



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
NÍVEL DOUTORADO



BENJAMIN LEONARDO ALVES WHITE

MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO

SÃO CRISTÓVÃO

2014

BENJAMIN LEONARDO ALVES WHITE

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de
Sergipe, como requisito para a obtenção do título de Doutor em
Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientadora: Dra. Rosemeri Melo e Souza

SÃO CRISTÓVÃO

2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

W582	<p>White, Benjamin Leonardo Alves</p> <p>Modelagem matemática e avaliação do comportamento do fogo em liteira de eucalipto / Benjamin Leonardo Alves White ; orientadora Rosemeri Melo e Souza. – São Cristóvão, 2014.</p> <p>190 f. : il.</p> <p>Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2014.</p> <p>1. Incêndios florestais. 2. Proteção florestal. 3. Behave plus. 4. Modelagem matemática. I. Souza, Rosemeri Melo e, orient. II. Título.</p> <p>CDU: 630*43:519.22</p>
------	---

BENJAMIN LEONARDO ALVES WHITE

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de
Sergipe, como requisito para a obtenção do título de Doutor em
Desenvolvimento e Meio Ambiente

Aprovada em 11/02/2014

BANCA EXAMINADORA



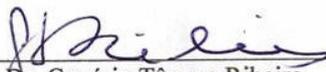
Dra. Rosemeri Melo e Souza
Universidade Federal de Sergipe (Orientadora e Presidente da Banca)



Dr. Alexandre Beutling
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul



Dr. Adauto de Souza Ribeiro
Universidade Federal de Sergipe



Dr. Genésio Tâmara Ribeiro
Universidade Federal de Sergipe



Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Sergipe

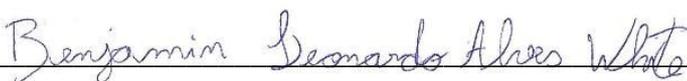
Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.



Dra. Rosemeri Melo e Souza

Universidade Federal de Sergipe

É concedida ao Núcleo responsável pelo Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe permissão para disponibilizar, reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias.



Benjamin Leonardo Alves White

Universidade Federal de Sergipe



Dra. Rosemeri Melo e Souza

Universidade Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este trabalho principalmente a minha querida mãe Marlúcia Alves Secundo White que sempre esteve presente me apoiando e me incentivando em todas as minhas escolhas ao longo da vida.

Minha querida irmã Larissa White que em todos os momentos que precisei de ajuda esteve presente, seja auxiliando nas atividades de campo ou lendo e oferecendo sugestões à redação.

Mau pai Theodore White que, além de me auxiliar no Inglês, sempre me incentivou a gostar da natureza, do campo e que, desde criança, sempre me deu lições sobre preservação do meio ambiente e sustentabilidade.

Meus queridos professores, mentores, orientadores: Dr. Adauto de Souza Ribeiro, Dr. Genésio Tâmara Ribeiro, Dr. Paulo Alexandre Martins Fernandes e Dra. Rosemeri Melo e Souza pela sempre disposição em me ajudar. Afirmo com plena convicção que sem ajuda dos Senhores eu não teria chegado até aqui!

Um abraço especial para todos os membros do grupo de pesquisa GEOPLAN; para Franciane e Glaziely do Laboratório de Entomologia e para os funcionários da COPENER que me auxiliaram nas atividades de campo; e para todo o pessoal do PRODEMA (colegas de classe, professores e funcionários).

E, por fim, um agradecimento especial para a FAPITEC e para o CNPq que me financiaram ao longo desta jornada e me propiciaram a experiência única de estudar na Europa.

RESUMO

Incêndios florestais são catástrofes naturais onde o fogo se propaga de forma descontrolada sobre qualquer tipo de vegetação. Além de serem apontados como responsáveis pela redução da biodiversidade, os incêndios florestais geram imensos prejuízos de ordem econômica para o setor de florestal. Os primeiros estudos de modelagem do comportamento do fogo surgiram ainda na primeira metade do século XX e tiveram como objetivo caracterizar o comportamento do fogo para facilitar as operações de prevenção e combate. Desde então, diversos modelos foram criados, entretanto, este é o primeiro trabalho desenvolvido para estimar o comportamento do fogo em plantações de eucalipto no Brasil. Sabendo que as características da vegetação e do clima irão exercer uma forte influência no modo em que o fogo irá se comportar, este trabalho teve como objetivo principal, caracterizar o provável comportamento do fogo em ladeira de eucalipto e desenvolver modelos matemáticos para estimar a velocidade de propagação, comprimento das chamas, consumo do material combustível e tempo de queima, com base em variáveis de fácil obtenção. Além disso, foi avaliada a eficiência do simulador do comportamento do fogo *BehavePlus* 5.0 quando comparado seus dados simulados com os dados experimentais. O passo inicial para cumprir com os objetivos propostos foi caracterizar os povoamentos de eucalipto. A área definida para servir de padrão foi o litoral norte da Bahia, região que apresenta uma das maiores áreas plantadas de eucalipto do Nordeste brasileiro. A caracterização foi feita através de amostragem destrutiva, onde foram definidos os valores médios para a carga, espessura do leito e densidade do leito do material combustível, dados estes que serviram de base para a realização de 105 queimas experimentais em laboratório. Todas as variáveis meteorológicas e do material combustível que, porventura, pudessem vir a influir no comportamento do fogo, foram controladas e mensuradas em todos os experimentos. Com base nos valores das variáveis dependentes e independentes, foram construídos modelos matemáticos de regressão linear multivariada utilizando-se o procedimento *forward stepwise*. Ao total sete modelos foram construídos, todos altamente significativos e com o coeficiente de determinação variando entre 0,58 e 0,82. Os respectivos modelos foram utilizados para a construção do *software* de modelagem do comportamento do fogo *Eucalyptus Fire Safety System*®. Ao comparar os dados da velocidade de propagação e do comprimento das chamas simulados pelos modelos aqui desenvolvidos e simulados pelo *BehavePlus* versus os dados obtidos experimentalmente, foi alcançado um melhor desempenho estatístico para os modelos aqui criados. Em função da diferença entre os dados simulados pelo *BehavePlus* e os dados experimentais, que foram significativamente subavaliados, não é aconselhável o uso do *BehavePlus* na área de estudo.

Palavras-chave: Incêndios florestais, *BehavePlus*, proteção florestal.

ABSTRACT

Mathematical modeling and evaluation of fire behavior in *eucalyptus* litter

Forest fires are natural disasters where the fire spreads uncontrollably about any type of vegetation. Besides being responsible for biodiversity reduction, forest fires generate huge economic losses in the forestry sector. The first studies modeling forest fire behavior were done in the first half of the twentieth century and were aimed to characterize fire behavior and assist in the prevention and combat operations. Although, since then, several models have been created, until now, there was no specific model for estimating fire behavior in Brazilian's eucalypt plantations. Knowing that the characteristics of the vegetation and weather play an important role in the way that the fires behave, this study aimed to characterize the fire behavior in *eucalyptus* litter in the study area and develop specific mathematical models to describe the propagation rate of spread, the flame length, the fuel consumption and the burn time, based on easily obtained variables. Furthermore, it was evaluated the efficiency of the BehavePlus 5.0 software in simulate the fire behavior. In order to meet the proposed objectives, the initial step was to characterize the eucalypt plantations. The area defined as a standard model was the north coast of Bahia, region that has the largest eucalyptus plantation area in all the northeast of Brazil. The characterization was done through destructive sampling, where the average values for the fuel load, fuel bed depth and fuel bed bulk density where set and used as basis for the 105 laboratory burns. All fuel and weather variables that could influence in the fire behavior were controlled and measured in the experiments. Based on the values of the dependent and independent variables, linear regression mathematical models using the forward stepwise procedure were created. Seven mathematical models were built, all they highly significant and with coefficient of determination ranging between 0.58 and 0.82. The respective models were used to build a software to simulate eucalyptus litter fire behavior: Eucalyptus Fire Safety System ®. When comparing the data of the rate of spread and flame length simulated by the models developed in this work and simulated in the BehavePlus software versus the experimental data obtained in laboratory, it was achieved a better statistical performance for the models created here. Because of the difference between the simulated data by the BehavePlus and the experimental data, which were quite underestimated, it is not advised the use of the BehavePlus in the study area.

Keywords: Forest fires, BehavePlus, forest protection.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
SUMÁRIO	IX
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE QUADROS	XVII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XVIII
CAPÍTULO I - CONSTRUÇÃO DA PESQUISA	21
1. INTRODUÇÃO	21
2. JUSTIFICATIVA	24
3. OBJETIVOS	26
3.1. Geral	26
3.2. Específicos.....	26
4. ESTRUTURA DA TESE	27
CAPÍTULO II - ASPECTOS GERAIS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	29
5. REVISÃO DA LITERATURA	29
5.1. Caracterização do gênero <i>Eucalyptus</i>	29
5.2. O fogo.....	31
5.3. Fases da combustão	31
5.4. Efeito do fogo na biota e no solo	32
5.5. Propagação do fogo	33
5.6. Os incêndios florestais	35
5.6.1. Agentes causadores de incêndio florestal	35
5.6.2. Estatística dos incêndios florestais no Brasil	36
5.6.3. Perigo e risco de ocorrência de incêndios florestais.....	37
5.7. O clima e sua influência nos incêndios florestais	38
5.7.1. Precipitação pluvial	40
5.7.2. Umidade relativa do ar	41
5.7.3. Vento.....	41
5.7.4. Temperatura do ar	42
5.8. Material combustível florestal	43
5.8.1. Localização do material combustível	44
5.8.2. Quantidade de material combustível	44
5.8.3. Umidade do material combustível.....	45
5.8.4. Higroscopicidade do material combustível	46
5.8.5. <i>Timelag</i> ou tempo de resposta.....	47
5.8.6. Tipo do material combustível.....	48
5.9. Inclinação do relevo.....	50
5.10. Silvicultura preventiva e gestão do material combustível	51
5.10.1. Gestão através de queimas controladas	52
5.11. O comportamento do fogo	53

CAPÍTULO III - MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO E O BEHAVEPLUS..... 56

4. REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO).....	56
5.12. Modelagem do comportamento do fogo.....	56
5.13. O Modelo matemático de Richard C. Rothermel.....	56
5.14. <i>BEHAVE</i> e <i>BehavePlus</i>	57
5.14.1. Variáveis de entrada do <i>BehavePlus</i>	60
5.14.1.1. Modelo do material combustível.....	62
5.14.1.2. Tipo do modelo do material combustível	63
5.14.1.3. Carga do material combustível	64
5.14.1.4. Relação área superficial pelo volume	65
5.14.1.5. Espessura do leito do material combustível	65
5.14.1.6. Umidade de extinção do material combustível morto.....	66
5.14.1.7. Energia calorífica	67
5.14.1.8. Teor de umidade do material combustível	68
5.14.1.9. Velocidade do vento na altura das chamas	70
5.14.1.10. Declividade do terreno	72
5.14.2. Principais modelos matemáticos de caracterização do comportamento do fogo inseridos no <i>BehavePlus</i> 5.0.....	73
5.14.2.1. Modelo da velocidade de propagação da frente do fogo superficial	74
5.14.2.2. Modelo da intensidade da linha do fogo	75
5.14.2.3. Modelo da energia calorífica liberada por unidade de área.....	77
5.14.2.4. Modelo do Comprimento das Chamas	78
5.15. Demais modelos matemáticos alternativos não utilizados pelo <i>BehavePlus</i> 5.0 para descrever o comportamento do fogo.....	79
5.15.1. Modelos para a velocidade de propagação do fogo.....	80
5.15.2. Modelos para o comprimento das chamas	81
5.15.3. Modelos para a intensidade da linha do fogo	83
5.15.4. Modelos para o consumo do material combustível	84
5.15.5. Modelo para o tempo de residência.....	86
5.15.6. Modelo para a energia por unidade de área (<i>HA</i>).....	87

CAPÍTULO IV - ASPECTOS METODOLÓGICOS 89

6. METODOLOGIA	89
6.1. Caracterização dos povoamentos de eucalipto	89
6.1.1. Caracterização da área de estudo	89
6.1.2. Caracterização do material combustível	91
6.1.2.1. Coleta do Material Combustível	91
6.1.2.2. Determinando o Peso Seco	93
6.1.2.3. Espessura do leito	94
6.2. Construção dos modelos matemáticos para a caracterização do comportamento do fogo.....	94
6.2.1. Experimentação laboratorial	94
6.2.2. Coleta do material combustível.....	99
6.2.3. Caracterização das variáveis independentes do modelo	100
6.2.4. Caracterização do comportamento do fogo.....	103
6.2.5. Modelagem matemática	103
6.3. Realização das simulações utilizando o <i>BehavePlus</i>	104

6.4.	Análise estatística	107
------	---------------------------	-----

CAPÍTULO V - ANÁLISE, INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES..... 110

7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
7.1.	Caracterização dos povoamentos de eucalipto da área de estudo	110
7.1.1.	Determinação da carga do material combustível.....	110
7.1.2.	Espessura do leito.....	112
7.2.	Queimas experimentais.....	113
7.2.1.	Análise das variáveis de entrada	113
7.2.1.1.	Carga MS1	113
7.2.1.2.	Carga MS2	115
7.2.1.3.	Carga Total (MS1 + MS2).....	116
7.2.1.4.	Espessura do leito do material combustível	116
7.2.1.5.	Densidade do leito.....	117
7.2.1.6.	Umidade do material combustível da classe MS1	118
7.2.1.7.	Umidade do Material Combustível da classe MS2	120
7.2.1.8.	Temperatura do ar pré-queima	121
7.2.1.9.	Umidade relativa do ar pré-queima	122
7.2.1.10.	Velocidade do vento	123
7.2.2.	Análise das variáveis de saída.....	124
7.2.2.1.	Velocidade de propagação do fogo	124
7.2.2.2.	Comprimento das chamas	126
7.2.2.3.	Consumo do material combustível	127
7.2.2.4.	Tempo de queima	128
7.2.2.5.	Intensidade da linha do fogo	129
7.2.2.6.	Energia por Unidade de área	132
7.2.3.	Construção dos modelos matemáticos de previsão do comportamento do fogo.	133
7.2.3.1.	Velocidade de propagação do fogo	134
7.2.3.2.	Comprimento das chamas	138
7.2.3.3.	Consumo do Material Combustível.....	142
7.2.3.4.	Tempo de queima	148
7.3.	Simulando o comportamento do fogo.....	154
7.3.1.	Velocidade de Propagação do fogo.....	154
7.3.2.	Comprimento das chamas	156
7.3.3.	Discussão sobre a simulação do comportamento do fogo utilizando o <i>BehavePlus</i>	157
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	162

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 166

ANEXO 189

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma de propagação elíptica do fogo originado a partir de um único ponto (ponto preto na figura), demonstrando a diferença na velocidade de propagação a depender da velocidade e sentido do vento (Adaptado de Scott, 2012).....	34
Figura 2 - Diagrama esquemático da utilização do modelo de Rothermel para a previsão do comportamento do fogo (Adaptado de Almeida, 2008).....	58
Figura 3 - Intensidade do fogo de acordo com a carga do combustível (Adaptado de Trollope et al., 2002).	64
Figura 4 - Média da espessura do leito do material combustível (Adaptado de Andrews, 2009).....	66
Figura 5 – Relação entre a intensidade do fogo e a umidade do material combustível (Adaptado de Trollope et al., 2002).....	68
Figura 6 – Classificação dos materiais combustíveis de acordo com a exposição ao vento (Adaptado de Andrews, 2008).....	70
Figura 7 – Declividade do terreno a partir da elevação e da distância horizontal (Adaptado de Andrews, 2008).....	73
Figura 8 – Delineamento da linha do fogo (Adaptado de Andrews, 2008).....	76
Figura 9 – Comprimento das chamas de um incêndio (Adaptado de Andrews, 2008).	78
Figura 10 - Área de estudo correspondente às áreas de plantio sob atuação da COPENER Florestal Ltda (Fonte: O autor).	89
Figura 11 - Plantação de eucalipto na área de estudo onde percebe-se a ausência de vegetação de sub-bosque (Fonte: O autor).	91
Figura 12 - Representação gráfica do calibrador utilizado para classificação do material combustível de acordo com as classes de diâmetro (Fonte: O autor).....	93
Figura 13 - Mesa de combustão do material combustível (Fonte: O autor).	95
Figura 14 - Croqui representando a vista aérea do laboratório montado na cidade de Aracaju/SE onde foram realizadas as queimas experimentais (Fonte: O Autor).	96
Figura 15 - Mesa de combustão do material combustível com destaque para o portão com o qual o vento era controlado. Quando fechado o fluxo de vento era mínimo, quando aberto velocidades maiores eram registradas (Fonte: O autor).	96
Figura 16 - Equipamentos de segurança utilizados durante as queimas laboratoriais (Fonte: O autor).....	97
Figura 17 - Pinga fogo utilizado para realizar a ignição do material combustível durante a realização das queimas laboratoriais (Fonte: O autor).	98
Figura 18 - Mesa de combustão com destaque para a linha de ignição e as linhas consecutivas (realçadas digitalmente), nas quais eram realizadas as medições do tempo, velocidade do vento e comprimento das chamas (Fonte: O autor).....	99
Figura 19 - Estação meteorológica (<i>Professional Weatherwise Wireless Weather Station Model: SW-1090-SOLAR</i>) utilizada para definir os valores da temperatura e umidade relativa do ar pré-queima (Fonte: O autor).....	101
Figura 20 - Anemômetro (<i>LUTRON Eletronic Enterprise Model: LM-8000</i>) utilizado para medir a velocidade do vento na frente do fogo durante as queimas laboratoriais (Fonte: O autor).....	102
Figura 21 - Exemplo de simulação do comportamento do fogo no <i>BehavePlus</i> utilizando os dados de entrada da queima laboratorial número 2 (Fonte: <i>Print screen do BehavePlus 5.0.5</i> no sistema operacional <i>Windows 7</i>).....	105
Figura 22 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da carga do material combustível da classe MS1 (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.....	114

Figura 23 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da carga do material combustível da classe MS2 (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.....	115
Figura 24 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da carga do material combustível total (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.	116
Figura 25 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da espessura do leito do material combustível (m) nas 105 queimas experimentais realizadas.	117
Figura 26 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da densidade do material combustível (kg/m^3) nas 105 queimas experimentais realizadas.	118
Figura 27 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> do teor de umidade do material combustível da classe MS1 (%) nas 105 queimas experimentais realizadas.....	118
Figura 28 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> do teor de umidade do material combustível da classe MS2 (%) nas 95 queimas experimentais que apresentaram material combustível da respectiva classe.	120
Figura 29 - Correlação entre o teor de umidade da classe MS1 e MS2 para as 95 queimas laboratoriais nas quais ambas as classes estavam presentes.....	121
Figura 30 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da temperatura do ar pré-queima ($^{\circ}\text{C}$) para as 105 queimas experimentais realizadas.	121
Figura 31 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da umidade relativa do ar pré-queima (%) para as 105 queimas experimentais realizadas.	122
Figura 32 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da velocidade do vento (km/h) para as 101 queimas laboratoriais realizadas.....	123
Figura 33 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da velocidade de propagação do fogo (m/min) durante as 105 queimas experimentais realizadas.....	124
Figura 34 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> do comprimento das chamas (m) nas 105 queimas laboratoriais.....	126
Figura 35 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> do consumo do material combustível (%) durante as 105 queimas experimentais realizadas.....	128
Figura 36 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> do tempo de queima (min) ao longo de 69 queimas experimentais realizadas.	129
Figura 37 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> da intensidade da linha do fogo calculada através do modelo de Byram (1959) para as 105 queimas laboratoriais.....	130
Figura 38 - Distribuição e <i>quantile box plot</i> , da energia por unidade de área calculada através do modelo de Byram (1959) para as 105 queimas laboratoriais.....	133
Figura 39 - Linhas de tendência entre as variáveis: densidade do leito (kg/m^3), umidade do material combustível MS1 (%) e velocidade do vento (km/h), versus a velocidade de propagação do fogo (m/min). Percebe-se que a linha de tendência logaritmizada (linha verde) está mais próxima dos pontos do que a linha de tendência linear (vermelha), indicando assim que a relação entre as variáveis não é linear.....	135
Figura 40 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo da velocidade de propagação do fogo construído (m/min). A linha de tendência (linha vermelha) indica os valores ideais, ou seja, quanto mais distante os pontos estão da linha, pior o modelo.....	136
Figura 41 - Linhas de tendência entre as variáveis: espessura do leito (m), umidade do material combustível MS1 (%) e velocidade do vento (km/h), versus o comprimento das chamas (m).	139
Figura 42 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo do comprimento das chamas construído (m). Linha vermelha tracejada indica a linha de tendência e linha vermelha pontilhada, a curva de significância (95%).	140

Figura 43 - Linhas de tendência entre as variáveis comprimento das chamas (m) e intensidade da linha do fogo de Byram (kW/m/s). Percebe-se que a linha de tendência linear (vermelha) não respondeu tão bem quanto a linha não linear (verde) obtida ao ajustar os valores utilizando a raiz quadrada da I_b	141
Figura 44 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo alternativo do comprimento das chamas (m).	142
Figura 45 - Linhas de tendência da relação entre as variáveis: carga do material combustível MS1 (t/ha), densidade do leito (kg/m^3) e umidade do material combustível MS1 (%), versus o consumo do material combustível (%).	144
Figura 46 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo do consumo do material combustível (%).	145
Figura 47 - Linha de tendência (não linear) entre a energia por unidade de área liberada durante a queima (kJ/m^2) e o respectivo consumo do material combustível (%).	146
Figura 48 - Valores reais versus valores previstos para o modelo alternativo do consumo do material combustível (%).	147
Figura 49 - Linhas de tendência entre as variáveis: carga do material combustível MS2 (t/ha); densidade do leito (kg/m^3) e velocidade do vento (km/h), versus o tempo de queima (min).	150
Figura 50 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo desenvolvido para o tempo de queima (min).	151
Figura 51 - Relação entre as variáveis: intensidade da linha do fogo de Byram (kW/m/s) e velocidade de propagação (m/min) versus o tempo de queima (min). A linha de tendência indica relação linear entre o tempo de queima e a intensidade, e relação não linear entre o tempo de queima e a velocidade de propagação. Neste último caso foi necessário logaritmar os valores da velocidade de propagação para se obter um modelo com maior coeficiente de determinação.	151
Figura 52 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo alternativo para o tempo de queima (min).	152
Figura 53 - Velocidade de propagação experimental e simulada para as 105 queimas laboratoriais.	154
Figura 54 - Regressão linear entre a velocidade de propagação estimada pelo <i>BehavePlus</i> e estimada pelo modelo matemático desenvolvido neste estudo, versus a velocidade de propagação obtida durante as queimas laboratoriais.	155
Figura 55 - Valores do comprimento das chamas, simulado pelo <i>BehavePlus</i> e obtidos através das queimas laboratoriais.	156
Figura 56 - Regressão linear entre o comprimento das chamas estimado pelo <i>BehavePlus</i> e estimada pelo modelo matemático desenvolvido neste estudo, versus o comprimento das chamas obtido durante as queimas laboratoriais.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição do número de incêndios e da área queimada de acordo com o tipo de vegetação para os períodos de 1983 a 1987, 1994 a 1997 e 1998 a 2002 (Fonte: Soares, 2009).....	37
Tabela 2 - Distribuição do número de incêndios florestais e da área queimada de acordo com as prováveis causas de origem para os períodos de 1983 a 1987, 1994 a 1997 e 1998 a 2002 (Fonte: Soares, 2009).....	37
Tabela 3 - Porcentagem do material combustível vivo herbáceo transferido para a categoria Material Combustível Herbáceo Morto (Andrews, 2008).....	63
Tabela 4 - Relação da área superficial pelo volume do material combustível fino das principais espécies encontradas nos Estados Unidos. Fonte: Brown (1970).....	65
Tabela 5 – Poder calorífero de algumas espécies florestais com aproximadamente 12% de umidade (Soares e Batista, 2007).	67
Tabela 6 - Poder calorífico de diferentes classes de material combustível de eucalipto (Fonte: Ribeiro, 1997).	68
Tabela 7 – Fator de ajuste da velocidade do vento de acordo com as condições de cobertura do material combustível superficial (Andrews, 2008).....	71
Tabela 8 - Valor médio e desvio padrão de temperatura (TEMP), precipitação (PPT), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF) e excedente hídrico (EXC), dos balanços hídricos anuais, de 1985 a 1994, para os postos meteorológicos de Quatis e Salgado, para uma capacidade de água disponível de 200 mm (WHITE, 2013).....	90
Tabela 9. Valores encontrados na literatura referentes à área superficial pelo volume, umidade de extinção e poder calorífero do material combustível para povoamentos de eucalipto utilizados para as simulações do comportamento do fogo no <i>BehavePlus</i>	106
Tabela 10 - Carga média, mínima e máxima dos aportes do material combustível presente nos povoamentos de eucalipto no litoral norte da Bahia.	110
Tabela 11. Espessura do leito, carga e densidade do material combustível médio, mínimo e máximo para povoamentos de eucalipto do litoral norte da Bahia.....	112
Tabela 12 - Relação das 17 queimas laboratoriais que apresentaram o maior teor de umidade do material combustível da classe MS1.....	119
Tabela 13 - Classificação da velocidade de propagação do fogo proposta por Botelho e Ventura (1990).....	125
Tabela 14 - Limites da intensidade do fogo para danos aceitáveis em florestas comerciais de eucalipto (McArthur, 1967)	131
Tabela 15 – Caracterização do fogo de acordo com a altura das chamas e a intensidade da linha do fogo (Rothermel, 1983).	132
Tabela 16 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo da velocidade de propagação do fogo. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento <i>forward stepwise</i> ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.	134
Tabela 17 - Fator de ajuste da velocidade de propagação do fogo para a inclinação do terreno com base na equação de McArthur (1962).....	137
Tabela 18 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do comprimento das chamas. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a	

soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento <i>forward stepwise</i> ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.	138
Tabela 19 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do consumo do material combustível. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento <i>forward stepwise</i> ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.	143
Tabela 20 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do tempo de queima. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento <i>forward stepwise</i> ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.	149
Tabela 21 - Descrição dos trabalhos de Simulação e Validação encontrados na literatura, que utilizaram o modelo de Byram (1959) e o de Rothermel (1972) integrado ao módulo "Superfície" no <i>BehavePlus</i> com o objetivo de modelagem do comportamento do fogo.	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cálculos realizados pelo <i>BehavePlus</i> de acordo com o Módulo. Fonte: Andrews (2008).	60
Quadro 2 - Relação das variáveis de entrada necessárias para simular o comportamento da frente do fogo em um incêndio superficial utilizando o <i>BehavePlus</i> (Andrews, 2008).....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FARSITE - *Fire Area Simulator*;

