010). Flammability descriptors of fine dead fuels resulting from two mechanical treatments in shrubland: a comparative laboratory study. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 314 – 324.
- Martínez, E. (2001). *Manual de quemas controladas: El manejo del fuego en la prevención de incendios forestales*. TRAGSA. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Martínez, L. W. (2006). *Uso de quemas prescritas en bosques naturales de Pinus tropicalis Morelet en Pinar del Río*. (Tesis doctoral). Universidad de Pinar del Río, Cuba.

- Martínez, L. W., Ramos, M. P., Castillo, I., Bonilla, M., Sotolongo, R. (2004). Efectos de quemas prescritas sobre las propiedades del suelo en bosques de *P. tropicalis* Morelet., en Cuba. *Revista Chapingo*, X(1), 31-37.
- Ministro de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2014). *Programa de Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales*. Guayaquil, Ecuador.
Recuperado de
<http://balcon.magap.gob.ec/mag01/magapaldia/WEB%20FORESTAL/GuiaForestal002.pdf>
- Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., Applegate, G. y Moore, P. (2002). Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 53(2). Recuperado de
http://www.fao.org/docrep/004/y3582s/y3582s08.htm#P0_0
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1986). *Terminología del control de incendios en tierras incultas*. Estudio FAO Montes No. 70.
- Parra-Lara, Á. del C., y Bernal-Toro, F. H. (2011). Introducción a la Ecología del Fuego. En A. el C. P. Lara (Ed.), *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*. Tomo I (pp. 17-72). Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
- Ramos, M. P. (2010). *Manejo del Fuego*. La Habana, Cuba: Félix Varela.
- Rodríguez, D. A. (1996). *Incendios Forestales*. Ciudad México, México: Mundi - Prensa. México, S.A. de C.V.
- Ruiz, J. (2000). El fuego, factor ecológico. En R. Vélez. (Ed.), *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias*. (4.1-4.13). España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- Sánchez, C., y Zerecero, L. G. (1983). *Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca*. Nota Divulgativa 9. CIFONOR-INF.

- Seger, C. D., Batista, A. C., Tetto, A. F., y Soares, R. V. (2013). Comportamento do fogo em queimas controladas de vegetação de estepe no Município de Palmeira, Paraná, Brasil. *Floresta*, 43(4), 547–558. Recuperado de <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/view/31385>.
- Soares, R. V. (1985). *Incêndios Florestais. Controle e uso do Fogo*. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná. Curitiba.
- Soares, R.V. y Batista, A. C. (1998). *Comportamento do fogo*. En Curso de prevenção e controle de incêndios florestais. ABEAS/UFPR.
- Vega, J. A., Landsberg, J., Bará, S., Paysen, T., Fontúrbel, M. T. y Alonso, M. (2000). Efectos del fuego prescrito sobre los suelos de montes de *Pinus pinaster*. En R. Vélez. (Ed.), *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias*. (14.61-14.71). España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A. UVélez, R. (2000). Perspectiva global: El fuego en los ecosistemas forestales del mundo. En R. Vélez (Ed.) *La Defensa Contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias*. (pp. 2.1-2.8). España: McGraw – Hill.
- Wade, D. D. y Lunsford, J. D. (1989). *A guide for prescribed fire in southern forests*. Technical Publication, Atlanta, U.S.D.A. Forest Service, R8-TP11.

Urkund Analysis Result

Analysed Document: T. de Titulacion Orlando Pico -4 Febrero 2018.docx (D36143481)
Submitted: 3/5/2018 7:04:00 PM
Submitted By: orlandopc_2995@hotmail.es Significance: 2 %

Sources included in the report:

Tesis Francisco - 26 de ABRIL 2015 MP.doc (D14146859) Instances where

selected sources appear:

7