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

NFDR - *National Fire Danger Rating System*;

ANOVA - Análise de variância;

R^2 - Coeficiente de determinação;

RMSE - Raiz do erro quadrado médio;

p - Probabilidade de significância;

r - Correlação linear de Pearson;

F - Valor do teste F da análise de variância;

1-h - Classe de material combustível de uma hora de *timelag*;

10-h - Classe de material combustível de dez hora de *timelag*;

100-h - Classe de material combustível de cem horas de *timelag*;

1000-h - Classe de material combustível de mil horas de *timelag*;

MVHerb - Classe de material combustível vivo herbáceo;

MVL - Classe de material combustível vivo lenhoso;

MS1 - Classe de material combustível morto de 1-h de *timelag*;

MS2 - Classe de material combustível morto de 10-h de *timelag*;

MS3 - Classe de material combustível morto de 100-h de *timelag*;

F_L - Comprimento das chamas;

I - Intensidade da linha do fogo;

I_B - Intensidade da Linha do Fogo de Byram;

I_R - Intensidade de reação;

HA - Energia calorífica por unidade de área;

R - Velocidade de propagação do fogo;

H - Poder calorífero do material combustível;

W - Carga do material combustível;

r' - Taxa de combustão máxima do complexo combustível (min^{-1});

tr - Tempo de residência da chama;

ξ - Taxa de Fluxo de propagação sem vento;

ϕ_s - Coeficiente de declividade;

ϕ_w - Coeficiente do vento;

U - Velocidade do vento;

M - umidade do material combustível;

Rh - Umidade relativa do ar;

Φ - Inclinação do relevo;

T - Temperatura do ar;

Fc - Consumo do material combustível;

Fd - Espessura da liteira do chão da floresta;

Bd - Densidade do leito;

Tq - Tempo de queima;

Tr - Tempo de residência;

Ww = Peso úmido;

Wd = Peso seco.

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

CAPÍTULO I

CONSTRUÇÃO DA PESQUISA

CAPÍTULO I - CONSTRUÇÃO DA PESQUISA

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios constituem uma das maiores ameaças aos reflorestamentos e florestas nativas do planeta. Embora naturalmente ocorram desde que os raios e a vegetação passaram a coexistir na Terra, estudos específicos a respeito do comportamento do fogo começaram a ser desenvolvidos apenas à medida que as florestas nativas passaram a receber maior valor e à medida que milhões de hectares passaram a ser reflorestados com o objetivo de extrativismo mercantil.

Embora o fogo seja um elemento natural de importância fundamental na formação de alguns ecossistemas terrestres, podem causar sérios danos ecológicos, materiais e financeiros, principalmente em áreas de reflorestamento de monoculturas mais susceptíveis a incêndios.

Um eficiente plano de prevenção e um eficiente sistema de combate são os principais métodos para evitar incêndios florestais de grande porte capazes de causar prejuízos de ordem econômica e social. As respectivas atividades são passíveis de serem realizadas, com maior eficiência, caso sejam conhecidas as características do material combustível, as condições climáticas e o relevo da área em questão, pois estas são as variáveis que irão interferir no comportamento do fogo.

As características do material combustível são obtidas apenas mediante coleta de informações em campo no qual é possível determinar valores médios para os parâmetros necessários. As condições climáticas são obtidas com auxílio de uma estação meteorológica; e com o conhecimento das características topográficas da região é possível determinar os diferentes graus de inclinação. O conhecimento das variáveis acima explanadas, quando aplicadas em modelos matemáticos existentes, torna possível a realização de estimativas quantitativas sobre o provável comportamento do fogo.

Modelos matemáticos para descrever o fogo começaram a ser desenvolvidos a partir da década de 1940. O modelo mais aceito e mais citado na literatura é o modelo de propagação do fogo superficial de Richard C. Rothermel, desenvolvido em 1972 (WELLS, 2008). O sistema desenvolvido por ele serviu de base para o desenvolvimento dos

programas computacionais que realizam uma modelagem detalhada acerca do comportamento do fogo, como, por exemplo, o “*BEHAVE Fire Modeling System*” (BURGAN e ROTHERMEL, 1984), “*BehavePlus Fire Modeling System*” (ANDREWS et al., 2003), “*Fire Area Simulator (FARSITE)*” (FINNEY, 2004), “*Fire Family Plus*” (MAIN et al., 1990), *FlanMap* (FINNEY, 2006), dentre outros. Estes softwares possuem a capacidade de caracterizar as variáveis do comportamento do fogo como: sua intensidade, altura das chamas, sentido de propagação, área consumida, energia calorífera liberada, dentre diversas outras.

Embora os respectivos programas computacionais costumem ser utilizados amplamente por profissionais responsáveis pelo manejo do fogo em países como Estados Unidos, Canadá, Portugal e Austrália, alguns recentes estudos publicados não encontraram resultados satisfatórios ao comparar as simulações com dados experimentais (eg. CRUZ E FERNANDES, 2008; FERNANDES, 2009; STEPHENS et al., 2008). Embora existam trabalhos que apontem resultados satisfatórios, as plantações comerciais de eucalipto no território Brasileiro apresentam características fisiológicas distintas e estão inseridas em um ambiente com condições climáticas diferentes das normalmente encontradas em países de clima temperado. Sabendo-se que estes fatores irão influenciar diretamente no comportamento do fogo, há de se questionar a eficiência dos modelos matemáticos de descrição do comportamento do fogo desenvolvidos para outros tipos de vegetação em outras regiões do mundo quando aplicados aqui.

No Brasil, são bastante raros estudos que apliquem a modelagem do comportamento do fogo. Alguns poucos trabalhos existentes utilizam os dados gerados pelos *softwares* de modelagem sem ao menos verificar a eficiência de suas simulações na prática, como, por exemplo, Cerapiá (2006) que utiliza o FARSITE no Parque Nacional da Floresta da Tijuca e White et al. (2013b) utilizando o *BehavePlus* no Parque Nacional Serra de Itabaiana. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho de simulação, nem tampouco de modelagem para plantações de eucalipto no Brasil.

Em função disso, urge a necessidade de verificar a eficiência dos principais modelos matemáticos que estão embutidos nos programas computacionais de fácil acesso e comumente utilizados em outros países, e, desenvolver modelos matemáticos do comportamento do fogo locais que apresentem uma maior eficiência dos que os já existentes.

Com um conhecimento detalhado e seguro acerca de como o fogo irá se comportar, é possível desenvolver eficientes planos de prevenção ao fogo, aprimorar as atividades de combate, realizar queimas controladas e estimar o efeito do fogo no ambiente. Atividades estas que são essenciais para diminuir os prejuízos advindos dos incêndios florestais não apenas na área de estudo, mas em todo o Brasil.

2. JUSTIFICATIVA

As monoculturas de eucalipto apresentam características peculiares que as tornam mais susceptíveis à ocorrência de incêndios florestais. De acordo com Fernandes (2006) e Fernandes et al. (2011) os eucaliptais são responsáveis por um acúmulo de material combustível de qualidade e em grande quantidade. A qualidade se refere ao fato da composição química da vegetação que possui substâncias voláteis que podem ser mais inflamáveis (o eucalipto tem cerca de 21000 kJ/kg de poder calorífico, valor considerado relativamente alto). Já a quantidade se deve ao fato de que a espécie é muito produtiva e sua biomassa morta é decomposta lentamente, acumulando, assim, combustível com rapidez e em quantidade. Além disso, as características aerodinâmicas das folhas e cascas possibilitam os abundantes focos secundários a longa distância (500 a 1000 m) o que dificulta bastante o combate ao incêndio.

As perdas econômicas causadas pelos incêndios florestais em áreas de plantações de espécies florestais para produção de celulose é bastante alta em todo o Brasil e ocorre todos os anos. Segundo Santos et al. (2006) entre 1998 e 2002, no Brasil, foram registrados 5832 incêndios apenas em vegetações de eucalipto. O valor representa 30% de todos os incêndios, em todos os tipos de vegetação, registrados no Brasil. Esses incêndios responderam por uma área queimada de 13.561,65 hectares (16% de toda a área queimada no Brasil no período supracitado). Levando em consideração que uma área de 1 hectare de eucalipto tinha, na época, um custo de produção aproximado de R\$600,00, sem levar em consideração o custo de colheita (RODIGHERI, 1996), e gerava um rendimento bruto entre R\$3.000,00 e R\$9.000,00 a depender da localidade e do uso da madeira (HIGA et al., 2000), os prejuízos econômicos durante o período podem chegar na casa dos 81 milhões de reais. Dados mais atuais (BARTH et al., 2012), descrevem o custo de produção por hectare de R\$1.200,00 (sem considerar o custo da colheita) e um rendimento líquido de aproximadamente R\$12.000,00 por hectare após sete anos para madeira produzida para serralheria.

Além do aspecto econômico, o fogo tem sido apontado como um agente causador de mudanças florísticas, fitossociológicas, fisionômicas e estruturais na vegetação e na fauna, reduzindo a densidade das árvores e eliminando espécies tanto vegetais quanto animais sensíveis (GILL, 2002). De acordo com o mesmo autor, o fogo pode conduzir a

extinção local de espécies endêmicas, que crescem muito lentamente e sem estratégias eficientes de reprodução e colonização.

Outro fator preocupante e que justifica a realização de trabalhos e pesquisas voltados para a prevenção e combate dos incêndios florestais é o aumento de ocorrência de incêndios florestais originados a partir de incendiários. Segundo Soares e Cordeiro (1974) e Soares (1988), a causa principal dos incêndios até 1987 eram as queimas de limpeza, entretanto, segundo Santos et al. (2006), a partir de 1994 os incendiários passaram a ser a principal causa de incêndios florestais no Brasil. Os mesmos autores, analisando a ocorrência de incêndios florestais nos estados de Amapá, Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, e São Paulo, para o período de 1998 a 2002, citam que 69,15% dos incêndios tiveram origem a partir de incendiários, demonstrando a necessidade de medidas mitigadoras tais como pesquisas e práticas de educação ambiental junto à população.

Este estudo, portanto, é justificado na necessidade de dados precisos de como o fogo irá se comportar e quais os danos que causará em incêndios que, porventura, venham a ocorrer dentro de florestas plantadas de eucalipto. Através da compreensão de como o fogo se comporta, torna-se possível o emprego de medidas mitigadoras mais eficientes, tal como a realização de atividades de prevenção, como práticas de educação ambiental em períodos mais críticos do ano, ou realização de queimas controladas para redução do material combustível florestal, por exemplo, e realização de atividades de combate mais rápidas, precisas e eficientes, afinal, conhecendo como o fogo irá se comportar, torna-se possível definir quais os métodos mais eficientes para apagá-lo.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

- Compreender como o fogo se comporta em povoamentos de eucalipto e desenvolver modelos matemáticos para estimá-lo, baseados em variáveis de fácil obtenção.

3.2. Específicos

- Caracterizar o material combustível em povoamentos de eucalipto na área de estudo.
- Realizar simulações utilizando-se do principal sistema computacional de modelagem do comportamento do fogo (*BehavePlus*), a fim de se verificar a eficiência do mesmo quando comparado com dados experimentais.
- Desenvolver equações matemáticas de ajuste dos dados simulados pelo *BehavePlus* com base nos dados obtidos experimentalmente.

4. ESTRUTURA DA TESE

A tese apresenta sua estrutura básica dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo, sub-dividido nos tópicos: Introdução, Justificativa e Objetivos, estão descritos os aspectos básicos do estudo proposto, o porquê de seu desenvolvimento e o delineamento da construção da pesquisa.

O capítulo II trata de uma ampla revisão da literatura acerca do fogo, dos incêndios florestais, do material combustível e dos mais diversos fatores que irão afetar o comportamento do fogo, além de uma breve revisão da literatura sobre o gênero *Eucalyptus* e sobre silvicultura preventiva.

O capítulo III, que também é uma revisão da literatura, trata de assuntos mais específicos e complexos acerca da modelagem do comportamento do fogo. Os principais modelos matemáticos desenvolvidos até o momento são descritos neste capítulo, além de um sucinto detalhamento sobre o funcionamento do *BehavePlus fire modeling system*.

No capítulo IV está descrita a área de estudo e todos os procedimentos metodológicos realizados no desenvolvimento da tese. Por fim, no capítulo V estão todos os resultados obtidos devidamente detalhados e discutidos, além das conclusões e recomendações para futuros estudos.

Todas as referências bibliográficas utilizadas estão descritas logo após o capítulo V. Os anexos seguem após as referências.

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

(ASPECTOS GERAIS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS)

CAPÍTULO II - ASPECTOS GERAIS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

5. REVISÃO DA LITERATURA

5.1. Caracterização do gênero *Eucalyptus*

O setor de produção florestal no Brasil é amplamente desenvolvido. Dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura (2008) afirmam que o setor emprega cerca de 4,6 milhões de pessoas de forma direta e indireta, sendo responsável por 5,6% das exportações brasileiras e 3,4% do PIB nacional (44,6 bilhões de dólares).

O eucalipto é a espécie florestal mais usada nos programas de reflorestamento no Brasil, em razão de suas características de rápido crescimento e boa adaptação às condições edafoclimáticas existentes no país, que conta com cerca de 5,1 milhões de hectares plantados apenas deste gênero (ABRAF, 2012). Atualmente os estados de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Espírito Santo e Paraná se destacam no cenário nacional como os estados detentores de 85,8% da área total de plantios do gênero *Eucalyptus*, sendo o litoral norte da Bahia o local com maior concentração de área plantada no Nordeste brasileiro (ABRAF, 2012).

A preferência pelo eucalipto se deve ao fato de que o mesmo oferece diversas vantagens em comparação a outras espécies florestais utilizadas para a produção de celulose, inclusive às nativas. Devido ao clima favorável do Brasil e ao avanço alcançado pela pesquisa e tecnologia florestal (desenvolvimento de diversas espécies híbridas de rápido crescimento) o eucalipto normalmente pode ser colhido em um prazo de 5 a 7 anos para a produção de celulose (SBS, 2004).

As primeiras sementes de eucalipto foram trazidas da Austrália (ANDRADE e VECCHI, 1918), no entanto, não há uma data definida que corresponda à sua introdução no Brasil. Seu cultivo surgiu para suprir a falta de madeira, especialmente nas regiões Sul e Sudeste. Concentrada próximo aos grandes centros urbanos e industriais, esta atividade tem desempenhado um importante papel no atendimento da demanda, cada vez maior, por

energia e produtos à base de madeira, permitindo diminuir o uso de materiais nobres e a pressão de exploração sobre os remanescentes florestais (SILVA, 2012).

O gênero *Eucalyptus* é composto por cerca de 800 espécies, todas originárias da Austrália, sendo algumas delas, atualmente, extensamente cultivadas no mundo, especialmente na América Latina. As folhas contêm grande quantidade de óleos essenciais não consumíveis ou até mesmo venenosos, que conferem um grau de proteção contra o pastejo por animais. Só animais especializados como o marsupial Coala (*Phascolarctos cinereus*) ou larvas de mariposas da família *Oecophoridae* podem usar as folhas de eucalipto como fonte de alimento (COMMON, 1990).

O tamanho das árvores pode variar consideravelmente dependendo do espaçamento e da espécie. Tipicamente, as árvores possuem altura entre 26 a 40 m e diâmetro entre 21,8 a 38,4 cm (WALTERS, 1980). A sua natureza alelopática dificulta o estabelecimento de uma vegetação de sub-bosque arbustiva, sendo ela composta principalmente por gramíneas (SMITH, 1976).

Na Austrália, encontram-se cerca de 1850 espécies descritas de *Oecophoridae* (COMMON, 1994), contudo, a fauna diversa de *Oecophoridae* naturalmente existe exclusivamente na Austrália, onde os eucaliptos são nativos. Na América Latina não existe uma fauna adaptada à decomposição das folhas de Eucalipto (DOUROJEAMI, 2009), em razão disso a ciclagem de nutrientes é mais lenta favorecendo ao acúmulo de biomassa seca na linha do solo. As folhas secas acumuladas no chão favorecem à propagação do fogo, que por sua vez é uma ameaça para a plantação. Eucaliptos possuem uma resistência fraca contra o fogo, porque seu córtex é fino e não tem uma boa capacidade de isolar contra o calor (EVANS, 1992). O fogo, mesmo não sendo bastante intenso para causar a morte da planta, costuma causar danos no câmbio vascular, danos estes que acabam aumentando a sua susceptibilidade a pragas e doenças, e reduz o valor econômico da madeira.

Os problemas ocasionados em função do plantio do eucalipto, motivo de constantes debates ainda hoje, referem-se à suspeita de consumo excessivo de água, por se tratar de uma espécie exótica danosa ao meio ambiente e às espécies nativas (PAYRET, 2007), e práticas que não atendem às comunidades locais e aos trabalhadores. Entretanto, parte dos problemas já vem sendo resolvido com a introdução de novas tecnologias e a evolução no gerenciamento florestal pela adoção de novas regras para o cultivo, formalização do

emprego e assistência ao trabalhador. Inclusive, alguns estudos mais recentes revelaram que o eucalipto poderia trazer benefícios de cunho social e ambiental, opondo-se ao que era conjecturado (GOMES et al., 2006; BROCKERHOFF et al., 2012; GABRIEL et al., 2013).

5.2. O fogo

A combustão é um processo no qual o material combustível é aquecido, entra em ignição, e oxida rapidamente liberando calor. O fogo é um caso especial de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado por uma chama e/ou fumaça. Partículas sólidas de material combustível são transformadas em gases através de um processo chamado de pirólise, no qual ocorre a quebra de moléculas complexas de celulose e lignina em moléculas mais simples através da aplicação de calor (SCOTT, 2012).

Existem três fatores necessários para a ocorrência de fogo: material combustível, calor e gás comburente. Se algum deles não está presente o fogo não ocorrerá. É necessário material combustível disponível para queimar, uma fonte de calor para iniciar o processo de ignição e oxigênio em concentração suficiente para manter a reação. Estes três fatores em conjunto formam o triângulo do fogo (SOARES, 1985; BATISTA, 1990).

5.3. Fases da combustão

De acordo com Johnson (1982) a combustão do material combustível pode ser representada em três fases distintas. Na primeira fase, denominada de fase de pré-aquecimento, ocorre o aquecimento do material combustível e a posterior evaporação da umidade. É necessário que, primeiramente, toda a água seja evaporada para que depois o material possa entrar em processo de ignição, sendo o calor necessário para o seu aquecimento transferido por convecção, radiação e condução. A segunda fase, também conhecida como a destilação térmica, é onde ocorre a quebra da celulose (pirólise). Ao atingir cerca de 200°C, os gases voláteis começam a ser desprendidos e entram em ignição quando na presença de oxigênio, na forma de chamas visíveis, a uma temperatura entre 300

e 400°C. A terceira fase, também chamada de combustão em brasas, é após a passagem da frente do fogo quando o carvão residual continua queimando na forma de brasa. Em uma combustão completa o que resta ao final, após a passagem do fogo, são apenas as cinzas compostas pelos constituintes químicos do combustível.

5.4. Efeito do fogo na biota e no solo

O fogo, quando empregado dentro de formações vegetais, é responsável por alterar não só as propriedades químicas e físicas do solo e da vegetação como também responde por mudanças de forma direta e indireta nas comunidades de animais que habitam tais ecossistemas.

Incêndios de grande intensidade ou mesmo de média intensidade, repetindo-se periodicamente em um mesmo local, podem provocar sérios danos ao solo. A destruição da camada orgânica expõe o solo às intempéries, provocando modificações nas suas propriedades físicas, principalmente porosidade e penetrabilidade de água. O solo florestal, protegido pelas copas das árvores contra o impacto direto da chuva, e, coberto de húmus, funciona como uma esponja natural, porosa, absorvendo e facilitando a infiltração da água da chuva. O fogo intenso, principalmente quando chega a queimar a copa das árvores e expõe o solo mineral através da queima da liteira e do húmus, modifica toda a situação, expondo a área a graves distúrbios ambientais. Além disso, o fogo, mesmo quando não causa a morte das árvores, pode debilitá-las sensivelmente. Cicatrizes deixadas pelo fogo favorecem o ataque de insetos e fungos, os quais, encontrando árvores com reduzida capacidade de reação, instalar-se-ão e reproduzir-se-ão, causando grandes danos à madeira remanescente ao incêndio florestal (DEBANO et al., 1998; SOARES e BATISTA, 2007).

As alterações ambientais provocadas pelo fogo na vegetação, seja ele natural ou prescrito, bem como o seu impacto na comunidade de animais que vivem no solo ainda, até os dias atuais, não é um assunto muito bem pesquisado. Segundo Zimmer e Parmenter (1998), os poucos estudos existentes sobre a resposta de artrópodes ao fogo indicam que espécies residentes nas plantas inicialmente sofrem uma alta mortalidade, mas recolonizam rapidamente esses locais através de populações advindas das áreas vizinhas não queimadas, e que, artrópodes de solo são pouco afetados inicialmente, mas respondem, a longo prazo,

às mudanças provocadas pelo fogo (SWENGEL, 2001). Segundo Naves (1996) o fogo promove imediata redução da população de insetos, exceto alguns grupos de formigas e alguns outros grupos de animais que vivem abaixo da superfície do solo.

Com relação ao efeito do fogo sobre os nutrientes do solo, Wells (1971) afirma que o fogo causa um ligeiro aumento dos nutrientes N, P, Ca e Mg e do pH da matéria orgânica junto à superfície de solos minerais. Já Vega (1996) afirma que a perda de N e P por volatilização pode ser relativamente alta enquanto que a quantidade de Ca, K e Mg não muda significativamente.

Coutinho (1996), através de experimentos realizados nos cerrados de Pirassununga, Brasil, afirma que quando as queimadas são realizadas com intervalos de 3 anos não há perda de nutrientes para o ecossistema, enquanto que em intervalos de tempo menor ocorre perda de nutrientes para o ecossistema.

Certani (2005), em uma revisão da literatura a respeito do efeito do fogo nas propriedades do solo, afirma que em incêndios de pequeno a moderado porte não ocorrem mudanças irreversíveis no ecossistema, entretanto, em curto prazo, o solo se torna hidrofóbico, ou seja, diminui a sua capacidade em absorver água tornando-se mais propenso à erosão. Ainda de acordo com o mesmo autor, em incêndios de grande intensidade, o fogo remove significativamente a matéria orgânica e deteriora a estrutura e porosidade do solo; causa a perda de nutrientes por volatilização; causa uma alteração acentuada da quantidade e composição da fauna do solo; além de deixar o solo mais propenso para lixiviação e erosão.

5.5. Propagação do fogo

O ambiente no qual o fogo ocorre sofre variações à medida que o mesmo vai se propagando. Diferentes áreas do fogo podem estar queimando sob diferentes condições ambientais, como, por exemplo, em áreas com estrutura da vegetação diferente, áreas com relevo desiguais, com material combustível com teores de umidade distintos, etc. Em função dessa heterogeneidade, a avaliação do comportamento do fogo torna-se bastante complexa de se analisar e costuma variar bastante (ANDRÉ e VIEGAS, 2002).

Um incêndio superficial, iniciado a partir de um determinado ponto, tende a se propagar para todos os lados de forma circular, entretanto a ação dos diversos fatores citados acima irá alterar a sua forma de propagação (SOARES e BATISTA, 2007). De acordo com os mesmos autores, em terrenos planos, o vento é o principal fator que irá influenciar na forma de propagação do fogo, passando assim de forma circular para forma elíptica, sendo o sentido de propagação da frente do fogo guiado pelo sentido do vento (Figura 1).

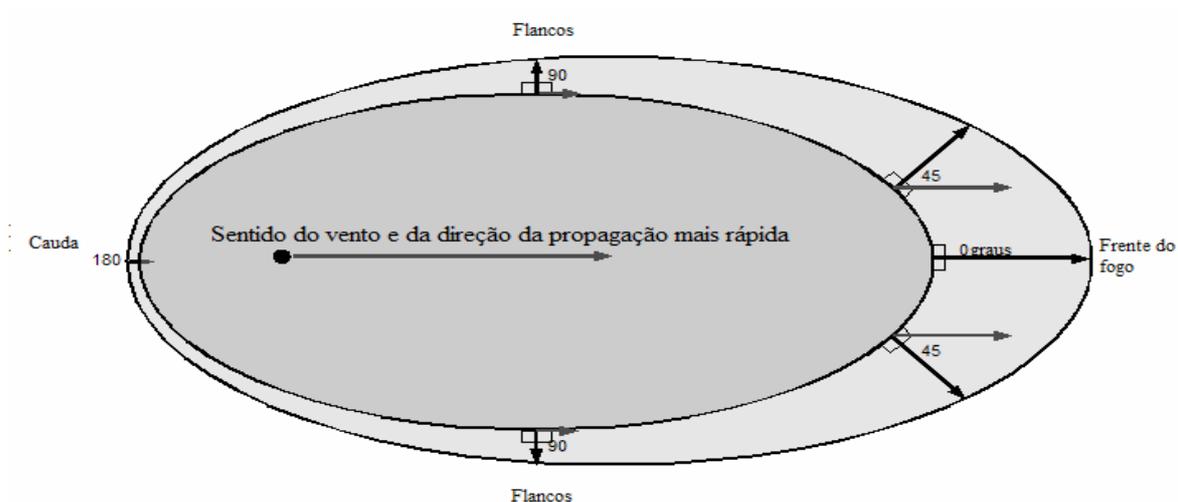


Figura 1 - Forma de propagação elíptica do fogo originado a partir de um único ponto (ponto preto na figura), demonstrando a diferença na velocidade de propagação a depender da velocidade e sentido do vento (Adaptado de Scott, 2012).

A cabeça ou a frente do fogo é a parte que avança com maior velocidade, sendo normalmente definida em função do sentido do vento; a cauda ou a base é a parte que normalmente se propaga em sentido contrário ao sentido do vento e por isso sua propagação é mais lenta e por vezes extingue-se por si só; os flancos se propagam perpendicularmente à frente. A velocidade de propagação do fogo é sempre decrescente da frente à cauda (SCOTT, 2012).

Apesar do vento e do relevo serem os principais fatores que irão influenciar na forma e sentido de propagação do fogo, variações na quantidade de material combustível e no tipo da vegetação também poderão afetar, sendo assim importante o detalhamento preciso dos combustíveis florestais (GREENOUGH, 2001).

5.6. Os incêndios florestais

Incêndio florestal é um termo utilizado para caracterizar um fogo incontrolado que se propaga livremente e consome os diversos tipos de material combustível, com efeitos imprevisíveis ao ambiente. Um incêndio florestal não deve ser confundido com a queima controlada, que é a utilização do fogo em uma área, sob determinadas condições de clima, umidade do combustível, umidade do solo e outras, produzindo a intensidade de calor e a taxa de propagação necessária para favorecer certos objetivos de manejo, estando as consequências negativas do fogo mantidas dentro de uma faixa mínima planejada (RIBEIRO e BONFIM, 2000; SOARES e BATISTA, 2007).

Além de gerar danos sobre a fauna e a flora, os incêndios florestais afetam o ecossistema e a estabilidade da área atingida, excetuando-se os casos em que os biomas são dependentes do fogo para sua sobrevivência e perpetuação (GILL, 2002; BEUTLING, 2005). Porém, quando os incêndios atingem áreas povoadas pelo homem, além de gerar prejuízos de ordem material, o fogo pode causar queimaduras, doenças respiratórias e até mesmo levar a morte pessoas expostas ao calor e à fumaça.

5.6.1. Agentes causadores de incêndio florestal

Os incêndios florestais podem ter origem natural ou antrópica. A única causa natural de incêndios florestais são os raios, que, segundo Soares e Batista (2007), representam uma porcentagem muito pequena da ocorrência de incêndios no Brasil (1,5%). As causas de natureza antrópica são apresentadas a seguir (SANTOS, 2004; SANTOS et al., 2006):

- a) Incendiários - incêndios provocados, intencionalmente, por pessoas em propriedades alheias, sejam por vingança ou problemas mentais.
- b) Queimas para limpeza - incêndios originários do uso do fogo durante a limpeza de terreno, seja para fins florestais, agrícolas ou pecuários, e que tenham escapado ao controle e atingido áreas florestais.

- c) Fumantes - incêndios provocados por fósforos ou pontas de cigarro aceso.
- d) Fogos de recreação - incêndios causados por pessoas que acendem fogueiras nos campos e florestas, mas não tomam o devido cuidado de apagar corretamente o fogo ao deixarem o local.
- e) Operações florestais - incêndios originados por trabalhadores florestais em atividade na floresta. Exemplo: atividades de colheita.
- f) Estradas de ferro – Incêndios originados a partir do atrito entre o trilho e as rodas do trem.
- g) Diversos – Outras formas que ocasionalmente acabam gerando incêndios florestais.

5.6.2. Estatística dos incêndios florestais no Brasil

Quando comparado a outros países como Estados Unidos, Austrália, Canadá e Portugal, a base de dados do registro de ocorrência de incêndios florestais, origem e área queimada é um tanto quanto escassa no Brasil. Em função disso, existe uma impossibilidade técnica de se realizar análises com alta precisão dos incêndios florestais que aqui ocorrem, o que, conseqüentemente, dificulta a geração de dados precisos que porventura poderiam auxiliar nas operações de prevenção e combate.

Em uma das poucas publicações que descrevem a ocorrência de incêndios florestais do país, Soares (2009), embasando-se em questionários enviados a empresas florestais e a unidades de conservação, expõe o perfil dos incêndios florestais ocorridos no Brasil para o período de 1983 a 1987, 1994 a 1997 e 1998 a 2002.

De acordo com o autor, nos períodos avaliados, cerca de 73 mil hectares de plantações de eucalipto foram incendiados, o que correspondeu a aproximadamente 15% de todos os tipos de vegetação incendiados no país (Tabela 1). Além disso, o autor descreve que as queimas para limpeza e os incendiários foram as principais causas dos incêndios florestais nos respectivos períodos avaliados (Tabela 2).

Tabela 1 - Distribuição do número de incêndios e da área queimada de acordo com o tipo de vegetação para os períodos de 1983 a 1987, 1994 a 1997 e 1998 a 2002 (Fonte: Soares, 2009).

Tipo de vegetação	Registros	%	Área queimada (ha)	%
<i>Pinus</i> spp.	522	2,26	6801,1	1,4
<i>Eucalyptus</i> spp.	7280	31,53	73210	15,07
Outras florestas plantadas	77	0,33	418,2	0,09
Florestas nativas	3371	14,6	276262,3	56,87
Outro tipo de vegetação	11714	50,74	124721,2	25,67
Não determinado	124	0,54	4375,7	0,9
Total	23088	100	485788,5	100

Tabela 2 - Distribuição do número de incêndios florestais e da área queimada de acordo com as prováveis causas de origem para os períodos de 1983 a 1987, 1994 a 1997 e 1998 a 2002 (Fonte: Soares, 2009).

Causas	Registros	%	Área queimada (ha)	%
Diversos	876	3,79	13576,2	2,79
Estradas de ferro	30	0,13	530,9	0,11
Fogos de recreação	183	0,79	13037,1	2,68
Fumantes	256	1,11	4854,9	1
Incendiários	5361	23,22	68453,5	14,09
Operações florestais	313	1,36	2491,4	0,51
Queimas para limpeza	1460	6,32	223131,7	45,93
Raios	139	0,6	838,3	0,17
Não determinada	14470	62,67	158874,5	32,7
Total	23088	100	485788,5	100

5.6.3. Perigo e risco de ocorrência de incêndios florestais

É importante diferenciar estes dois termos comumente utilizados na análise dos incêndios florestais. De acordo com Brown e Davis (1973), o perigo de incêndio está relacionado aos fatores que irão interferir no comportamento do fogo: as características do material combustível, definido pelo tipo, arranjo, quantidade, condição e localização, irão criar uma condição especial de ameaça de ignição. Esta condição e a consequente

dificuldade para extinguir o fogo irá representar o perigo. Já o risco de incêndio está relacionado à probabilidade do fogo iniciar em função da presença e/ou atividade de agentes causadores.

Resumindo, o risco está relacionado à probabilidade de ignição em função de agentes causadores. Já o perigo está relacionado às condições da vegetação, do clima e do relevo. Uma área de alto risco de ocorrência pode ser uma área de baixo perigo e uma área de alto perigo pode ser, ao mesmo tempo, uma área de baixo risco.

Segundo Cheney (1968), existem dois tipos de fatores que vão influenciar no grau de perigo de ocorrência de incêndios florestais: os fatores constantes, no qual se pode citar o material combustível e o relevo; e os fatores variáveis, no qual se incluem as condições de umidade do material combustível e as condições climáticas como a velocidade e a direção do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar, dentre outras. Os fatores constantes, como o próprio nome diz, não vão mudar ou pouco mudam ao longo do tempo, enquanto os fatores variáveis são instáveis e mudam bastante ao longo do dia. Cada fator contribuirá de maneira distinta, com o grau de perigo de incêndios de um determinado local. A medição destes fatores é um passo fundamental para a determinação da periculosidade de uma determinada área (STOCKS, 1989; ANDRÉ e VIEGAS, 2002).

5.7. O clima e sua influência nos incêndios florestais

As condições climáticas possuem interferência direta na ocorrência de incêndios florestais e no comportamento do fogo. De acordo com Ribeiro (2009), a estação do ano, com regime diferenciado de chuva, temperatura e umidade relativa do ar irá agir indiretamente modificando outros fatores como a quantidade e qualidade do material combustível, assim como seu teor de umidade, um dos fatores mais importantes para que o material combustível possa entrar em ignição.

De acordo com Schroeder e Bulk (1970), quando parte de uma planta morre, cessa a circulação da água. A água contida nos tecidos evapora-se até que os mesmos tecidos mortos tornem-se secos ao ar. A quantidade de água restante será variável sempre mudando em função das condições ambientais. Ainda, de acordo com o mesmo autor, as

principais variáveis climáticas que controlam o teor de umidade do material combustível morto são: precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar e temperatura do ar.

Os trabalhos de pesquisa envolvendo a relação entre fatores climáticos e o teor de umidade dos materiais combustíveis, e, conseqüentemente, o comportamento do fogo, é um tema antigo. Os primeiros estudos foram desenvolvidos na década de 20, se tornando mais comum a partir da década de 60 em países como: Canadá, E.U.A. e Austrália (BATISTA, 1984; KING e LINTON, 1963).

Soares e Batista (2007) relatam que a possibilidade e a frequência de ocorrência dos incêndios florestais estão intimamente ligadas às condições climáticas. Por este motivo, o conhecimento de algumas variáveis meteorológicas é essencial na prevenção dos incêndios.

Entretanto, avaliar o clima e determinar padrões climáticos não é uma tarefa fácil. As condições meteorológicas estão mudando de hora para hora, sendo essas mudanças em função de inúmeros fatores. Segundo Brown e Davis (1973), a radiação solar é responsável pela maioria dessas mudanças. Os autores explicam que como a intensidade da radiação solar é máxima no ponto em que os raios incidem perpendicularmente à superfície terrestre, ela é responsável, indiretamente, pela temperatura do solo e do ar, gerando gradientes de pressão, responsáveis pela formação e circulação das massas de ar, dando origem aos ventos.

Em função da grande heterogeneidade das condições climáticas e meteorológicas ao longo do globo, e inclusive, dentro de países com grande extensão territorial como o Brasil, por exemplo, é importante ter ciência de que o fogo irá se comportar de maneira distinta de uma área com um determinado padrão climático para outra. Portanto, é importante que modelos matemáticos do comportamento do fogo desenvolvidos em países como E.U.A., Austrália, Portugal, não sejam utilizados aqui no Brasil sem que haja uma prévia verificação de sua aplicabilidade. Inclusive, modelos desenvolvidos para uma determinada região do Brasil, podem não ser recomendados para outras regiões no mesmo país em função dos motivos já citados.

5.7.1. Precipitação pluvial

A precipitação pluvial é o resultado de um avançado estado de condensação do ar atmosférico. Ela ocorre quando uma nuvem não pode mais conter o excesso da umidade condensada. Os elementos condensados, líquidos ou sólidos, caem, então, pela ação da gravidade (SOARES e BATISTA, 2007).

É amplamente conhecido que a precipitação pluvial é um fator fundamental na redução do potencial de ocorrência de incêndios florestais (e.g., PYNE, 1984, SCHROEDER e BUCK, 1970; NILTON et al., 2006; SOARES e BATISTA, 2007; WHITE e RIBEIRO, 2011). Inclusive o sistema de classificação do risco de fogo utilizado pelo INPE em toda América do Sul, utilizam a quantidade de dias sem chuva como um fator de risco de fogo na vegetação (SETZER e SISMANOGLU, 2006).

Ao se avaliar o efeito da precipitação sobre o potencial de propagação do fogo em uma região é necessário levar em consideração não apenas a quantidade de chuva, mas também, sua distribuição estacional. Duas regiões com a mesma precipitação total anual podem apresentar características completamente diferentes com relação a risco de incêndios. Se a distribuição da chuva é uniforme durante todo o ano, sem uma estação seca definida, o potencial de ocorrência e propagação de incêndios é bem menor quando comparado com uma região em que a estação chuvosa esteja concentrada em alguns meses com longos períodos de estiagem. A distribuição da precipitação é, portanto, fator fundamental na definição do início, término e duração das estações de alto potencial de incêndio (SCHROEDER e BUCK, 1970).

Sendo assim, a precipitação é fator fundamental na redução do potencial de ocorrência e propagação dos incêndios até mesmo a zero, dependendo da quantidade de água precipitada. No entanto, condições críticas de inflamabilidade não são revertidas facilmente. Combustíveis florestais extremamente secos podem ser umedecidos superficialmente por uma chuva matinal e secarem rapidamente, tornando-se novamente inflamáveis durante a tarde (PYNE, 1984).

5.7.2. Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar consiste na razão, em porcentagem, entre a quantidade de umidade para um volume de ar e a quantidade total que aquele volume de ar pode manter para uma dada temperatura e pressão atmosférica (VIANELLO e ALVES, 1991).

Soares e Batista (2007) consideram a umidade como sendo um elemento chave na determinação das condições de potencial de incêndios. De acordo com os mesmos autores, a umidade, sob forma de vapor, age como qualquer outro gás. Ela se mistura com outros gases na atmosfera, mas mantém sua própria identidade e características.

Em função da constante troca de água entre a atmosfera e os materiais combustíveis mortos, a umidade atmosférica exerce efeito direto na inflamabilidade dos combustíveis florestais e no comportamento do fogo. O material quando seco, absorve água de uma atmosfera úmida, já quando o material está mais úmido que o ar, acaba perdendo água, sendo a quantidade de umidade que o material morto pode absorver do ar e reter dependente, basicamente, da umidade relativa do ar (SCHROEDER e BUCK, 1970).

5.7.3. Vento

O vento nada mais é do que o movimento do ar dos centros de alta pressão para os centros de baixa pressão. Globalmente, existe uma tendência dos ventos circularem dos Pólos da terra sentido Equador, tendência esta em função de que as áreas mais próximas ao Equador são mais quentes e, portanto, de menor pressão (quanto maior a temperatura do ar, menor a pressão), enquanto as áreas de maior latitude apresentam pressão do ar maior e menores temperaturas. Entretanto, além dessa circulação geral é necessário considerar outros efeitos tais como movimento de rotação da terra, fricção, relevo e massas de água, que irão originar movimentos de massas de ar locais, tornando assim bastante complexa a análise do sentido do vento na superfície terrestre (SOARES e BATISTA, 2004).

Brown e Davis (1973) citam que o aumento da velocidade do vento causa aumento na velocidade de propagação do fogo, e, conseqüentemente, incêndios mais perigosos. Entretanto, de acordo com o mesmo autor, a altura das chamas não necessariamente

aumenta com uma maior velocidade do vento, devido ao fato de que ventos muito fortes fazem as chamas assumirem uma posição com um ângulo mais agudo e de menor inclinação, explicando parcialmente, a não ocorrência de fogo na copa das árvores durante fortes ventos. Já com relação ao comprimento das chamas, existem diversos estudos que apontam uma relação direta do mesmo com a velocidade do vento e velocidade de propagação do fogo (eg. BYRAM, 1959; GOULD et al., 2007; FERNANDES, 2009).

Dentre os fatores climáticos que irão afetar os incêndios florestais, o vento é o fator de maior dificuldade de medição por ser bastante variável. Apesar de sua imprevisibilidade é muito importante o seu conhecimento já que afeta diretamente a taxa de combustão pelo aumento do fornecimento de oxigênio e também a taxa de propagação em função do fornecimento de energia por condução e convecção. Além disso, é responsável pelo arrastamento de faíscas que poderão provocar focos secundários e exerce papel fundamental em incêndios de copa, para transportar o calor e as chamas de árvore para árvore (DAVIS, 1959; SOARES, 1985; SOARES e BATISTA, 2007).

Em função das dificuldades inerentes à medição da velocidade do vento durante um incêndio florestal, Gould et al. (2007) citam que para determinar valores confiáveis é necessário que seja conhecida a variação do vento dentro e fora da floresta, que mais de um anemômetro seja utilizado e que sejam utilizados valores médios medidos em pequenos intervalos de tempo (entre 1 a 20 minutos).

5.7.4. Temperatura do ar

A temperatura ambiente do ar irá afetar a temperatura do material combustível, que é um dos fatores que determina quando o fogo irá começar e como ele irá se propagar (SCHROEDER e BUCK, 1970). O total de energia calorífica necessária para evaporar a água do material combustível e aumentar a sua temperatura para que entre em ignição está diretamente relacionado com a temperatura inicial do material combustível e a temperatura do ar (SOARES, 1985).

Segundo Soares e Batista (2007) a temperatura do ar irá variar consideravelmente tanto em tempo como no espaço, por vários motivos, a maioria dos quais relacionados com o aquecimento ou resfriamento da terra. Segundo os mesmos autores, o tipo de cobertura

do solo, a proximidade de edifícios ou árvores, o relevo e a altura em relação ao solo são fatores que necessitam ser levados em consideração ao avaliar a temperatura do ar de uma área.

Apesar de ter uma influência fundamental no processo de ignição, após a ocorrência do mesmo, o seu efeito sobre a combustão subsequente é bastante reduzido. Ainda assim, incêndios florestais de grande porte e com altas taxas de propagação do fogo estão frequentemente relacionados às altas temperaturas do ar (SOARES, 1985). Em função disso, diversos índices de perigo de ocorrência de incêndios florestais utilizados em todo o mundo (eg. Índice de Angstron, Índice Logarítmico de Telicyn; Índice de Rodriguez e Moretti; Nesterov) utilizam esta variável como fator para se determinar o perigo diário de ocorrência de incêndios. Além da temperatura, a umidade relativa do ar costuma ser utilizada em conjunto.

5.8. Material combustível florestal

O material combustível florestal nada mais é do que toda e qualquer matéria orgânica, viva ou morta suscetível de participação no processo de combustão (SOARES, 1985), ou seja, toda a biomassa presente em uma determinada área, sendo indispensável para ocorrência e propagação do fogo, já que faz parte do triângulo do fogo.

Em uma floresta, existem infinitas combinações de quantidade, tipo, tamanho, forma, posição e arranjo de materiais combustíveis. A estimativa da quantidade de combustível, geralmente expressa em termos de peso seco ao forno por unidade de área, é fator importante em planos de prevenção e controle de incêndios, especialmente em programas de queima controlada, sendo essencial, ainda que bastante trabalhosa, a sua quantificação (RIBEIRO, 2009; SOARES e BATISTA, 2007). Entretanto, apenas a quantidade não é um dado suficiente para realizar estimativas sobre o provável comportamento do fogo. A separação da quantidade em função das classes de diâmetro é fundamental nos principais modelos matemáticos de modelagem do comportamento do fogo (eg. ROTHERMEL, 1972; FERNANDES, 2001; FERNANDES e LOUREIRO, 2013).

5.8.1. Localização do material combustível

Os materiais combustíveis florestais podem ser classificados em três distintas classes em função da sua localização, e são responsáveis por três distintos tipos de incêndios florestais que podem acontecer em conjunto ou isoladamente. De acordo com Bond e Keeley (2005) e Batista (1990) os materiais combustíveis subterrâneos, composto pela matéria orgânica abaixo da linha do solo, como raízes e húmus, são responsáveis pelos incêndios subterrâneos. Os materiais combustíveis superficiais, que são aqueles próximos à linha do solo como a liteira, gramíneas e pequenos arbustos e são responsáveis pelos incêndios superficiais. Já os combustíveis aéreos, que correspondem àqueles que se encontram acima de 1,80 m de altura, compreendendo principalmente as copas das árvores e arbustos altos, são responsáveis pelos incêndios de copa. Estes três tipos de incêndios florestais podem acontecer isoladamente, com exceção dos incêndios de copa que sempre estão associados a incêndios superficiais, ou em conjunto. A análise de cada tipo de incêndio deve ser realizada separadamente, pois as variáveis que vão interferir no comportamento do fogo serão diferentes para cada estrato (CRUZ e ALEXANDER, 2010).

A distribuição vertical do material combustível e a intensidade do incêndio superficial são dois importantes critérios na transformação de incêndios superficiais em incêndios de copa (VAN WAGNER, 1977a). Quando existe uma continuidade do material combustível superficial para o material combustível aéreo, como pode ocorrer em florestas naturais de eucalipto com uma vegetação sub-bosque alta, é mais alta a probabilidade de ocorrência de incêndios de copa, que costumam ser os mais intensos e devastadores.

5.8.2. Quantidade de material combustível

A quantidade de combustível em uma floresta pode variar bastante a depender da espécie, do espaçamento e da idade da vegetação. Na determinação da quantidade de material combustível em uma floresta deve-se separar a quantidade total da quantidade disponível, sendo quantidade total o somatório de todo material combustível existente no piso da floresta, enquanto que combustível disponível é apenas a parte do combustível que poderá ser consumida durante um incêndio florestal (SOARES e BATISTA, 2007).

Segundo os mesmos autores, a quantidade de material combustível disponível depende de várias outras propriedades, particularmente a proporção de material vivo e morto, o tamanho das partículas, o conteúdo de umidade e sua continuidade.

Dependendo dos fatores supracitados, a quantidade de material combustível disponível pode variar significativamente. A sua estimativa constitui um dos principais passos para a avaliação do comportamento do fogo, delineamento de planos de prevenção e controle e realização de queimas controladas, sendo normalmente medido através de amostragens destrutivas e expressa em termos de peso seco ao forno por unidade de área (BROWN et al., 1981). De acordo com Soares (1985) 70 a 80% do material combustível disponível em uma floresta é formado por materiais com diâmetro inferior a 2,5 cm.

Em períodos chuvosos, o material combustível disponível para queima costuma diminuir bastante. Segundo Rego e Botelho (1990) a disponibilidade do material combustível pode mudar de acordo com a hora, a época do ano, o estrato, o tempo atmosférico, a vegetação e a intensidade do fogo. Tais fatores irão interferir diretamente no teor de umidade do material combustível tornando-o disponível ou não para queima. Em função desta relação, existe a necessidade de constante monitoramento das condições climáticas para se determinar a quantidade de material combustível disponível.

5.8.3. Umidade do material combustível

A umidade do material combustível constitui a porcentagem de água contida no mesmo em relação ao seu peso seco. De acordo com Schroeder (1969) o conteúdo de umidade é a mais importante propriedade que controla a probabilidade do material combustível queimar ou não.

Quanto maior o teor de umidade, maior será a quantidade de energia necessária para que o material entre em ignição. Ocorre que, antes do material queimar, é necessário que toda a sua água seja primeiramente evaporada (REGO e BOTELHO, 1990). Materiais com teores de umidade acima de 30% costumam não entrar em ignição durante os incêndios florestais (SOARES e BATISTA, 2007; SCOTT e BURGAN, 2005). Esta é a chamada "umidade de extinção do material combustível". Apenas materiais com teores de umidade abaixo da "umidade de extinção" estão disponíveis para a queima.

Os combustíveis vivos e mortos possuem diferentes mecanismos de retenção de água e diferentes respostas às variações do clima. Materiais mortos costumam perder ou ganhar umidade mais rapidamente e com maior intensidade enquanto que o teor de umidade nos materiais vivos costuma ser maior e mais constante. Segundo Batista (1990), o teor de umidade dos materiais mortos é raramente menor que 2%, podendo exceder 200% logo após períodos prolongados de precipitação. Já para algumas plantas vivas, a umidade pode atingir os 300% em brotações novas, no início do ciclo de crescimento, baixando para até 50% para folhagens entrando em dormência, começando a amarelar.

Portanto, torna-se perceptível que a influência da umidade nos materiais combustíveis é mais evidente nos combustíveis de pequenas dimensões. Soares e Batista (2007) citam que o material morto é mais seco e responde mais rapidamente às variações meteorológicas, sendo, portanto, o principal responsável pela propagação dos incêndios florestais.

Em função da grande importância do diâmetro do material combustível no comportamento do fogo, os combustíveis florestais costumam ser classificados em função do tempo de resposta, ou *timelag*, que leva em consideração justamente o tempo necessário para que a umidade deste material entre em equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente. A relação área superficial pelo volume possui relação direta com o tempo de resposta dos materiais combustíveis (DEEMING et al. 1977; BEUTLING, 2005). O assunto será mais debatido adiante.

5.8.4. Higroscopicidade do material combustível

De acordo com Schroeder e Buck (1970) materiais denominados higroscópicos são aqueles que possuem a capacidade de adsorver água. O caráter higroscópico do material combustível é um fator muito importante nas relações do clima com a umidade do combustível. Através da higroscopicidade, o material pode adsorver vapor d'água do ar. A água que o material adsorve do ar é chamada de água higroscópica.

A quantidade de água higroscópica nos combustíveis é determinada em parte pela temperatura do ar, mas de acordo com Countryman (1977), a umidade relativa do ar é o principal fator controlador. Ambos os fatores climáticos possuem um efeito determinante

na taxa pela qual a água higroscópica evapora ou é adsorvida pelo combustível, quando não existem condições de equilíbrio. Entretanto, como já citado anteriormente, a velocidade com que o material irá ganhar ou perder umidade do meio irá depender não só das condições climáticas, mas também em função de seu diâmetro, comumente separado em classes de *timelag* padronizadas por Deeming et al. (1977) e utilizadas pelo Sistema Nacional Norte Americano de Perigo de Incêndio.

5.8.5. *Timelag* ou tempo de resposta

O teor de umidade do material combustível inserido dentro de um ambiente com temperatura e umidade constantes irá aumentar ou diminuir até, eventualmente, atingir um teor de umidade constante, chamado de umidade de equilíbrio (*Equilibrium moisture content* - EMC) (NELSON JR., 1984). Isto ocorre quando a pressão de vapor do combustível iguala-se à da atmosfera (CATCHPOLE et al., 2001). Entretanto, na prática, a umidade de equilíbrio nunca é atingida uma vez que as condições ambientais estão sempre mudando ao longo do dia (BATISTA, 1984). Sendo assim, tal conceito é aplicável apenas para condições de laboratório, onde as variáveis ambientais podem ser mantidas estáveis ao longo do tempo.

Byram (1963) definiu *timelag* como o intervalo de tempo requerido para a umidade do material combustível perder aproximadamente 63% de diferença entre um valor inicial uniforme de equilíbrio para um novo equilíbrio, depois do ambiente ter mudado instantaneamente.

Baseado na propriedade higroscópica do material combustível, no conceito da umidade de equilíbrio e no princípio do *timelag*, Byram (1963) demonstrou que o tempo de resposta do material combustível pode ser definido em função da teoria de difusão:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M - q}{\tau}$$

Onde:

M = Teor de umidade da partícula no tempo t (%);

q = Umidade de Equilíbrio (%);

τ = Constante definida como tempo de resposta do material combustível.

A solução da equação para uma constante q , mostra que τ é o tempo necessário para o material perder ou ganhar 63% do seu teor de umidade original para a umidade de equilíbrio. Sendo que τ está diretamente relacionado ao diâmetro da partícula, o material combustível florestal é classificado nas seguintes classes de diâmetro (BYRAM, 1963; ROTHERMEL, 1972; DEEMING et al., 1977; BATISTA, 1990; SOARES e BATISTA, 2007):

1. (1-h) Classe de 1 hora de *timelag*, correspondente aos combustíveis com diâmetro inferior a 0,7 cm;
2. (10-h) Classe de 10 horas de *timelag*, correspondente aos combustíveis com diâmetro entre 0,7 e 2,4 cm;
3. (100-h) Classe de 100 horas de *timelag*, correspondente aos combustíveis com diâmetro entre 2,5 e 7,6 cm;
4. (1000-h) Classe de 1000 horas de *timelag*, correspondente aos combustíveis com diâmetro superior a 7,6 cm.

5.8.6. Tipo do material combustível

A facilidade de ignição do material combustível, e a velocidade de propagação do fogo, vão depender, dentre outros fatores, do tipo de material combustível presente para a queima. Rego e Botelho (1990) afirmam que uma expressão das dimensões dos combustíveis é a denominada relação superfície/volume. Isto influencia diretamente as características dos materiais combustíveis e, conseqüentemente, o comportamento do fogo. Quanto maior a área superficial e menor o volume (uma folha, por exemplo), maior a transferência de calor, e, portanto, mais rápido o material entra em processo de ignição. Porém, quanto maior o volume e menor a superfície de contato (um galho, por exemplo)

menor a transferência de calor. Portanto, o material combustível com maior volume necessitará de uma maior quantidade de energia para entrar em processo de ignição.

Soares e Batista (2007) classificam e caracterizam os tipos de combustíveis florestais da seguinte forma:

a) perigosos: materiais secos (mortos) com diâmetro igual ou inferior a 1,0 cm; constituem-se de pequenos galhos, folhas, líquens, musgos e gramíneas. Em função de uma alta relação área superficial por volume, esses materiais apresentam menor temperatura de ignição, queimando rapidamente com produção de calor e chamas intensas.

b) semi-perigosos: materiais secos com diâmetro acima de 1,0 cm; constituem-se de galhos, troncos caídos, tocos, húmus e turfa. São materiais que possuem uma menor relação área superficial por volume, sendo assim a transferência de calor não é tão eficiente quanto nos materiais perigosos e, por isso, possuem dificuldade em entrar em ignição. Apesar desta ignição mais lenta e difícil, estes materiais desenvolvem intenso calor e podem manter-se em combustão latente, com risco de reiniciar incêndios dados como controlados.

c) verdes: constitui a vegetação viva existente na floresta. Embora existam materiais verdes com uma alta relação área superficial por volume, folha e pequenos galhos, estes combustíveis podem ser considerados como não-inflamáveis devido ao alto teor de umidade, excetuando-se as coníferas resinosas. Entretanto, o calor liberado pela combustão de outros combustíveis pode secar estes materiais, tornando-os igualmente inflamáveis durante um incêndio florestal.

Apesar de prática, a respectiva classificação não costuma ser aplicada nos procedimentos de modelagem do comportamento do fogo. A classificação padronizada e comumente usada em todo o mundo é em função do *timelag* do material combustível (DEEMING et al. 1977; BROWN et al., 1981; ANDREWS, 2009):

- Material combustível morto de diâmetro menor ou igual a 0,7cm;
- Material combustível morto de diâmetro entre 0,71 e 2,5cm;
- Material combustível morto de diâmetro entre 2,51 e 7,6cm;

- Material combustível vivo herbáceo (materiais vivos não lenhosos de caule macio e maleável e com aspecto de erva);
- Material combustível vivo lenhoso (inclui a folhagem viva e pequenos ramos da planta com diâmetro inferior a 0,7cm).

No modelo matemático de Rothermel (1972), a carga dos materiais combustíveis mortos de diâmetro superior a 7,6cm (1000h de *timelag*) e a carga dos materiais combustíveis vivos com diâmetro superior a 0,7cm não são utilizados devido ao fato de que a importância destes materiais no estudo do comportamento do fogo não é significativa, já que costumam não influenciar a intensidade da linha do fogo, pois demoram muito tempo para entrar em ignição ou não chegam a queimar (ROTHERMEL, 1972; DEEMING et al., 1977).

5.9. Inclinação do relevo

Segundo Whelan (1998) a inclinação faz com que o fogo se propague mais rapidamente nos aclives e mais lentamente nos declives. De acordo com Pyne (1984) quanto maior o grau de inclinação do aclive, maior será a velocidade de propagação do fogo.

A inclinação do relevo contribui com o aumento da velocidade de propagação do fogo na medida que o fogo seca e aquece o material localizado na parte superior do aclive com maior intensidade; a corrente de ar quente originada pelo fogo no vale encaminha-se para a parte superior da montanha e o ar fresco é aspirado pela parte inferior, renovando assim o suprimento de gás comburente; conseqüentemente, recebendo maior quantidade de calor e secando-se mais rapidamente, o material combustível do topo vai queimar com maior facilidade e intensidade (SOARES e BATISTA, 2007).

A variação da altitude, presente em regiões montanhosas, também irá alterar o comportamento do fogo de forma indireta, através de sua interferência no sentido de propagação dos ventos, na distribuição espacial da precipitação pluvial e no tipo de vegetação (SCHROEDER e BUCK, 1970).

Experimentos realizados por Goldammer (1982) determinam que a velocidade de propagação do fogo dobra em aclives de 10° e se torna até 4 vezes maior em aclives de 20°. Beutling (2009) menciona com base em experimentos laboratoriais que a partir de 15° a inclinação do terreno passa a ser o fator determinante na velocidade de propagação do fogo, independente da quantidade de material combustível disponível sobre o piso florestal.

5.10. Silvicultura preventiva e gestão do material combustível

O impacto que um determinado incêndio florestal irá causar dentro de uma paisagem irá ser definido em função de sua intensidade, que por sua vez, irá depender das características do clima, do relevo e da vegetação. Entretanto, o homem pode apenas condicionar o último fator, assim sendo, as ações de silvicultura preventiva e de gestão do combustível deverão ser realizadas a fim de proteger uma área dos incêndios florestais (FERNANDES, 2007).

A gestão do combustível compreende três técnicas básicas: redução, isolamento e conversão (PYNE et al., 1996). A redução, ou também chamada modificação, atua sobre a quantidade e arranjo estrutural da vegetação, no sentido de diminuir a intensidade do fogo. Ex: corte manual ou mecânico do sub-bosque, fogo controlado, tratamento químico, etc. O isolamento procura quebrar a continuidade das formações vegetais, compartimentando-as com faixas de largura variável nas quais a vegetação é eliminada ou modificada com o objetivo de confinar um incêndio. Ex: aceiros e estradas. A estratégia de conversão consiste em substituir o plantio em uma determinada área crítica por um tipo de vegetação que reduz a magnitude do comportamento do fogo e que pode chegar a inibir sua propagação.

Os benefícios advindos da gestão dos combustíveis florestais não garantem 100% que uma área deixará de queimar, entretanto, um campo tratado aumentará a facilidade de combate ao incêndio e tornará a tática de supressão utilizada efetiva, em função da redução da intensidade do fogo.

Apesar de ter um custo razoável, recomenda-se a adoção de práticas de gestão do material combustível em áreas com alto risco e perigo de incêndios florestais, afinal, o

custo combinado em supressão, danos e reabilitação, associados a um incêndio de elevada severidade, é consideravelmente mais alto que os custos de gestão (FERNANDES, 2007).

5.10.1. Gestão através de queimas controladas

Conforme salientado anteriormente, uma queima controlada consiste na utilização do fogo de forma controlada como técnica de manejo do material combustível.

De acordo com McArthur (1962) o fogo pode ser apenas utilizado quando se tem ciência de como o mesmo irá se comportar e quais os efeitos que causará ao ambiente. Sem o conhecimento destes pré-requisitos básicos não é recomendado fazer o uso do fogo, seja para fins silviculturais, de limpeza ou para controle de incêndios.

A técnica da queima controlada costuma ser utilizada com diferentes objetivos: redução do risco de incêndio, melhoria das condições da terra para plantio ou regeneração natural, eliminação de espécies indesejadas, controle de surtos de pragas e doenças, limpeza de terreno, dentre outras. Dentre estes objetivos, Martin et al. (1977) citam que a redução do risco de incêndio é realizada através da redução ou manejo do material combustível. De acordo com o mesmo autor, a queima controlada pode ser o meio mais econômico, e, em algumas situações, o mais efetivo para se conseguir determinados objetivos.

Embora nos últimos anos a silvicultura preventiva e a gestão dos combustíveis tenha recebido um impulso notável, no Brasil são muito escassos os exemplos de intervenção na vegetação como um componente fundamental e temporalmente persistente da gestão do fogo. Entretanto, em países como E.U.A. (que teve o fogo controlado sancionado oficialmente desde 1943), Canadá e Austrália muitas áreas são queimadas todos os anos, tendo como finalidade a redução do risco de incêndios florestais de grande porte. Destaca-se o fogo controlado nos pinhais do sudoeste dos E.U.A. e nos eucaliptais da Austrália (PYNE et al., 1996).

5.11. O comportamento do fogo

De acordo com Soares e Batista (2007) o comportamento do fogo é um termo genérico para designar o que o fogo faz, referindo-se à maneira como o material combustível entra em combustão, como se desenvolvem as chamas, como o fogo se propaga e demais aspectos do fogo. Embora o termo compreenda um conjunto de fenômenos dos mais diversos possíveis, ele é utilizado apenas para descrever as características mais perceptíveis à escala humana (PYNE et al., 1996).

Em função do crescente valor econômico associado às florestas plantadas para fins industriais e à crescente preocupação com a preservação da biodiversidade, surgiu a necessidade de sistematizar o planejamento das atividades associadas à supressão de incêndios. Os primeiros estudos relacionados à modelagem do comportamento do fogo foram realizados ainda na primeira metade do século XX (FONS, 1946) e serviram de base para o desenvolvimento de modelos mais precisos utilizados hoje em dia.

A avaliação do comportamento e do efeito do fogo constitui um passo importante no manejo dos incêndios florestais. Quando utilizado por pessoas que possuem experiência no combate ao fogo, as previsões podem ser aplicadas com sucesso para diversas atividades relacionadas ao seu manejo, como, por exemplo, realização de queimadas controladas, determinação do perigo de ocorrência de incêndios, delineamento das áreas de maior risco, dentre outros (ANDREWS et al., 2003; ANDREWS et al., 2005). Além disso, os dados podem ser utilizados para treino das forças de combate, atividades relacionadas com a prevenção das ignições de origem humana, definição dos níveis de prontidão e do pré-posicionamento dos meios de supressão, planejamento da intensidade do ataque, etc. (STOCKS, 1989).

De acordo com Scott (2012) existem quatro características do comportamento do fogo primárias que irão afetar diretamente outras características como a produção de fumaça, a altura de crestamento e a severidade do fogo, são elas: a velocidade de propagação do fogo, a energia liberada por unidade de área, a intensidade da linha do fogo e o comprimento das chamas.

Segundo Brown et al. (1991) uma outra característica do fogo importante de se ter conhecimento, principalmente para a realização de queimas controladas, é o consumo do

material combustível pós-fogo. De acordo com o autor, a remoção da camada orgânica e da biomassa lenhosa, com o objetivo de reduzir os riscos de incêndio, é frequentemente necessária em determinadas culturas onde o risco e perigo de incêndios de grande porte é alto. Entretanto, nem toda a camada orgânica deve ser queimada. É necessária parte de sua manutenção e do material lenhoso pode para proteger o local das intempéries, aumentar a atividade microbiana, manter a produtividade a longo prazo e proteger o *habitat* de pequenos animais. Assim, afirma o autor, que para se chegar a um termo comum entre tantos objetivos conflitantes, o consumo do material combustível deve ser competentemente planejado e executado.

Uma outra característica importante do comportamento do fogo, principalmente do ponto de vista ecológico, é o tempo de residência das chamas, ou intervalo de tempo em que a frente do fogo permanece num determinado ponto. Essa importância se deve ao fato de que os danos causados à vegetação dependem não apenas da temperatura do fogo, mas também do tempo de exposição da vegetação a essa temperatura (SOARES e BATISTA, 2007).

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

CAPÍTULO III

REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

(MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO E O *BEHAVEPLUS*)

CAPÍTULO III - MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO E O *BEHAVEPLUS*

4. REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

5.12. Modelagem do comportamento do fogo

A modelagem do comportamento do fogo consiste na descrição numérica do mesmo, permitindo assim interpretações de indiscutível utilidade no que diz respeito à gestão das atividades associadas à minimização dos efeitos negativos dos incêndios e à otimização do uso do fogo controlado (FERNANDES, 2002; ANDREWS et al., 2005).

Apesar da complexidade deste fenômeno, ferramentas computacionais de simulação baseadas em modelos matemáticos e físicos, tornam o procedimento mais simples, bastando apenas fornecer as variáveis de entrada relativas às características do material combustível, clima e relevo para prever o comportamento do fogo. Tais ferramentas são amplamente utilizadas em países como Estados Unidos, Canadá e Austrália, entretanto são pouco conhecidas em outros países, inclusive no Brasil (ANDREWS et al., 2005; ANDREWS, 2010; WHITE et al., 2013a).

5.13. O Modelo matemático de Richard C. Rothermel

Richard C. Rothermel era um engenheiro aeronáutico que trabalhava no Departamento de Agricultura Norte Americano em Missoula (Montana) e desenvolveu um modelo matemático para descrever o comportamento de um fogo superficial. Na década de 1980 seu modelo passou a ser utilizado intensamente e, ao longo dos anos, esteve na base do desenvolvimento de diversas novas tecnologias (WELLS, 2008).

O modelo de propagação do fogo de Rothermel (1972) foi o primeiro modelo matemático utilizado pelo Serviço Florestal Norte Americano e continua sendo a principal ferramenta até os dias atuais, constituindo a base matemática de muitos softwares utilizados para o seu manejo (WELLS, 2008). Segundo o mesmo autor, o modelo é uma

simples caricatura da realidade. Ele reduz o incêndio florestal a um conjunto de equações operantes em um universo hipotético em que os incêndios são pequenos e uniformes nos combustíveis mortos no chão da floresta. O modelo não precisa saber qual espécie de árvore ou arbusto está crescendo no local, ele tenta apenas descrever matematicamente o processo físico e químico do fogo.

A aplicação do modelo de Rothermel não é possível sem informação detalhada e quantitativa acerca das propriedades físicas e químicas do combustível. Para tornar o modelo aplicável ao mundo real é necessário determinar valores singulares médios que representem o material combustível, valores estes que necessitam estar classificados em função das classes de diâmetro (FERNANDES, 2002).

No ano em que Rothermel se aposentou, o laboratório de Missoula de estudo do fogo incorporou o seu modelo em diversos *softwares* de predição que atualmente são utilizadas pelos profissionais responsáveis pelo manejo do fogo (FINNEY, 2004). Estes *softwares* são conhecidos como sistemas de suporte à decisão porque elas são utilizadas como base para suportar o julgamento de um analista de comportamento de fogo.

Softwares de predição do comportamento do fogo como o *BehavePlus*, uma versão mais atualizada do original *BEHAVE*, desenvolvido por Andrews et al. (2003), utiliza o modelo de Rothermel junto com outros modelos matemáticos para criar uma ferramenta mais moderna que possa representar melhor a realidade (ANDREWS, 2008).

Com o passar dos anos, estes programas computacionais têm sido periodicamente refinados à medida que pesquisadores desenvolvem meios mais apurados de caracterizar as variáveis de entrada: umidade do material combustível, velocidade do vento, dentre outros (FINNEY, 2004); e à medida que novos modelos matemáticos mais precisos vêm sendo desenvolvidos.

5.14. *BEHAVE e BehavePlus*

Existem diversos *softwares* que são usados para se estudar o comportamento do fogo, entretanto um dos mais importantes é o “*BEHAVE: fire behavior prediction system*” (ANDREWS, 1986), posteriormente substituído pelo “*BehavePlus fire modeling system*” (ANDREWS et al. 2003). Segundo Barrett et al. (2000) este sistema, na época em que o

estudo foi publicado, era utilizado por cerca de 85% dos gestores de fogo prescrito no Oeste dos Estados Unidos da América. Dados mais recentes de Andrews (2010) indicam que o *BehavePlus*, ainda é, de longe, o programa de avaliação do comportamento do fogo mais utilizado nos Estados Unidos da América. De acordo com a autora, a razão do mesmo ser utilizado por tantas pessoas se dá em função do programa não ter sido desenvolvido para aplicações específicas. O programa dá às pessoas uma compreensão básica a respeito de incêndios florestais, podendo ser utilizado para sugerir opções alternativas de manejo do fogo, para ter uma compreensão sobre os modelos matemáticos, para desenvolver queimadas controladas, para auxiliar em atividades de pesquisa, para fazer investigações pós-incêndio, dentre diversas atividades normalmente limitadas em outros sistemas (ANDREWS, 2010).

O sistema *BEHAVE* e *BehavePlus* são baseados, principalmente, no modelo da propagação do fogo superficial de Rothermel (1972) (Figura 2).

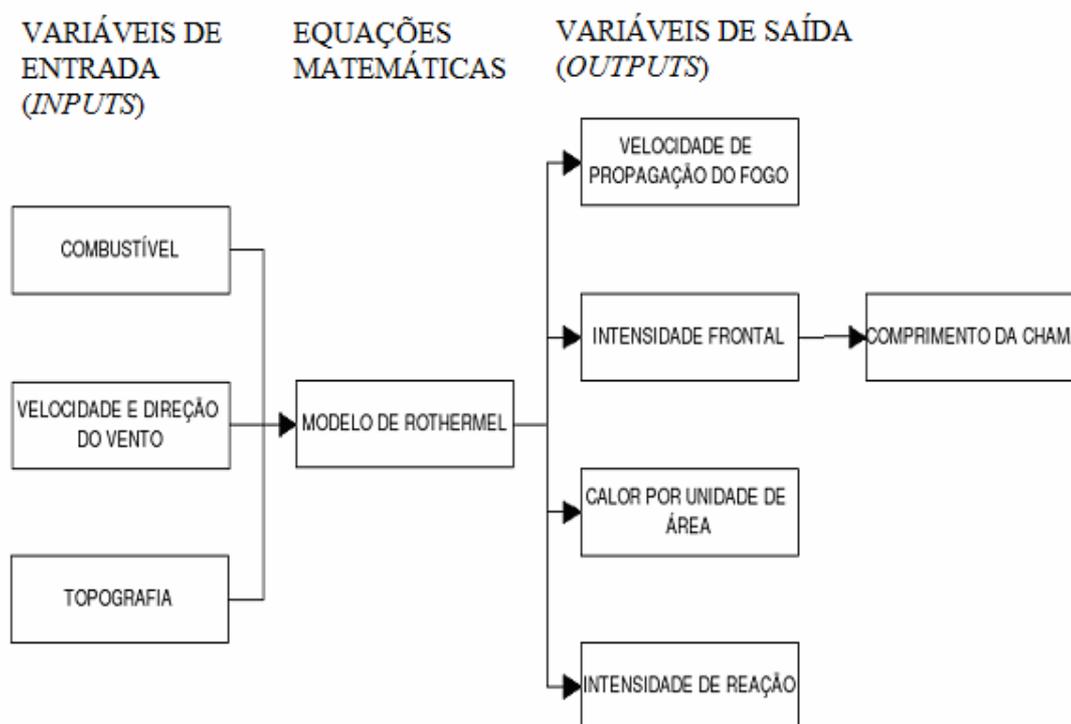


Figura 2 - Diagrama esquemático da utilização do modelo de Rothermel para a previsão do comportamento do fogo (Adaptado de Almeida, 2008).

Além do modelo matemático de Rothermel (1972), o *BehavePlus* conta com um conjunto de diversos outros modelos, como o da intensidade da linha de fogo de Byram (1959), e o da taxa de transição para incêndio de copa de Van Wagner (1977a), por exemplo. Ao total, em sua última versão (5.0) lançada em 2009, existem 35 modelos, descritos em 42 publicações, integrados à sua base de dados (ANDREWS, 2009).

Tanto no *BEHAVE* quanto no *BehavePlus* as características do material combustível, da umidade do material combustível, do vento e do relevo são assumidas como constantes durante o período em que as previsões estão sendo aplicadas. Devido ao fato dos incêndios praticamente ocorrerem em condições não uniformes, decisões sobre a duração do período de projeção e escolha do material combustível necessitam ser tomadas com muita precaução. Quanto mais uniformes as condições, as previsões podem ser utilizadas por mais tempo. Quando o fogo queima de um tipo de vegetação para outro, como por exemplo, de um campo gramíneo para liteira de uma floresta, o tipo do material combustível, assim como sua umidade, a inclinação do relevo, e a velocidade do vento devem ser mudados (ANDREWS, 1986).

A capacidade do *BehavePlus* em modelar o comportamento do fogo está agrupada em módulos (Quadro 1). O termo modelo se refere às relações matemáticas que descrevem um aspecto específico do fogo, como velocidade de propagação, altura de crestamento, fator de ajuste da velocidade do vento, dentre outros (ANDREWS e QUEEN, 2001).

Quadro 1 - Cálculos realizados pelo *BehavePlus* de acordo com o Módulo. Fonte: Andrews (2008).

MÓDULO	CÁLCULOS
<i>SURFACE</i> (SUPERFICIAL)	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de propagação do fogo superficial. • Intensidade da linha do fogo e comprimento das chamas. • Intensidade de reação e energia calorífica por unidade de área • Valores intermediários: Fonte de calor, característica da umidade do material combustível morto, taxa de compactação, etc. • Padrões, customizados, e casos especiais de modelos do material combustível. • Fator de ajuste da velocidade do vento
<i>CROWN</i> (COPA)	<ul style="list-style-type: none"> • Transição de incêndio superficial para incêndio de copa. • Velocidade de propagação do incêndio de copa. • Área e perímetro. • Tipo de incêndio de copa.
<i>SAFETY</i> (SEGURANÇA)	<ul style="list-style-type: none"> • Tamanho da área segura baseada no comprimento das chamas. • Área, perímetro e distância segura.
<i>SIZE</i> (TAMANHO)	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo elíptico. • Área, perímetro e forma do incêndio.
<i>CONTAIN</i> (CONTROLE)	<ul style="list-style-type: none"> • Sucesso do controle do fogo através de um único ou múltiplos recursos com base no tempo de resposta, tipo de ataque ao fogo e duração dos recursos. • Área e perímetro da área consumida pelo fogo e tamanho do fogo durante o ataque inicial.
<i>SPOT</i> (PONTO)	<ul style="list-style-type: none"> • Distância máxima para ocorrência de novas ignições a partir de fagulhas carregadas pelo vento (<i>spotting</i>).
<i>SCORCH</i> (CRESTAMENTO)	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de crestamento da copa com base no comprimento do fogo superficial.
<i>MORTALITY</i> (MORTALIDADE)	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidade de mortalidade da planta com base na espessura da casca e na altura de crestamento.
<i>IGNITE</i> (IGNIÇÃO)	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidade de ignição através de faíscas ou através de raios.

5.14.1. Variáveis de entrada do *BehavePlus*

O primeiro passo para simular o comportamento do fogo é a obtenção dos valores de entrada do modelo (*inputs*) para as condições de material combustível, relevo e clima,

sobre o qual o fogo irá se propagar. Um exemplo é dado no Quadro 2, no qual estão descritas as variáveis de entrada necessárias para calcular as características de um fogo superficial (Módulo Superficial).

Quadro 2 - Relação das variáveis de entrada necessárias para simular o comportamento da frente do fogo em um incêndio superficial utilizando o *BehavePlus* (Andrews, 2008).

Descrição	Variáveis de Entrada (Inputs)
Variáveis de caracterização do material combustível superficial	Modelo do material combustível Tipo do modelo do material combustível Carga do material combustível de 1-h de <i>timelag</i> (t/ha) Carga do material combustível de 10-h de <i>timelag</i> (t/ha) Carga do material combustível de 100-h de <i>timelag</i> (t/ha) Carga do material vivo herbáceo (t/ha) Carga do material vivo lenhoso (t/ha) Área superficial pelo volume do material de 1-h de <i>timelag</i> (m^2/m^3) Área superficial pelo volume do material vivo herbáceo (m^2/m^3) Área superficial pelo volume do material vivo lenhoso (m^2/m^3) Espessura do Leito (m) Umidade de extinção do material combustível morto (%) Energia calorífica do material combustível morto (kJ/kg) Energia calorífica do material combustível vivo (kJ/kg)
Variáveis de caracterização do teor de umidade do material combustível superficial	Umidade do material combustível de 1-h de <i>timelag</i> (%) Umidade do material combustível de 10-h de <i>timelag</i> (%) Umidade do material combustível de 100-h de <i>timelag</i> (%) Umidade do material vivo herbáceo Umidade do material vivo lenhoso
Variável de caracterização do clima	Velocidade do vento a 1,8m de altura (Km/h)
Variável de caracterização do relevo	Declividade do terreno (%)

Um grupo de parâmetros de entrada que requer especial atenção e trabalho é o que caracteriza o material combustível em função da sua heterogeneidade e irregularidade na distribuição espacial das partículas.

Na base de dados do *BehavePlus* existem 56 modelos padrões de material combustível superficial descritos por Scott e Burgan (2005). A opção por se utilizar um modelo padrão poupa tempo e esforço do pesquisador, já que é necessário muito trabalho de campo para descrever tais valores referentes a um determinado tipo de vegetação. Entretanto, deve-se levar em conta que os modelos existentes foram criados com o objetivo de caracterizar as principais formações vegetacionais encontradas nos Estados Unidos. Em função das características vegetacionais peculiares encontradas nas diferentes regiões do globo, diversos autores (eg. BURGAN, 1987; GRABNER et al., 1997; FERNANDES, 2002; REINHARDT e KEANE, 2009; WHITE et al., 2013a) recomendam que, para realizar uma eficiente simulação do comportamento do fogo, o pesquisador opte por utilizar modelos customizados do material combustível, que são construídos a partir da obtenção de valores estatísticos médios dos parâmetros que representam o material combustível local.

Neste estudo, o *BehavePlus* será utilizado para simular a velocidade de propagação e o comprimento das chamas. As variáveis de entrada que serão necessárias para realização destas simulações são discutidas abaixo:

5.14.1.1. Modelo do material combustível

Constitui um conjunto de valores numéricos que descrevem as variáveis de entrada, relativas à caracterização da vegetação no *BehavePlus*. A escolha por um modelo deve ser feita apenas quando o usuário decidir por utilizar um dos modelos padrões de material combustível descritos por Scott e Brugan (2005). Como neste estudo será desenvolvido um modelo customizado, este campo será deixado em branco.

5.14.1.2. Tipo do modelo do material combustível

O modelo do material combustível pode ser estatístico (S) ou dinâmico (D). No modelo dinâmico, uma parte do material da categoria “combustível vivo herbáceo” é transferido para a categoria “combustível morto herbáceo”, dependendo do seu teor de umidade. Quanto menor o teor de umidade, maior é a transferência (Andrews, 2008) (Tabela 3).

Tabela 3 - Porcentagem do material combustível vivo herbáceo transferido para a categoria Material Combustível Herbáceo Morto (Andrews, 2008).

Teor de umidade do material combustível vivo herbáceo (%)	Material combustível vivo herbáceo transferido para material combustível morto (%)
120	0,1
110	11,2
100	22,3
90	33,4
80	44,5
70	55,6
60	66,7
50	77,8
40	88,9
30	100

Segundo Andrews (2008) a equação de transferência é a seguinte:

$$Fração = 1,33 - 0,0111 \times M$$

Onde:

Fração = porcentagem do material combustível vivo herbáceo que será transferida para a categoria material combustível morto herbáceo;

M = teor de umidade do material combustível vivo herbáceo (%)

No modelo do material combustível estatístico (S) não ocorre transferência do material combustível vivo herbáceo para a categoria de material combustível morto herbáceo, portanto considera-se o material combustível vivo herbáceo como não inflamável.

A utilização do modelo do material combustível dinâmico é a mais recomendável, já que irá representar com maior realidade o que ocorre durante um incêndio florestal, que é a queima de uma determinada parte do material combustível herbáceo, a depender do seu teor de umidade (WHITE et al., 2013b).

5.14.1.3. Carga do material combustível

A carga do material combustível constitui a quantidade de material disponível para queima, livre de qualquer quantidade de água. Segundo diversos autores (eg. ROTHERMEL, 1972; TROLLOPE et al., 2002; SOARES e BATISTA, 2007), quanto maior a disponibilidade de material combustível, maior a intensidade do fogo (Figura 3). Sua unidade padrão é toneladas por hectare.

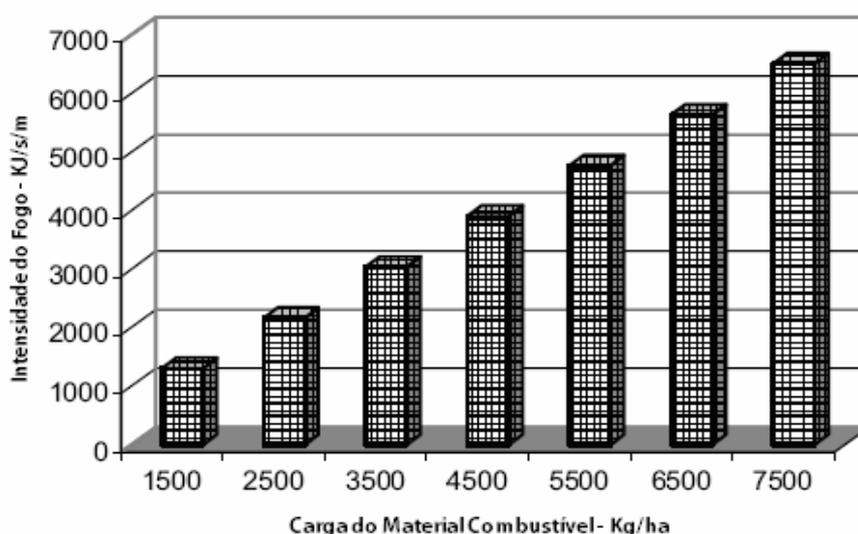


Figura 3 - Intensidade do fogo de acordo com a carga do combustível (Adaptado de Trollope et al., 2002).

5.14.1.4. Relação área superficial pelo volume

Nas reações químicas envolvendo materiais sólidos, a área superficial pelo volume é um importante fator em sua reatividade, ou seja, a velocidade em que a reação química irá proceder. Materiais com uma alta relação área superficial pelo volume (pequeno diâmetro, não compacto ou muito poroso) reagem bem mais rápido que materiais com uma menor relação (com maior diâmetro, compactos) devido ao fato do mesmo possuir uma maior superfície disponível para a reação (VOGEL, 1988).

A área superficial pelo volume dos principais materiais combustível de 1h de *timelag* encontrados nos Estados Unidos são descritos por Brown (1970) (Tabela 4).

Tabela 4 - Relação da área superficial pelo volume do material combustível fino das principais espécies encontradas nos Estados Unidos. Fonte: Brown (1970).

Espécie	Área superficial pelo volume média (m ² /m ³)
<i>Picea engelmannii</i>	5420
<i>Pinus ponderosa</i>	5760
<i>Pinus contorta</i>	6470
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6910
<i>Abies grandis</i>	7290
<i>Pinus monticola</i>	9050
<i>Eucalyptus sp.</i>	6180
<i>Alectoria sarmentosa</i>	63240

De acordo com Andrews (2008) e Scott e Burgan (2005), o valor da área superficial pelo volume dos materiais combustíveis da classe de 10h e de 100h de *timelag* são padronizados em 358 m²/m³ e 98 m²/m³, respectivamente.

5.14.1.5. Espessura do leito do material combustível

O modelo de Rothermel é bastante sensível à espessura do leito do material combustível superficial. Seu valor é assumido de forma uniforme para um determinado

modelo, sendo assim, é necessário estimar um valor médio para a área em estudo (ANDREWS, 2009).

Ela pode ser determinada pelo método de Brown e Davis (1973), chamado de “profundidade média da partícula mais alta”. Albin (1976a) demonstra que para vegetações arbustivas, a espessura do leito do material combustível superficial é aproximadamente 63,3% da média da partícula mais alta (Figura 4).

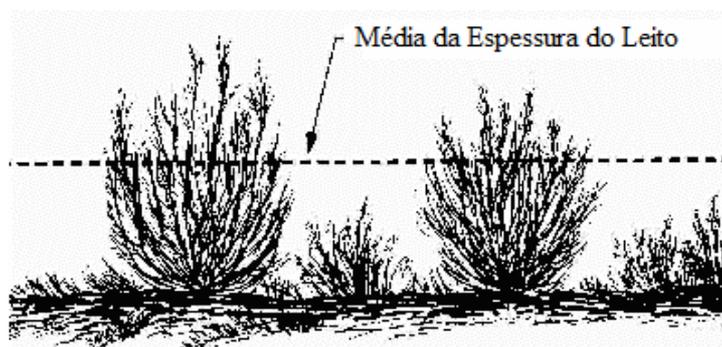


Figura 4 - Média da espessura do leito do material combustível (Adaptado de Andrews, 2009).

A espessura do leito é uma variável de entrada necessária para se determinar a densidade do leito do material combustível (*fuel bed bulk density*), que por sua vez é uma variável intermediária do modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel. A densidade do leito do material combustível é o peso total do combustível seco, dividido pelo volume da espessura do leito (kg/m^3).

5.14.1.6. Umidade de extinção do material combustível morto

A umidade de extinção do material combustível é o teor de umidade em que o material combustível se torna inoperante, ou seja, não entra em combustão. Abaixo desse valor, o material combustível constitui uma fonte de energia e contribui com a propagação do fogo superficial (ANDREWS, 2009).

Segundo Brown e Davis (1973) o valor da umidade de extinção é determinado em função do nível de compactação do banco combustível, tamanho da partícula, velocidade do vento e declividade. De acordo com os autores, o valor da respectiva variável está

fixado em 12 % para vegetação de gramíneas e 40% para liteira de conífera. Soares e Batista (2007) relatam que, normalmente, a umidade de extinção para a maioria dos combustíveis florestais está acima de 25 a 30%. Scott e Burgan (2005) definem valores entre 12 e 40% a depender do tipo de vegetação.

5.14.1.7. Energia calorífera

A quantidade de calor de um objeto, por vezes chamada de energia interna, constitui o total de energia calorífera. A energia térmica é a energia cinética aleatória total de todos os átomos e moléculas no objeto. À medida que a temperatura do objeto aumenta sua energia calorífera também irá aumentar. O aumento irá variar a depender do objeto em questão (HECKERT, 2008).

A quantidade de energia normalmente é medida em kJ/kg ou em Btu/lb. Quanto maior a quantidade de energia calorífera do material, mais intensas serão as chamas em caso de incêndio (ANDREWS, 2008).

Soares e Batista (2007) relatam que o poder calorífero varia ligeiramente entre as espécies florestais, sendo um pouco mais alto nas coníferas do que nas folhosas (Tabela 5). Ainda, segundo os mesmos autores, o poder calorífero efetivo de uma determinada parte da planta pode ser medido através da subtração da energia liberada pela condensação da água estrutural da madeira nas paredes internas do calorímetro.

Tabela 5 – Poder calorífero de algumas espécies florestais com aproximadamente 12% de umidade (Soares e Batista, 2007).

Espécie	Poder Calorífero (kcal/kg)	
	Madeira	Casca
<i>Acácia decurrens</i>	4550	4568
<i>Mimosa scabrella</i>	4589	4862
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	4667	4267
<i>Eucalyptus viminalis</i>	4691	3495
<i>Pinus elliottii</i>	4786	5947
<i>Pinus taeda</i>	4814	4868

Nota: 1 kcal = 4,19 kJ

Em outro estudo realizado por Ribeiro (1997), o mesmo afirma que em uma área plantada de eucalipto de 10 anos de idade, o valor do poder calorífero irá variar de acordo com as classes do material combustível (Tabela 6).

Tabela 6 - Poder calorífico de diferentes classes de material combustível de eucalipto (Fonte: Ribeiro, 1997).

C-1MF	C-1MV	C-1MD	C-2
4636 kcal/kg	4446 kcal/kg	3978 kcal/kg	4358 kcal/kg

Nota: C-1mf = Classe de material combustível recente; C-1MV = Classe de material verde; C-1MD = Classe de material em decomposição; C-2 = Classe 2.

5.14.1.8. Teor de umidade do material combustível

Constitui a quantidade de água presente no material combustível. Segundo Rego e Botelho (1990), a umidade do material combustível determina a quantidade de calor requerida para a ignição do material vegetal.

Trollope et al. (2002) desenvolveram um gráfico da intensidade do fogo a partir do teor de umidade do material combustível. Segundos os autores, quanto maior a umidade do material combustível, menor a intensidade do fogo, já que irá afetar a facilidade de ignição, o consumo do material combustível e a taxa de combustão (Figura 5).

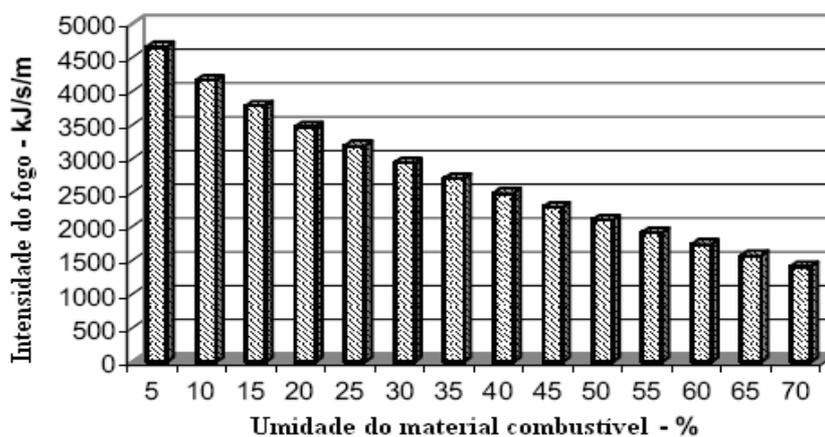


Figura 5 – Relação entre a intensidade do fogo e a umidade do material combustível (Adaptado de Trollope et al., 2002).

As relações entre a velocidade de propagação e a umidade do combustível são usualmente não lineares. No modelo de Rothermel (1972) o efeito do conteúdo de água é dado pelo coeficiente adimensional η_M que reduz proporcionalmente a intensidade de reação em função de um polinômio de terceiro grau da razão M/M_x sendo M a umidade do combustível e M_x a umidade de extinção. A propagação irá cessar quando $M/M_x=1$ (FERNANDES, 2002).

É comum encontrar na literatura distintas metodologias para se estimar o teor de umidade do material combustível florestal. Existe uma metodologia direta, na qual o material combustível é coletado, pesado, levado para estufa, e pesado novamente para se determinar o peso seco e o teor de umidade, entretanto, tal valor vai responder pelo teor de umidade deste material na hora e no dia em que o mesmo foi coletado, não correspondendo ao valor atual já que tais materiais podem alterar seus valores em questão de horas ou dias a depender das condições climáticas (ROTHERMEL, 1972; SOARES e BATISTA, 2007). Existem modelos matemáticos como, por exemplo, o NFDR (*National Fire Danger Rating System*) utilizado pelos E.U.A., no qual se insere valores relacionados às variáveis climáticas, como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, e, com base nestes valores, é possível estimar o teor de umidade dos materiais combustíveis mortos para o momento em que as condições climáticas foram avaliadas. Este tipo de modelo, no qual o teor de umidade do material combustível é estimado com base nas características climáticas, costuma ser o mais utilizado pelos pesquisadores, em função da não necessidade de trabalhos de coleta de campo, sendo necessário apenas uma estação meteorológica.

Além do NFDR, existem diversos outros modelos matemáticos, como, por exemplo, o de McArthur (1962) desenvolvido para estimar o teor de umidade do material combustível morto dentro de florestas de eucalipto na Austrália com base na temperatura e umidade relativa do ar. Cada modelo irá responder por um tipo de vegetação localizada dentro de um determinado padrão climático já que não costumam responder com eficiência em situações que o clima e as características do material combustível são distintos do ambiente para o qual foi desenvolvido. Portanto, antes de se fazer um estudo é necessário definir se os modelos existentes respondem corretamente, ou se será necessário desenvolver um novo modelo para estimar a umidade do material combustível dentro da respectiva área de estudo.

5.14.1.9. Velocidade do vento na altura das chamas

Constitui a velocidade do vento acima do solo medida na altura das chamas. Esta medida está compreendida entre 1,50 e 1,80 m de altura. A velocidade do vento irá afetar a altura das chamas e a velocidade de propagação do fogo, sendo assim um importante fator a ser estudado (ANDREWS, 2008).

Existe um fator de ajuste da velocidade do vento, valor entre 0 e 0,5, usado para ajustar a velocidade do vento quando a mesma é medida a 6m de altura, acima da vegetação ou de qualquer obstáculo, para a velocidade do vento na altura das chamas. O fator de ajuste vai depender da exposição do material combustível ao vento. Se o combustível não está protegido do vento, o fator será mais próximo de 0,5. Se o material está protegido do vento o fator será mais próximo de 0 (Tabela 7). A exposição do material combustível vai ser determinada pelo tipo de cobertura vegetal e pelo grau de inclinação do terreno (Figura 6). Segundo Andrews (2008), é de extrema importância que se conheça corretamente qual o tipo de material combustível e qual o tipo de cobertura da vegetação para estimar corretamente a velocidade do vento e, conseqüentemente, o comportamento do fogo.

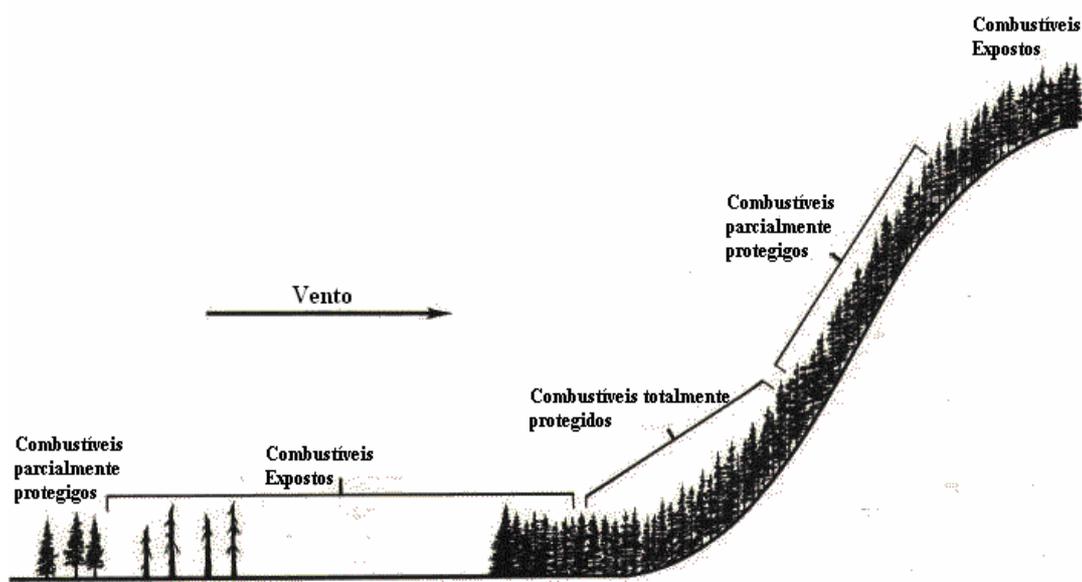


Figura 6 – Classificação dos materiais combustíveis de acordo com a exposição ao vento (Adaptado de Andrews, 2008).

Tabela 7 – Fator de ajuste da velocidade do vento de acordo com as condições de cobertura do material combustível superficial (Andrews, 2008).

Material combustível superficial exposto ao vento	Fator de ajuste	Condições do material combustível superficial:
Bastante protegido, muito denso.	0,1	Árvores com copas densas e galhos que se estendem até o solo em áreas planas ou de pequena inclinação.
Bastante protegido do vento, pouco denso.	0,2	Árvores com as copas não tão densas e sem galhos que se estendem até o solo em áreas planas ou de pequena inclinação.
Parcialmente protegido do vento.	0,3	Árvores de tamanho desigual ou em áreas com árvores densas, mas de grande inclinação recebendo vento em sua base.
Não protegidas do vento	0,31 - 0,5	Árvores que perderam a folhagem, árvores em cumes elevados que oferecem pouca proteção do vento.

O acréscimo da velocidade de avanço da frente do fogo resulta essencialmente do aumento da disponibilidade de oxigênio, da diminuição do ângulo entre a chama e o combustível (que irá intensificar a transferência de energia por radiação e contato direto da chama), e da convecção forçada de ar quente (VIEGAS, 1999).

Rothermel (1972) formula a influência do vento através do fator ϕ_w sendo C , B e E dependentes de σ , e β_{op} o coeficiente de compactação ótimo, que depende também de σ . A velocidade de propagação na ausência de vento corrige-se por multiplicação por $(1 + \phi_w)$.

$$\phi_w = CU^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$$

Onde:

ϕ_w = Coeficiente do vento;

$C = 7,47 \exp(-0,133\sigma^{0,55})$;

$B = 0,02526\sigma^{0,54}$;

$E = 0,715 \exp(-3,59 \times 10^{-4}\sigma)$;

β_{op} = Coeficiente de compactação;

σ = Relação entre área superficial e volume (cm^{-1});

U = Velocidade do vento na altura das chamas (ft/min).

5.14.1.10. Declividade do terreno

Constitui a inclinação do terreno, podendo ser medida em graus ou em percentagem. Este valor não é, necessariamente, a inclinação do terreno no sentido da propagação do fogo.

A ideia de que os efeitos do vento e do declive do terreno são análogos remonta a Fons (1946). Rothermel (1972) assume a atividade das duas influências e exprime o efeito do declive através do fator ϕ_s :

$$\phi_s = 5,275\beta^{-0,3}(\tan \theta)^2$$

ϕ_s = Fator Declividade;

β = Coeficiente de compactação do material combustível

$\tan \theta$ = Tangente do declive.

Um procedimento simples de trigonometria pode ser utilizado para se determinar a inclinação média de um terreno a partir de medidas de um mapa. Deve-se selecionar um ponto na parte inferior da inclinação e outro na parte superior. A distância horizontal dividida pela elevação e multiplicada por 100 dará a inclinação do terreno em percentagem (ANDREWS, 2008) (Figura 7).

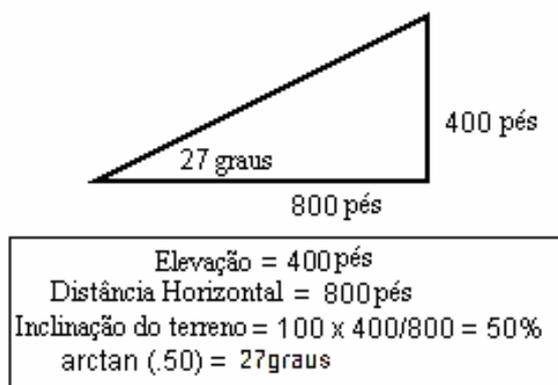


Figura 7 – Declividade do terreno a partir da elevação e da distância horizontal (Adaptado de Andrews, 2008).

5.14.2. Principais modelos matemáticos de caracterização do comportamento do fogo inseridos no *BehavePlus 5.0*

Segundo Andrews (2009) existem 181 distintas características do comportamento do fogo que podem ser obtidas utilizando o programa “*BehavePlus 5.0*”.

A classificação do grau de perigo de incêndio florestal deve, por definição, integrar em índices qualitativos ou quantitativos os fatores que melhor retratem o potencial de ignição, propagação e dificuldade de supressão, ou seja, que melhor expressem o comportamento do fogo (ALEXANDER, 1994). Os componentes individuais dos sistemas de classificação do grau do perigo de incêndio dos E.U.A. e Canadá refletem diretamente a velocidade de propagação, a energia libertada por unidade de área e a intensidade frontal (FERNANDES, 2002).

Uma das principais e mais comum variável do comportamento do fogo estudada é a velocidade de propagação. De acordo com Alexander (2000), a depender da velocidade de propagação de um incêndio florestal, os esforços necessários para conter o fogo em uma determinada área ou em um determinado período de tempo irão variar. O comprimento das chamas pode ser utilizado para estabelecer a largura de um aceiro capaz de impedir a progressão de um incêndio (BYRAM, 1959). A intensidade e a energia liberada por unidade de área de um fogo superficial são variáveis importantes para determinar a

transição para um fogo de copas (VAN WAGNER, 1977a), para prever o efeito do fogo no solo e na sua biota (ZIMMER e PARMENTER, 1998), a altura de copa dessecada, altura de copa queimada, e a mortalidade arbórea e sub-arbórea (FERNANDES, 2002).

5.14.2.1. Modelo da velocidade de propagação da frente do fogo superficial

É a velocidade em que a frente do fogo passa através dos combustíveis superficiais. Segundo Scott (2012), a velocidade de propagação consiste em uma importante característica do fogo por dois motivos. Primeiro, porque define o quanto o fogo pode percorrer durante um determinado intervalo de tempo, e, conseqüentemente, indicar a probabilidade que o fogo tem de chegar a áreas de risco. Segundo, porque a velocidade de propagação influencia na intensidade da linha do fogo e no comprimento das chamas, que são características importantes para se determinar os efeitos do fogo.

A velocidade de propagação do fogo no *BehavePlus* é medida através do modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel (1972), que assume as condições de clima, topografia e combustíveis como constantes e uniformes.

$$R = \frac{I_R * \xi * (1 + \phi_s + \phi_w)}{\rho_b * \varepsilon * Q_{ig}}$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (ft/min);

I_R = Intensidade de Reação (Btu/ft²/min);

ξ = Taxa de Fluxo de propagação sem vento;

ϕ_s = Coeficiente de declividade;

ϕ_w = Coeficiente do vento;

ρ_b = Densidade do material seco (lb/ft³);

ε = Calor de pré-ignição (Btu/lb);

Q_{ig} = Calor necessário para queimar 1 libra de combustível (Btu/lb).

A equação mostra que a taxa na qual o fogo se propaga é uma razão entre o calor recebido pelo combustível potencial na frente do fogo e o calor necessário para fazer este combustível entrar em ignição, assumindo que o fogo se propaga através de uma sequência de ignições do combustível disponível existente no piso da floresta. O tamanho e o arranjo das partículas do combustível condicionam a queima, cujo calor liberado proporciona a ignição do material combustível adjacente, tornando o processo cíclico. Neste modelo, a velocidade de propagação é resultado da relação entre o fluxo de calor da parcela que está queimando e o calor necessário para desencadear a ignição da parcela adjacente. Em resumo, observa-se que o numerador da equação representa a quantidade de calor realmente recebida pelo combustível potencial, enquanto o denominador representa a quantidade de calor necessária para levar este combustível até a temperatura de ignição (SOARES e BATISTA, 2007).

5.14.2.2. Modelo da intensidade da linha do fogo

Consiste na energia calorífica liberada por unidade de tempo de uma seção de 0,3m paralela entre o combustível já queimado e a frente do fogo (Figura 8) (ANDREWS, 2008). Segundo o mesmo autor, a intensidade na linha do fogo está diretamente relacionada com a altura da chamas, que, porventura, está relacionado com o calor sentido por uma pessoa que está próxima do fogo. De acordo com Soares e Batista (2007) consiste em uma das mais importantes variáveis do comportamento do fogo. Scott (2012) afirma que mesmo sendo uma variável impossível de se medir diretamente em campo, a intensidade da linha do fogo, cientificamente falando, é a melhor variável a fim de se determinar as consequências de um incêndio.

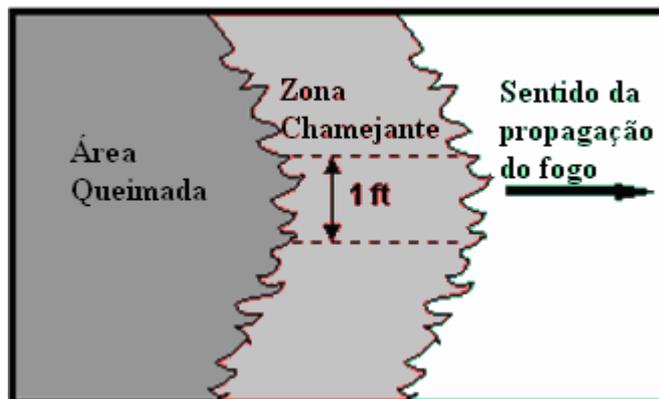


Figura 8 – Delineamento da linha do fogo (Adaptado de Andrews, 2008).

A determinação da intensidade da linha de fogo, no *BehavePlus*, é obtida por meio da equação desenvolvida por Rothermel (1972). Esta equação descreve a taxa de energia liberada por unidade de comprimento da frente do fogo (ALBINI, 1976b).

$$I = I_R * t_r * R$$

Onde:

I = Intensidade da Linha do Fogo (kW/m/s);

I_R = Intensidade de reação (kW/m²);

t_r = Tempo de residência da chama (s);

R = Velocidade de propagação (m/s).

A intensidade de reação (I_R), por sua vez, é determinada através da seguinte equação (ALBINI, 1976b):

$$I_R = n_m * n_S * r' * H * W$$

Onde:

I_R = Intensidade de reação (kW/m²);

n_m = Fator que reflete o teor de umidade do material combustível, diminuindo a velocidade da combustão;

n_s = Fator que reflete o efeito dos minerais no material combustível reduzindo a velocidade da pirólise;

r' = Taxa de combustão máxima do complexo combustível (min^{-1})

H = Poder calorífero do material combustível (kJ/kg);

W = Carga do material combustível (kg/m^2).

A intensidade da frente do fogo proporciona, apesar das suas limitações, a mais útil descrição de um fogo. Pode ser utilizada para definir os efeitos de uma queima controlada com objetivo de redução do material combustível; para estabelecer os limites de uma queima prescrita; para definir os impactos do fogo no ecossistema; e como indicador para auxiliar as atividades de supressão ao fogo (CHENEY, 1981).

5.14.2.3. Modelo da energia calorífera liberada por unidade de área

Segundo Andrews (2008), é a energia calorífera liberada por área (metro quadrado) dentro da chama frontal. Segundo o mesmo autor, a quantidade de energia liberada não é afetada pelo vento, relevo, nem pelo sentido de propagação do fogo.

A energia calorífera por área é definida pelo modelo de propagação do fogo superficial Rothermel (1972) e tem como unidade padrão kJ/m^2 ou Btu/ft^2 . Energia adicional é liberada em fases posteriores à passagem da frente do fogo (*burnout phase of combustion*) e que não é calculado através do modelo em questão, portanto, são necessários cuidados especiais ao descrever o comportamento do fogo utilizando-se desta variável (SCOTT, 2012).

O modelo de Rothermel (1972) não estima a energia calorífera liberada por unidade de área diretamente, ela é medida com base na intensidade da linha do fogo. Ainda assim, de acordo com Scott (2012), o modelo em questão é a melhor opção disponível até o momento.

A equação para sua obtenção pode ser determinada pela simples divisão do valor da intensidade da linha do fogo, pela velocidade de propagação:

$$HA = \frac{I}{R}$$

Onde:

HA = Energia calorífica por unidade de área (kJ/m^2);

I = Intensidade da linha do fogo (kW/m/s);

R = Velocidade de propagação do fogo (m/s).

5.14.2.4. Modelo do Comprimento das Chamas

Segundo Andrews (2008) o comprimento da chama da frente de um fogo superficial é medido do meio da zona chamejante ativa até o ponto máximo médio das chamas (Figura 9).

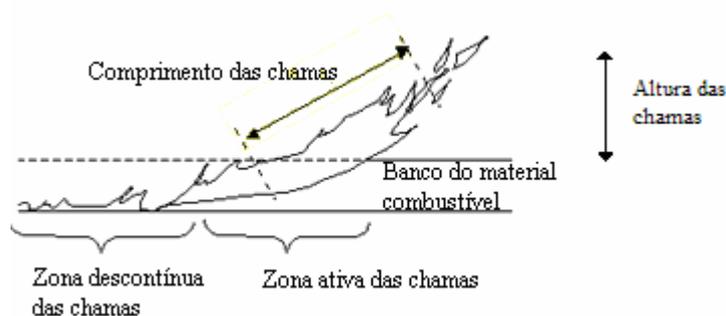


Figura 9 – Comprimento das chamas de um incêndio (Adaptado de Andrews, 2008).

A intensidade da linha do fogo e o comprimento das chamas estão relacionados com o calor sentido por uma pessoa em sua proximidade. O comprimento das chamas é calculado através da intensidade da linha do fogo, que, por sua vez, é calculada em função da taxa de propagação e da energia de combustão (ANDREWS, 2008). A estimativa do comprimento das chamas pode ser obtida durante a ocorrência do incêndio, porém por

tratar-se a chama de um fenômeno pulsante, ocasional e extremamente transitório, existe dificuldade em determinar com precisão seu valor (SOARES e BATISTA, 2007).

Byram (1959) demonstrou que o comprimento das chamas pode ser obtido através da intensidade da linha do fogo através da seguinte expressão:

$$F_L = 0.45I_B^{0.46}$$

Onde:

F_L = Comprimento das chamas (m);

I_B = Intensidade da Linha do Fogo de Byram (kcal/m/s).

Ainda que as dificuldades inerentes à sua definição e mensuração impliquem uma valia reduzida do ponto de vista estritamente científico, o comprimento da chama é uma característica tão visível e correlacionada com a energia calorífica liberada que merece ser considerado um descritor primário do fogo (ROTHERMEL, 1991).

5.15. Demais modelos matemáticos alternativos não utilizados pelo *BehavePlus 5.0* para descrever o comportamento do fogo

Além dos modelos matemáticos descritos acima, que estão inseridos na grande maioria dos simuladores de comportamento do fogo, inclusive no *BehavePlus*, existem diversos outros trabalhos que desenvolveram equações para descrever as mais diversas características do fogo em diferentes partes do mundo. Abaixo serão descritos os principais modelos encontrados na literatura que descrevem as características do fogo avaliadas neste trabalho (velocidade de propagação, comprimento das chamas, intensidade da linha do fogo, energia por unidade de área, consumo do material combustível e tempo de residência).

5.15.1. Modelos para a velocidade de propagação do fogo

A velocidade de propagação do fogo é uma das variáveis mais estudadas quando se fala em modelagem do comportamento do fogo. Além do famoso modelo de Rothermel (1972), existem diversos outros específicos para os mais variados tipos de vegetação e de clima. Para povoamentos de eucalipto, por exemplo, os principais modelos desenvolvidos foram o de Gould (1994), baseando-se nas tabelas de McArthur (1962) e, mais recentemente, o de Gould et al. (2007), ambos para a Austrália; para as florestas de *Pinus* pode-se citar o trabalho de Fernandes (2009) em Portugal; o trabalho de Bidwell e Engle (1991) para vegetações de campo nos Estados Unidos; e, o trabalho de Fernandes (2001) para vegetações arbustivas em Portugal.

$$R = 0,22 * W * \exp(0,158U_{1,5} - 0,227Mf) \quad (\text{Gould, 1994})$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (m/min);

W = Peso do material combustível (t/ha);

$U_{1,5}$ = Velocidade do vento a 1,5m de altura (km/h);

Mf = Umidade do material combustível fino (%).

$$R = 30 + 3.102(U_{10} - U_t) * \exp(0,279Sfhs + 0,611NSfhs + 0,013Fd) \quad (\text{Gould et al. 2007})$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (m/h);

U_{10} = Velocidade do vento a 10 metros de altura (km/h);

U_t = Velocidade do vento limiar 5 (km/h);

$Sfhs$ = Índice de perigo do material combustível superficial;

$NSfhs$ = Índice de perigo do do material acima do superficial;

Fd = Altura o leito do material combustível (cm).

$$R = aU^b \exp(cM + d\Phi) \quad (\text{Fernandes, 2009})$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (m/min);

a, b, c, d = Constantes;

U = Velocidade do vento a aproximadamente 1,5m de altura (km/h);

M = Umidade do material combustível (%);

Φ = Inclinação do relevo (°).

$$R = 0,07 * 0,05M - 0,004Rh \quad (\text{Bidwell e Engle, 1991})$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (m/min);

M = Umidade do material combustível (%);

Rh = Umidade relativa do ar (%).

$$R = 7,255 * \exp(0,092 \times U) * \exp(-0,067Mms1) * h^{0,932} \quad (\text{Fernandes, 2001})$$

Onde:

R = Velocidade de propagação (m/min);

U = Velocidade do vento a 2m de altura (km/h);

$Mms1$ = Umidade do material combustível fino da classe MS1 (%);

h = Altura da vegetação (m).

5.15.2. Modelos para o comprimento das chamas

Dentre os principais modelos para a determinação do comprimento das chamas pode-se citar, além do modelo de Byram (1959) que é o mais utilizado em todo o mundo, o

modelo de Thomas (1963) que também costuma ser amplamente utilizado e possui eficiência comprovada (ALBINI, 1976b). Além destes dois modelos existem outros desenvolvidos para específicos tipos de vegetação, como, por exemplo, o modelo de Fernandes (2009), desenvolvido através de queimas experimentais em florestas de *Pinus pinaster* (Aiton) em Portugal, e o modelo de Gould et al. (2007), desenvolvido a partir de queimas experimentais em florestas secas de eucalipto na Austrália. O modelo de Dupuy et al. (2011), desenvolvido a partir de queimas laboratoriais também merece ser citado.

$$Fl = 0,20 * I^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Thomas, 1963})$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

I = Intensidade da linha do fogo (kcal/m/s).

$$Fl = aR^b * \exp(cM + dMf) \quad (\text{Fernandes, 2009})$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

a, b, c, d = Constantes;

R = Velocidade de propagação do fogo (m/min);

M = Umidade do material combustível (%);

Mf = Teor de umidade da camada F da liteira (*F-layer*) (%).

$$Fl = 0,0193 * R^{0,723} * \exp(0,64 * Ef_h) \quad (\text{Gould et al., 2007})$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

R = Velocidade de propagação do fogo (m/h);

Ef_h = Altura do material combustível elevado (*elevated fuel height*).

$$Fl = 0,059 * I_B^{0,53} \quad (\text{Dupuy et al., 2011})$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

I_B = Intensidade da linha do fogo de Byram (kcal/m/s).

5.15.3. Modelos para a intensidade da linha do fogo

Apesar de não ser utilizada pelo *BehavePlus* nem pelos outros simuladores Norte Americanos do comportamento do fogo, o modelo da intensidade da linha do fogo desenvolvido por Byram (1959) costuma ser amplamente utilizado em diversas publicações científicas (CRUZ e ALEXANDER, 2010; SCOTT, 2012). Além deste modelo, existem outras equações desenvolvidas para distintas vegetações e distintos locais do globo, como o de Batista et al. (1993), por exemplo, desenvolvido com base na altura de carbonização da casca das árvores no estado do Paraná, Brasil; o modelo de De Ronde et al. (1990), desenvolvido para plantações industriais de pinheiros em países tropicais e subtropicais, e o modelo de Bidwell e Engle (1991) para vegetações de campos nos Estados Unidos.

$$I_B = H * W * R \quad (\text{Byram, 1959})$$

Onde:

I_B = Intensidade da linha do fogo de Byram (Btu/s/ft);

H = Poder calorífero do material combustível (Btu/lb);

W = Quantidade de material combustível disponível (lb/ft²);

R = Velocidade de propagação do fogo (ft/s).

$$I = -33,7 + 1,71 * Hcb \quad (\text{Batista et al., 1993})$$

Onde:

I = Intensidade da linha do fogo (kw/m);

Hcb = Altura de carbonização da casca (cm).

$$I = -187,49 + (23,93 * Sh) \quad (\text{De Ronde et al., 1990})$$

Onde:

I = Intensidade da linha do fogo (kw/m);

Sh = Altura de carbonização da casca (cm).

$$I = -2274 + 0,39Wlf + 24M \quad (\text{Bidwell e Engle, 1991})$$

Onde:

I = Intensidade da linha do fogo (kw/m);

Wlf = Peso do material combustível recém caído (kg/ha);

M = umidade do material combustível morto (%).

5.15.4. Modelos para o consumo do material combustível

Apesar do consumo do material combustível ser uma variável importantíssima do comportamento do fogo, principalmente para atividades de redução do material combustível com o objetivo de reduzir o risco de ocorrência de incêndios florestais de grande porte (FERNANDES e LOUREIRO, 2013), ela não é uma variável muito bem estudada. Existem pouquíssimos estudos e a mesma não está inserida em *softwares* de modelagem de comportamento do fogo como o *BehavePlus*, portanto, não sendo possível a sua simulação.

Brown et al. (1985) cita que prever o consumo do material combustível é uma tarefa essencial para a realização de queimadas prescritas. De acordo com o mesmo autor, é necessário estabelecer um balanço para que o material combustível seja consumido e ao mesmo tempo o fogo não seja tão intenso que provoque danos ao ambiente.

Dentre os principais modelos para estimar esta característica do fogo podemos citar o de Fernandes e Loureiro (2013) desenvolvido para povoamentos de *Pinus* em Portugal; modelo de Botelho et al. (1994) também para povoamentos de *Pinus* em Portugal; e o modelo de Harrington (1987) para povoamentos de *Pinus* no Arizona, E.U.A..

$$FcSURF = \frac{1}{(1 + EXP(-(4,046 - 0,077 * Mms1)))} \quad (\text{Fernandes e Loureiro, 2013})$$

Onde:

$FcSURF$ = Consumo do material combustível superficial (%);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%).

$$Fcl = -0,041 + 0,654Wms1 - 0,066BT - 0,66U + 0,009T \quad (\text{Botelho et al. 1994})$$

Onde:

Fcl = Consumo da liteira (%);

$Wms1$ = Carga do material combustível fino da classe MS1 pré-fogo (kg/m^2);

BT = Técnica de queima (queima contra o vento = -1; queima em faixas = 0; queima a favor do vento = 1);

U = Velocidade do vento (m/s);

T = Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$Fc = 37,37 - 0,75M + 21,19Fdb \quad (\text{Harrington, 1987})$$

Onde:

Fc = Consumo do material combustível (%);

M = Teor de umidade do material combustível (%);

Fdb = Espessura da liteira do chão da floresta pré-fogo em polegadas (*inches*).

5.15.5. Modelo para o tempo de residência

O tempo de residência compreende o tempo em que a frente do fogo permanece em um determinado ponto (SOARES e BATISTA, 2007). De acordo com os mesmos autores constitui uma importante variável de caracterização do comportamento do fogo, principalmente em função de que os danos causados à vegetação dependem não apenas da temperatura do fogo, mas também do tempo de exposição da vegetação a essa temperatura.

Um exemplo que demonstra a influência do tempo de residência na temperatura do solo foi realizado por Beadle (1940). O mesmo verificou a transferência de calor através de dois tipos de queimada controlada: uma de rápida duração, cerca de 45 minutos, e uma fogueira alimentada por arbustos e árvores durante 8 horas seguidas. Os resultados mostraram que enquanto o fogo superficial elevou a temperatura do solo a 50°C, a 2,5cm de profundidade, o fogo intenso, que pode ser comparado a um severo incêndio florestal, registrou temperaturas próximas a 220°C a 7,5cm de profundidade. Portanto, intensidade do fogo e o tempo de residência irão interferir na temperatura do solo e, conseqüentemente, no seu efeito na fauna do solo.

Rothermel e Deeming (1980) desenvolveram um modelo matemático para se estimar o tempo de residência baseando-se da profundidade das chamas e na velocidade de propagação do fogo.

$$Tr = \frac{D}{R} \quad (\text{Rothermel e Deeming, 1980})$$

Onde:

Tr = Tempo de residência (s);

D = Profundidade das chamas (m);

R = Velocidade de propagação (m/s).

5.15.6. Modelo para a energia por unidade de área (HA)

O cálculo da energia calorífica liberada por unidade de área pode ser mensurado através do modelo de Rothermel (1972), já comentado anteriormente, ou através do modelo de Byram (1959). Como a HA não irá depender da velocidade do vento nem da inclinação do relevo, ela não irá sofrer influência da velocidade de propagação. Seu valor é baseado na quantidade de material combustível disponível e na energia do mesmo.

$$HA = W * H \quad \text{ou} \quad HA = \frac{I_B}{R} \quad (\text{Byram, 1959})$$

Onde:

HA = Energia calorífica por unidade de área (kJ/m^2);

I_B = Intensidade da linha do fogo de Byram (kW/m/s);

H = Material combustível consumido pelo fogo (kg/m^2);

W = Energia calorífica do material combustível (kJ/kg);

R = Velocidade de propagação do fogo (m/s).

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

CAPÍTULO IV

ASPECTOS METODOLÓGICOS

CAPÍTULO IV - ASPECTOS METODOLÓGICOS

6. METODOLOGIA

6.1. Caracterização dos povoamentos de eucalipto

6.1.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no Litoral Norte da Bahia entre as Latitudes de 11°15'S e 12°30'S e Longitudes de 37°30'W e 38°45'W, com Altitudes de 0 a 300 m. Compreende as dependências da empresa COPENER Florestal Ltda. com um total aproximado de 100.000 hectares de área plantada com *Eucalyptus* spp., sendo a maioria delas resultantes do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* (Hill ex. Maiden) x *Eucalyptus urophylla* (S. T. Blake) (WHITE et al., 2013d) (Figura 10).

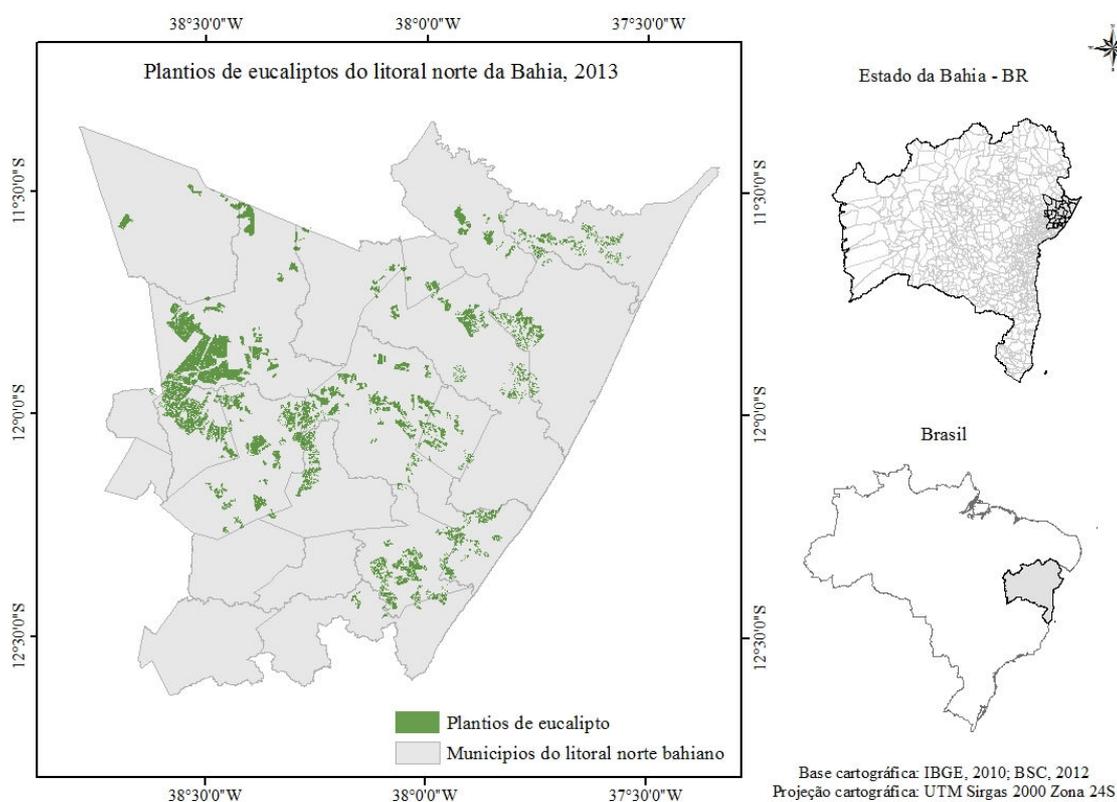


Figura 10 - Área de estudo correspondente às áreas de plantio sob atuação da COPENER Florestal Ltda (Fonte: O autor).

O clima no geral é classificado como tropical úmido com temperatura média anual em torno dos 25°C. Os solos da região são formados a partir de material de origem sedimentar do Terciário-Quaternário, predominando arenitos com intercalações de folhelhos e conglomerados. O relevo é ondulado a forte ondulado próximo ao litoral, tornando-se suave-ondulado e plano (tabuleiros) no sentido do interior (WHITE, 2013).

Ocorre variação da precipitação pluviométrica entre as regiões, sendo que a variabilidade interanual é acentuada, constatada mediante os balanços hídricos anuais dos postos meteorológicos Quatis (Município de Entre Rios) e Salgado (Município de Inhambupe) (Tabela 8).

Tabela 8 - Valor médio e desvio padrão de temperatura (TEMP), precipitação (PPT), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF) e excedente hídrico (EXC), dos balanços hídricos anuais, de 1985 a 1994, para os postos meteorológicos de Quatis e Salgado, para uma capacidade de água disponível de 200 mm (WHITE, 2013).

Posto Meteor.	TEMP. (° C)	PPT (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Quatis	25.7 ± 0.6	1335 ± 465	1461 ± 76	1092 ± 200	369 ± 233	242 ± 327
Salgado	25.2 ± 0.7	950 ± 319	1396 ± 85	913 ± 244	482 ± 247	39 ± 101

Nota: (±) Desvio Padrão

É importante relatar que, na área de estudo, não existe um sub-bosque ativo em função de que todos os povoamentos de eucalipto passam pelo procedimento de limpeza de sub-bosque antes do início do período seco, anualmente. Tal procedimento tem como objetivo reduzir a distribuição vertical do material combustível, e, desta forma, diminuir o risco de incêndios de grande porte que atinjam a copa das árvores, além de facilitar o acesso ao interior dos povoamentos por pessoas e máquinas (Figura 11).



Figura 11 - Plantação de eucalipto na área de estudo onde percebe-se a ausência de vegetação de sub-bosque (Fonte: O autor).

6.1.2. Caracterização do material combustível

6.1.2.1. Coleta do Material Combustível

Foram demarcadas 40 parcelas aleatórias de 1x1m dentro de cinco distintos povoamentos de eucalipto plantados em meados de 2006 (aproximadamente 6 anos de idade durante as atividades de coleta) com espaçamento de 3x3 metros, espaçamento este normalmente utilizado nos plantios de eucalipto no Brasil com espécies de alta taxa de crescimento, normalmente clones (HIGA et al., 2000). A idade foi estabelecida em função de que o processo de colheita nos eucaliptais da área de estudo costumam ocorrer em povoamentos com cerca de 6 anos, e pelo fato de que quanto maior a idade do povoamento, maior o acúmulo de material combustível e, conseqüentemente, maior o perigo de ocorrência de incêndios de grande porte (SOUZA et al., 2003). As coletas foram realizadas durante a estação seca (Novembro/2011 - Março/2012). O número de parcelas foi definido com base na metodologia da amostragem sequencial, com um limite de erro de 10% a um nível de probabilidade de 95% (TOZZINI e SOARES, 1987):

$$n = \frac{t^2 \times s^2}{E^2}$$

Onde:

n = Número de amostras por estrato;

s^2 = Variância estimada;

t = Valor tabelado;

E = Limite de erro.

A coleta do material foi realizada através da amostragem destrutiva. Com o auxílio de um gabarito de madeira de 1,0m x 1,0m toda biomassa até 1,80m de altura (limite do material combustível superficial) foi coletada, separada de acordo com as classes, e pesada. A metodologia de coleta foi adotada com base nas pesquisas de Brown et al. (1981), Soares e Batista (2007), White et al. (2013b). Já a classificação de acordo com as classes de diâmetro buscou atender o preenchimento das variáveis de entrada do “*BehavePlus 5.0*” baseadas no modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel (1972):

Material Combustível Vivo:

- Material herbáceo (MVHerb): Plantas que possuem a consistência e porte de erva. Ex: gramíneas e samambaias.
- Material verde lenhoso (MVL): Incluem a folhagem e os pequenos ramos dos arbustos vivos. São materiais cujo diâmetro é menor ou igual a 0,7 cm.

Material Combustível Morto (seco):

- MS₁: Material seco com diâmetro menor ou igual a 0,7 cm.
- MS₂: Material seco com diâmetro entre 0,71 e 2,5 cm.
- MS₃: Material seco com diâmetro entre 2,51 e 7,6 cm.

Todo o material combustível morto foi classificado nas classes de diâmetro com auxílio de um calibrador (Figura 12). Os combustíveis mortos maiores que 7,6cm e verdes lenhosos maiores que 0,7cm de diâmetro não foram coletados pois não contribuem com a propagação do fogo superficial segundo o modelo de Rothermel (1972) adotado pelo *BehavePlus*.

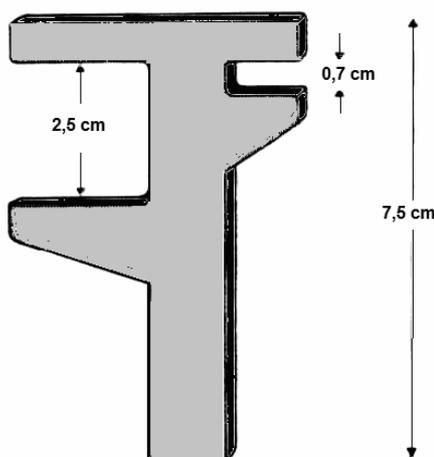


Figura 12 - Representação gráfica do calibrador utilizado para classificação do material combustível de acordo com as classes de diâmetro (Fonte: O autor).

6.1.2.2. Determinando o Peso Seco

Após a operação de coleta, classificação e pesagem, foram retiradas sub-amostras representativas de cada classe (uma sub-amostra de aproximadamente 100g de cada classe de material combustível dentro de cada parcela) que, depois de pesadas, foram acondicionadas em sacos de papel e levadas ao laboratório para secagem e posterior determinação do teor de umidade e peso da matéria seca ao forno. A secagem foi feita em estufa, a uma temperatura de 100°C, durante 24 horas, conforme recomendado por Matthews (2010).

O teor de umidade do material combustível foi determinado através da seguinte fórmula:

$$M = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100\%$$

Onde:

M = Teor de umidade (%);

W_w = Peso úmido;

W_d = Peso seco.

6.1.2.3. Espessura do leito

Para a sua determinação foram selecionados 135 pontos no interior de cinco povoamentos de seis anos de idade. A metodologia utilizada foi a do transecto linha, onde, com o auxílio de uma fita métrica de 30m posicionada dentro do povoamento em linha reta de forma aleatória, 27 pontos distando 1 m entre si foram definidos e tiveram o valor da espessura da manta medidos com auxílio de uma régua. A metodologia em questão foi baseada no trabalho de Reiner et al. (2009).

6.2. Construção dos modelos matemáticos para a caracterização do comportamento do fogo

6.2.1. Experimentação laboratorial

Levando-se em consideração que o comportamento do fogo é um fenômeno altamente variável, sendo raramente regular, foi decidido que os modelos matemáticos teriam maior precisão caso os mesmos fossem desenvolvidos a partir de queimas experimentais laboratoriais, onde fosse possível controlar ao máximo a influência de cada variável e, conseqüentemente, definir a intensidade de sua influência.

De acordo com Beutling (2009), as principais vantagens da realização de experimentos com fogo em laboratório são: determinação das variáveis climáticas, que em

ambientes fechados são denominadas de variáveis ambientais (facilmente monitoradas e não sujeitas a variações bruscas), determinação da inclinação topográfica (previamente estabelecida e conhecida), na geração de dados do comportamento do fogo com base em condições conhecidas de carga, densidade, arranjo, teor de umidade e tipo de material combustível, além da facilidade de medição das variáveis de interesse.

O laboratório foi montado em residência particular na cidade de Aracaju, Sergipe. A mesa de combustão foi construída com as dimensões de 1,5m de comprimento por 1,5m de largura (Figura 13). Pinos laterais com espaçamentos pré-determinados foram inseridos para servir de referência para o monitoramento do comportamento do fogo em função do tempo, e marcações verticais foram realizadas nas paredes para servirem de auxílio na medição do comprimento das chamas.



Figura 13 - Mesa de combustão do material combustível (Fonte: O autor).

A mesa foi instalada em uma área retangular nas dimensões de 6 metros de comprimento por 2,25 metros de largura a céu aberto e paredes com altura de 4 metros. O fluxo de vento era controlado através da abertura de um portão também com 4 metros de altura (Figuras 14 e 15).

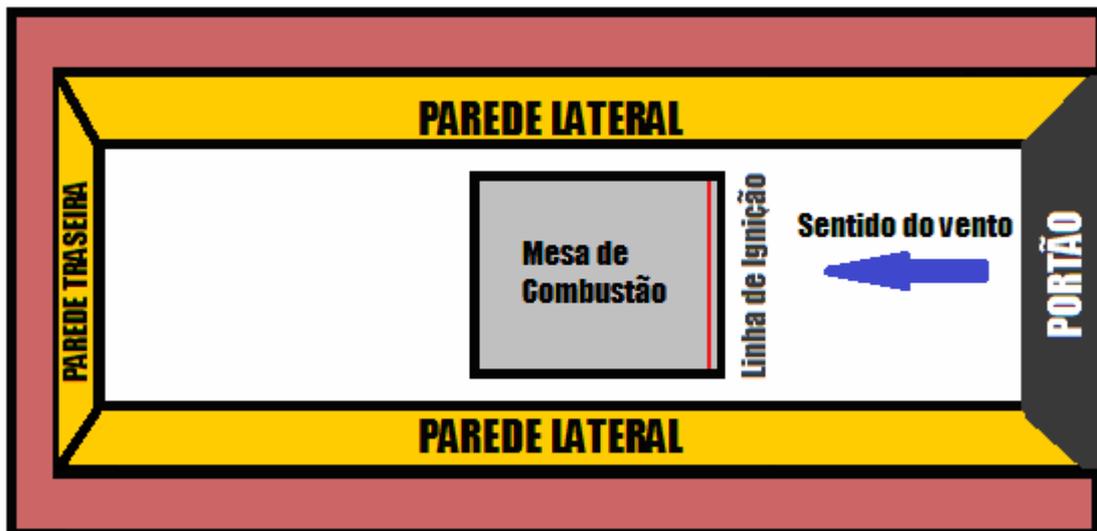


Figura 14 - Croqui representando a vista aérea do laboratório montado na cidade de Aracaju/SE onde foram realizadas as queimas experimentais (Fonte: O Autor).



Figura 15 - Mesa de combustão do material combustível com destaque para o portão com o qual o vento era controlado. Quando fechado o fluxo de vento era mínimo, quando aberto velocidades maiores eram registradas (Fonte: O autor).

Todo o material combustível era espalhado sobre a mesa de combustão da forma mais homogênea possível na tentativa de que o material combustível apresentasse o mesmo

arranjo ao longo da mesa. Cada queima foi realizada com distintos valores das variáveis independentes testadas. Os experimentos foram realizados nas mais distintas horas do dia (manhã, tarde, noite e madrugada), buscando abordar uma maior variedade de condições meteorológicas.

Equipamentos de segurança como máscara com filtro de ar, óculos de proteção, luva, extintor, foram todos adquiridos e utilizados, quando necessário durante as experimentações laboratoriais (Figura 16).



Figura 16 - Equipamentos de segurança utilizados durante as queimas laboratoriais (Fonte: O autor).

Conforme mencionado anteriormente, a mesa foi construída com pinos laterais para se determinar a velocidade de propagação e servir como ponto de medição. O primeiro intervalo da mesa foi de 12,5cm, chamado de "linha de ignição" que serve para realizar a ignição da frente de fogo. Para acender esta linha foi utilizado um pinga fogo com querosene em seu interior (Figura 17), iniciando o fogo, o mais uniforme possível, nos primeiros 2,5cm da linha do material combustível. Tal procedimento foi baseado em experimentos de Beutling (2009).



Figura 17 - Pinga fogo utilizado para realizar a ignição do material combustível durante a realização das queimas laboratoriais (Fonte: O autor).

Quando o fogo atingia o início da linha de ignição, o cronômetro era iniciado. No segundo, terceiro, quarto, quinto e sexto intervalo era determinado o tempo no qual o fogo chegou a cada linha, o comprimento médio das chamas e a velocidade do vento nesse instante. Portanto, a velocidade de propagação, o comprimento das chamas e a velocidade do vento para cada queima laboratorial foi resultante da média de 05 medições realizadas a cada 25cm percorrido pelo fogo. O último intervalo, também chamado de "linha final", compreendia o espaço final da mesa de 12,5cm para o fim do fogo, completando assim os 1,5m de comprimento (Figura 18).

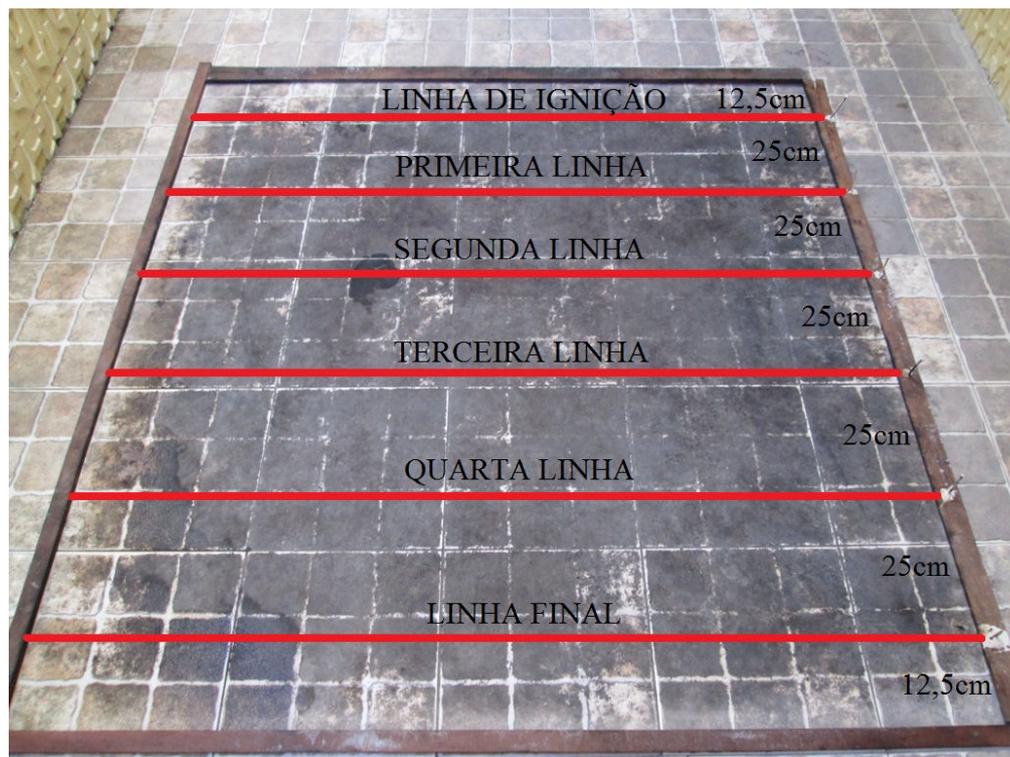


Figura 18 - Mesa de combustão com destaque para a linha de ignição e as linhas consecuintes (realçadas digitalmente), nas quais eram realizadas as medições do tempo, velocidade do vento e comprimento das chamas (Fonte: O autor).

6.2.2. Coleta do material combustível

O material combustível para a realização das queimas experimentais foi coletado nas dependências do Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, no município de São Cristóvão, SE e nas dependências da empresa COPENER Florestal Ltda., no município de Inhambupe, BA. Em ambas as localidades a espécie de eucalipto plantada é a mesma (híbridos resultantes do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), sendo assim, são idênticas as características físicas e químicas do material combustível. O material coletado foi acondicionado em sacos de náilon e em seguida transportado para o laboratório.

Em alguns casos específicos em que o material coletado em campo encontrava-se demasiadamente molhado, foi necessário deixar o material secar ao vento antes de queimar.

6.2.3. Caracterização das variáveis independentes do modelo

As variáveis independentes mensuradas para a construção dos modelos de regressão foram definidas com base em uma ampla bibliografia no qual são definidas as principais variáveis que exercem influência no comportamento do fogo. Dentre os diversos trabalhos consultados, pode-se citar os mais importantes: Byram (1959); Brown e Davis (1973); Rothermel (1972); Fernandes (2002); Gould et al. (2007); Soares e Batista (2007); Beutling (2009); Fernandes (2009); e Fernandes e Loureiro (2013).

Portanto, com base na bibliografia citada, as seguintes variáveis independentes foram controladas e mensuradas:

- Carga seca do material combustível da classe MS1;
- Carga seca do material combustível da classe MS2;
- Carga seca total (MS1 + MS2);
- Espessura do leito do material combustível;
- Densidade do leito do material combustível;
- Umidade do material combustível da classe MS1;
- Umidade do material combustível da classe MS2;
- Temperatura do ar;
- Umidade relativa do ar;
- Velocidade do vento

Para se determinar a carga seca e o teor de umidade das classes MS1 e MS2, e, por conseguinte, a carga total seca (representados pela soma de ambas as classes) para cada experimento, foi utilizada a mesma metodologia para caracterizar o material combustível dos povoamentos de eucalipto da área de estudo. Todo o material combustível a ser queimado era previamente separado de acordo com as classes e pesado. Uma sub-amostra para cada classe era acondicionada em sacos de papel, pesada e levada ao laboratório para secagem (feita em estufa a uma temperatura de 100°C durante 24 horas) e posterior

determinação do teor de umidade e peso da matéria seca ao forno. O material combustível restante era espalhado da forma mais homogênea possível na mesa de combustão e posto para queimar. Os valores da carga da classe MS1, MS2 e total procuraram descrever o mais próximo possível as situações verificadas em campo através do trabalho de caracterização.

A espessura do leito do material combustível para cada queima foi definida com base em cinco medidas aleatórias. Com auxílio de uma régua graduada, pontos aleatórios da mesa de combustão já preenchida com material combustível eram selecionados e tinham sua espessura medida. Portanto, o valor da espessura do leito para cada experimento foi definido com base na média das cinco medidas aleatórias. Definido o valor da carga total seca (MS1 + MS2) e da espessura média do leito, foi calculada a densidade do leito do material combustível para cada queima.

A temperatura e umidade relativa do ar foram definidas imediatamente antes do início da queima. Ambas as variáveis foram obtidas através de uma estação meteorológica (*Professional Weatherwise Wireless Weather Station Model: SW-1090-SOLAR*) instalada no laboratório (Figura 19).



Figura 19 - Estação meteorológica (*Professional Weatherwise Wireless Weather Station Model: SW-1090-SOLAR*) utilizada para definir os valores da temperatura e umidade relativa do ar pré-queima (Fonte: O autor).

A velocidade do vento foi medida com o auxílio de um anemômetro de mão (*LUTRON Eletronic Enterprise Model: LM-8000*) posicionado logo à frente da mesa de combustão, a uma altura média de 1,8 metros (Figura 20). Esta altura corresponde à altura da velocidade do vento ao nível do olho (*eye-level wind speed*) (ANDREWS, 2008), parâmetro de entrada para a modelagem do comportamento do fogo de acordo com o modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel (1972), além de ser a altura no qual os anemômetros normalmente são instalados nas estações meteorológicas.



Figura 20 - Anemômetro (*LUTRON Eletronic Enterprise Model: LM-8000*) utilizado para medir a velocidade do vento na frente do fogo durante as queimas laboratoriais (Fonte: O autor).

O desenho experimental das queimas laboratoriais buscou o máximo de variações possíveis das variáveis independentes a fim de ampliar as situações de aplicação dos modelos gerados.

6.2.4. Caracterização do comportamento do fogo

As seguintes variáveis do comportamento do fogo foram analisadas durante as queimas laboratoriais experimentais: velocidade de propagação do fogo, comprimento das chamas, consumo do material combustível, tempo de queima, intensidade da linha do fogo e energia calorífica liberada por unidade de área. As variáveis em questão foram selecionadas em função da possibilidade prática de medi-las e das mesmas serem importantes descritores do comportamento do fogo.

A velocidade de propagação do fogo foi medida com auxílio dos marcadores posicionados na mesa de combustão. Quando o fogo atingia a linha de ignição o cronômetro era acionado e o tempo registrado até o momento em que o fogo atingia a linha final.

O comprimento das chamas também era determinado assim que o fogo atingia as linhas subsequentes à linha de ignição. O valor da variável em questão para cada queima experimental foi resultante da média das cinco medições.

O consumo do material combustível foi definido simplesmente dividindo a quantidade de material combustível não queimada ou parcialmente queimada ao final de cada experimento pelo valor da carga inicial pré-queima.

O tempo de queima foi definido com auxílio de um cronômetro, correspondendo ao tempo total, desde o momento de ignição, até o momento em que se apagava a última chama dentro da mesa de combustão.

Diferentemente das outras variáveis, a intensidade da linha do fogo e a energia liberada por unidade de área, para cada queima, foram estimadas com base nos modelos matemáticos de Byram (1959).

6.2.5. Modelagem matemática

Os modelos matemáticos para descrever a velocidade de propagação do fogo, o comprimento das chamas, o consumo do material combustível e o tempo de queima foram construídos com base na regressão linear múltipla utilizando-se o procedimento *forward*

stepwise. A idéia básica deste procedimento é adicionar variáveis independentes, uma de cada vez, até que a inclusão de mais variáveis não melhore o modelo ou não corresponda aos critérios de inclusão. Como critério de inclusão, o nível de significância utilizado foi de 95%.

As variáveis independentes avaliadas foram: carga do material combustível da classe MS1, carga do material combustível da classe MS2, carga total de material combustível (MS1 + MS2), espessura do leito do material combustível, densidade do leito do material combustível, umidade do material combustível morto da classe MS1, umidade do material combustível morto da classe MS2, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os modelos estatísticos foram desenvolvidos com auxílio do *software JMP statistical package* (versão 7.0; SAS Institute, Cary, NC).

6.3. Realização das simulações utilizando o *BehavePlus*

Ao final de cada queima experimental em laboratório, os dados de entrada foram inseridos no programa computacional *BehavePlus Fire Modeling System* versão 5.0.5 a fim de comparar os dados obtidos experimentalmente com os dados simulados (Figura 21).

Fuel/Vegetation, Surface/Understory		Initialize from a Fuel Model	
Fuel Model Type		→	D
1-h Fuel Load	tonne/ha	→	7.57
10-h Fuel Load	tonne/ha	→	2.57
100-h Fuel Load	tonne/ha	→	0
Live Herbaceous Fuel Load	tonne/ha	→	0
Live Woody Fuel Load	tonne/ha	→	0
1-h SA/V	m ² /m ³	→	4200
Live Herbaceous SA/V	m ² /m ³	→	
Live Woody SA/V	m ² /m ³	→	
Fuel Bed Depth	m	→	0.028
Dead Fuel Moisture of Extinction	%	→	30
Dead Fuel Heat Content	kJ/kg	→	21000
Live Fuel Heat Content	kJ/kg	→	
Fuel Moisture			
1-h Moisture	%	→	10.53
10-h Moisture	%	→	12
100-h Moisture	%	→	
Live Herbaceous Moisture	%	→	
Live Woody Moisture	%	→	
Weather			
Midflame Wind Speed (upslope)	km/h	→	4.86
Terrain			
Slope Steepness	%	→	0

Figura 21 - Exemplo de simulação do comportamento do fogo no *BehavePlus* utilizando os dados de entrada da queima laboratorial número 2 (Fonte: *Print screen do BehavePlus 5.0.5 no sistema operacional Windows 7*).

Valores estáticos necessários para a realização das simulações referente às variáveis: área superficial pelo volume, unidade de extinção e poder calorífero do material combustível (campos em amarelo na Figura 21) foram obtidos através da literatura (SOARES e BATISTA, 2007; FERNANDES et al., 2011; SCOTT e BURGAN, 2005) (Tabela 9) em função da impossibilidade técnica de se obter dados específicos das respectivas variáveis para a área de estudo.

Tabela 9. Valores encontrados na literatura referentes à área superficial pelo volume, umidade de extinção e poder calorífero do material combustível para povoamentos de eucalipto utilizados para as simulações do comportamento do fogo no *BehavePlus*.

Parâmetro	Valor	Referência
Área superficial pelo volume do material morto de 1h (m^2/m^3)	4200	Fernandes et al. (2011)
Umidade de extinção do material combustível morto (%)	30	Scott e Burgan (2005); Soares e Batista (2007)
Energia calorífera do material combustível morto (kJ/kg)	21000	Fernandes et al. (2011)

Apesar de existirem outros trabalhos específicos para espécies de eucalipto no qual são definidos distintos valores para a área superficial pelo volume do material morto de 1h (eg. BROWN, 1970; RODERICK et al., 2000), o valor utilizado para a realização das simulações foi de $4200 m^2/m^3$ em função do trabalho de Fernandes et al. (2011) ter sido realizado em espécie (*Eucalyptus globulus*) com características similares à utilizada neste trabalho e em função da importância e validade científica do respectivo trabalho.

A umidade de extinção do material combustível morto foi definida com base nos trabalhos de Scott e Burgan (2005) e Soares e Batista (2007); e com base nos dados preliminares deste estudo que apontaram ausência de propagação do fogo em materiais combustíveis mortos com teor de umidade superior a 30%.

Assim como para a variável área superficial pelo volume, existem outras publicações que descrevem distintos valores para a energia calorífera do material combustível em espécies de eucalipto (eg. RIBEIRO, 1997; SCOTT e BURGAN, 2005; SOARES e BATISTA, 2007). O valor utilizado para a realização das simulações foi o de 21000 kJ/kg, descrito por Fernandes et al. (2011), em função das mesmas razões já descritas anteriormente.

É importante salientar que, apesar da existência de estudos que apontam diferentes valores para a área superficial pelo volume e para a energia calorífera do material combustível em espécies de eucalipto, a diferença não é tão ampla para interferir significativamente no comportamento do fogo. Simulações prévias, utilizando distintos valores descritos para diferentes espécies de eucalipto, não apresentaram significativa variação nos valores das simulações do comportamento do fogo.

6.4. Análise estatística

Todas as variáveis de caracterização dos povoamentos de eucalipto e todas as variáveis dependentes e independentes utilizadas para a construção dos modelos matemáticos tiveram sua distribuição, valores máximos, médios e mínimos, além de seus respectivos desvio padrão, avaliados.

O teste da análise de variância (ANOVA) foi realizado para verificar se existe diferença significativa entre a carga e a espessura do manto dentro de distintos povoamentos de eucalipto. O nível de significância utilizado foi de 95%, sendo assim, os grupos de dados comparados foram considerados diferentes significativamente quando $p < 0,05$.

O coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrado médio, derivado do inglês *root mean square error* (RMSE) e a probabilidade de significância (p), foram os realizados a fim de se determinar a eficiência dos modelos matemáticos criados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo criado consegue explicar os valores observados, ou seja, quanto maior o R^2 , mais eficiente é o modelo. A raiz do erro quadrado médio calcula a diferença entre os valores reais, obtidos experimentalmente, e os valores ideais previstos pelo modelo criado, sendo assim, quanto maior o RMSE, menos eficiente é o modelo. Embora o RMSE seja uma boa medida de precisão, o seu valor deve ser comparado apenas entre modelos de uma variável em particular, já que o seu valor irá depender da escala. A probabilidade de significância indica se o modelo criado é significativo ou não estatisticamente. Valores de p maiores que 0,05 foram considerados como não sendo significativos, já os modelos que apresentaram valores inferiores foram considerados significativos. Neste caso, quanto mais próximo de 0, mais significativo o modelo.

A comparação entre os valores da velocidade de propagação e do comprimento das chamas obtidos nas queimas laboratoriais e simulados pelo *BehavePlus 5.0* também foi realizada utilizando-se o teste ANOVA ao nível de significância de 5%.

Para desenvolver os modelos de ajuste dos dados simulados pelo *BehavePlus* para os valores obtidos experimentalmente, foi utilizada a regressão linear simples. Em alguns momentos o teste de correlação linear de Pearson (r) foi utilizado para verificar a

correlação entre duas variáveis. Assim como o R^2 , os valores do teste "r" variam entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a correlação entre as variáveis.

Todas as análises estatísticas supracitadas foram realizadas no programa *JMP statistical package* (versão 7.0; SAS Institute, Cary, NC).

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO
FOGO EM LITEIRA DE EUCALIPTO**

CAPÍTULO V

ANÁLISE, INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

CAPÍTULO V - ANÁLISE, INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Caracterização dos povoamentos de eucalipto da área de estudo

7.1.1. Determinação da carga do material combustível

Foram coletados ao todo 44,107 kg de material combustível seco nas 40 parcelas de 1m², o que correspondeu a uma média de 11,31 t/ha. Através do teste ANOVA, verificou-se que não existiu diferença significativa entre a carga total de material combustível dos cinco povoamentos ($F = 0,1$; $p = 0,75$).

Dentre as classes, a MS1 contribuiu com a maior parte do material combustível seguido pela classe MS2. As classes MHerb, MS3 e MVL juntas contribuíram com apenas 4,77% do aporte total do material combustível disponível. Seus respectivos valores médios, desvio padrão, máximo, mínimo e percentual estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 10 - Carga média, mínima e máxima dos aportes do material combustível presente nos povoamentos de eucalipto no litoral norte da Bahia.

Classe	Carga média (t/ha)	Mínimo (t/ha)	Máximo (t/ha)	Percentual
MS1	8,03 (\pm 5,19)	2,93	21,46	71%
MS2	2,74 (\pm 1,56)	0,00	6,51	24,23%
MS3	0,17 (\pm 0,62)	0,00	3,48	1,5%
MHerb	0,29 (\pm 0,66)	0,00	4,11	2,56%
MVL	0,08 (\pm 0,30)	0,00	1,65	0,71%
TOTAL	11,31 (\pm 6,49)	4,61	25,62	100%

Nota: \pm corresponde ao desvio padrão.

Souza et al. (2003) determinaram a carga total média de material combustível superficial e a proporção entre as distintas classes em povoamentos de *Eucalyptus dunnii*, em Três Barras (SC). De acordo com os autores, em povoamentos de 4,5 anos de idade, a carga total média foi de 10,77 t/ha, enquanto que em povoamentos de 6,5 anos o valor médio foi de 17,22 t/ha. Ainda, de acordo com os mesmos autores, a classe MS1 respondeu por 72% e 71% do aporte total do material combustível nas idades de 4,5 e 6,5 anos, respectivamente. A classe MS2 13% e 20%; a classe MS3 1% e 0%, e as classes MHerb e MVL juntas responderam 14% e 9%, respectivamente. Ribeiro e Soares (1998) também determinaram a carga média de material combustível e a sua proporção entre as classes em povoamentos de 10 anos de *Eucalyptus viminalis* no município de Três Barras, Santa Catarina. De acordo com os autores, os povoamentos apresentaram aproximadamente entre 24,25 e 29,96 t/ha, sendo que 85,5% do material foi classificado como MS1; 9,5% na classe de material verde de diâmetro inferior a 0,6cm (MVL + MHerb); 4,7% na classe MS2 e 0,3% na classe MS3. Stangerlin et al. (2007) afirmam que a quantidade de material combustível presente dentro de um povoamento de *Eucalyptus grandis* de 12 anos de idade na cidade de Santa Maria, RS, é de 24,59 t/ha, sendo 81% do material classificado como MS1, 18% MS2 e 1% raízes sementes e material verde.

Os estudos acima citados indicam que em todos os casos a classe de material combustível MS1 é a predominante. A variação na carga das classes MHerb e MVL dependem, principalmente, do tipo de manejo da área. Como na área de estudo são realizados, anualmente, procedimentos de limpeza de sub-bosque, há de se esperar que a quantidade de material destas classes não seja significativa, diferente de áreas não tratadas em que ambas as classes respondem significativamente pelo aporte total do material combustível.

Percebe-se também que existe uma tendência da quantidade de material combustível aumentar de acordo com o aumento da idade do povoamento. De acordo com Souza et al. (2003), os contínuos incrementos da carga total de combustível demonstram que o acúmulo de material combustível superficial, inclusive em idades mais avançadas (10 anos), ainda se sobrepõe à sua decomposição, potencializando os riscos de incêndios de maior porte em povoamentos mais antigos. Em florestas esclerófilas de eucalipto na Austrália com cobertura de copa de 50% ou mais, o acúmulo de material combustível é crescente até os 10 primeiros anos de idade, atingindo equilíbrio com uma carga média de

15 t/ha (BROOKES et al., 2004). Já áreas com um sub-bosque bem desenvolvido, a carga de material combustível pode continuar aumentando por mais de 25 anos (TOLHURST e CHENEY, 1999). Fernandes et al. (2011) afirmam que em povoamentos de *Eucalyptus globulus*, em Portugal, os povoamentos atingem o patamar de 95% da carga máxima de material combustível após os 8 primeiros anos.

O procedimento de colheita na área de estudo, que costuma ocorrer em povoamentos com 6 anos de idade, impede o contínuo acúmulo de material combustível, sendo os dados de carga de material combustível descritos neste trabalho próximo aos valores máximos para as plantações de eucalipto da empresa COPENER Florestal Ltda.

7.1.2. Espessura do leito

Com base em 135 medições, o valor médio da espessura do leito foi de 5,67 cm. Através da Análise de Variância, constatou-se que não existiu diferença significativa na espessura do manto entre os cinco distintos povoamentos ($F = 2,08$, $p = 0,15$).

Ribeiro e Soares (1998), analisando a espessura do manto encontraram valores médios entre 11,48 e 36,05cm para distintos povoamentos de 10 anos de *Eucalyptus viminalis* no município de Três Barras, Santa Catarina. Já Gilroy e Tran (2006), encontraram valores médios de 1,7 cm para povoamentos de *Eucalyptus racemosa* no sudeste do estado de Queensland, Austrália.

Com base nos valores da carga de material combustível e da espessura do leito, foi possível determinar a densidade do material combustível (*Fuel Bed Bulk Density*) (Tabela 11).

Tabela 11. Espessura do leito, carga e densidade do material combustível médio, mínimo e máximo para povoamentos de eucalipto do litoral norte da Bahia.

	Valor Médio	Mínimo	Máximo
Espessura do leito (cm)	5,67 ($\pm 3,67$)	1,00	19,00
Carga do material combustível (t/ha)	11,31 ($\pm 6,49$)	4,61	25,62
Densidade do material combustível (kg/m^3)	19,95	-	-

Fernandes et al. (2011) determinaram a densidade do material combustível em povoamentos de *Eucalyptus globulus*, em Portugal, como sendo de 23,6 kg/m³. Ainda de acordo com os mesmos autores, em áreas pós-desbaste a densidade subiu para 34,4 kg/m³. Um menor valor médio para a densidade do material combustível encontrado neste estudo sugere que ele seja pouco compacto, contribuindo assim para que o fogo se propague com maior facilidade, já que, de acordo com o modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel (1972), quanto menor a densidade, mais rápida a velocidade de propagação do fogo.

7.2. Queimas experimentais

Ao total foram queimados 333 kg (peso seco) de liteira de eucalipto das classes de material combustível MS1 e MS2 em 105 queimas laboratoriais que buscaram compreender as mais diversas situações possíveis de carga, arranjo e umidade do material combustível.

7.2.1. Análise das variáveis de entrada

7.2.1.1. Carga MS1

O material combustível morto de diâmetro inferior a 0,7 cm esteve presente em todas as queimas realizadas. A classe apresentou um valor médio de 8,21 ($\pm 2,99$) t/ha por queima, com valor máximo de 19,37 t/ha e valor mínimo de 1,94 t/ha (Figura 22).

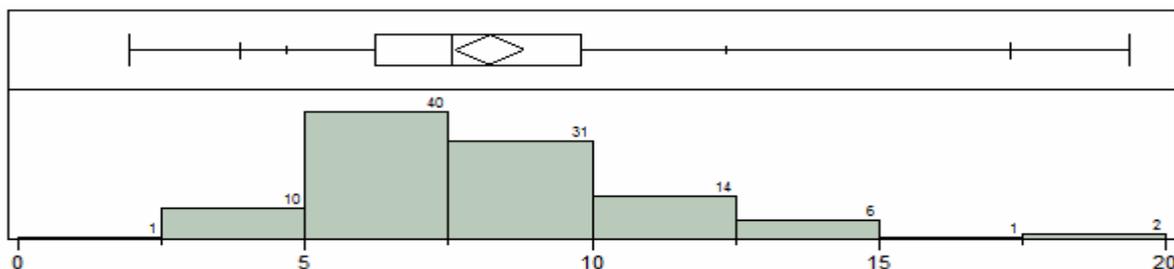


Figura 22 - Distribuição e *quantile box plot* da carga do material combustível da classe MS1 (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.

A classe de material combustível fino e morto (MS1) é essencial para que ocorra a ignição e propagação do fogo. A quantidade de material mínima varia de acordo com o tipo de vegetação e as condições de queima. Soares e Batista (2007), por exemplo, citam que, com base em pesquisas bibliográficas, o valor mínimo de material combustível da classe MS1 para que o fogo possa se propagar é de 1,2 t/ha. Já de acordo com Gould et al. (2007) a carga de material combustível fino necessária para que o fogo consiga se propagar dentro de florestas de eucalipto deve ser superior a 4 t/ha. Hély et al. (2003) definiram valores entre 2 a 2,5 t/ha para áreas de campos gramíneos.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram os valores descritos por Gould et al. (2007). A queima de número 97, única queima que teve carga de material combustível fino inferior a 2 t/ha apagou-se antes de chegar na metade da mesa de combustão, apresentando um consumo do material combustível de 17%. A queima de número 64 apresentou a segunda menor carga de MS1 (3,46 t/ha), e, embora tenha se propagado até o final da mesa de combustão, se propagou de forma irregular, apresentando um consumo do material de apenas 44%. Os experimentos 26 e 28 que tiveram carga da classe MS1 respectivamente de 4,13 e 4,14 t/ha se propagaram normalmente e apresentaram um alto consumo de material combustível 80 e 94% respectivamente.

Embora o objetivo deste estudo não tenha sido definir o valor mínimo da carga de material combustível da classe MS1 necessário para que o fogo possa se propagar em liteira de eucalipto, observa-se que nas queimas com carga da classe MS1 inferior a 4 t/ha o fogo se propagou de forma irregular com baixo consumo do material combustível. Uma maior quantidade de experimentos é necessária para confirmar os dados obtidos neste estudo.

7.2.1.2. Carga MS2

A classe de material combustível morto com diâmetro entre 0,71 e 2,5cm esteve presente em 95 das 105 queimas experimentais. O seu valor médio foi de 2,76 ($\pm 3,84$) t/ha, com valor máximo de 22,72 t/ha e valor mínimo de 0 t/ha (Figura 23).

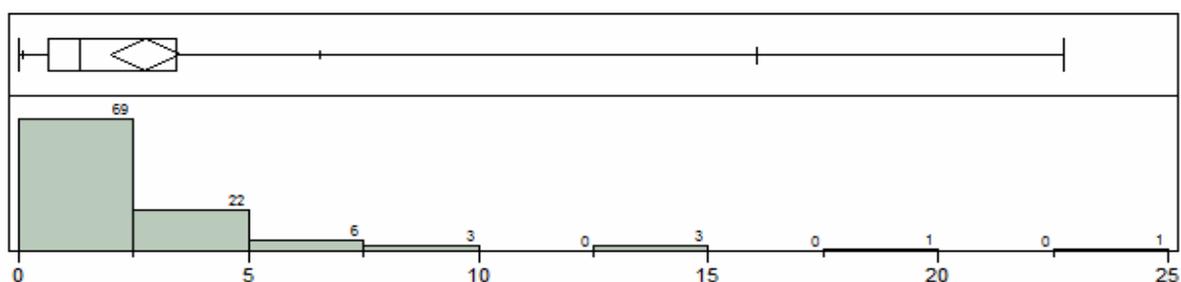


Figura 23 - Distribuição e *quantile box plot* da carga do material combustível da classe MS2 (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.

Em razão de que experimentos sem presença de material combustível da classe MS2 tiveram o fogo propagado normalmente, conclui-se que o mesmo não é um fator determinante para a propagação ou não de fogo, entretanto, como a classe faz parte do material combustível disponível, há de se esperar que a sua carga irá interferir nas diversas características do comportamento do fogo, como velocidade de propagação, intensidade da linha do fogo, energia por unidade de área, comprimento das chamas, consumo e tempo de queima (BYRAM, 1959; ROTHERMEL, 1972).

A realização de queimas experimentais sem presença de material combustível da classe MS2 foi feita com o objetivo de retratar a realidade, já que, durante a caracterização dos povoamentos, algumas parcelas não apresentaram a respectiva classe de material combustível. Já queimas com alta quantidade de material da classe MS2 foram realizadas para retratar situações pós-desbaste ou pós-colheita onde é comum o acúmulo de material combustível desta classe.

7.2.1.3. Carga Total (MS1 + MS2)

A carga total de material combustível constitui-se da soma dos combustíveis da classe MS1 e MS2. Esta variável apresentou valor médio de 10,97 ($\pm 5,16$) t/ha, com valores máximo e mínimo de 33,4 t/ha e 4,5 t/ha, respectivamente (Figura 24).

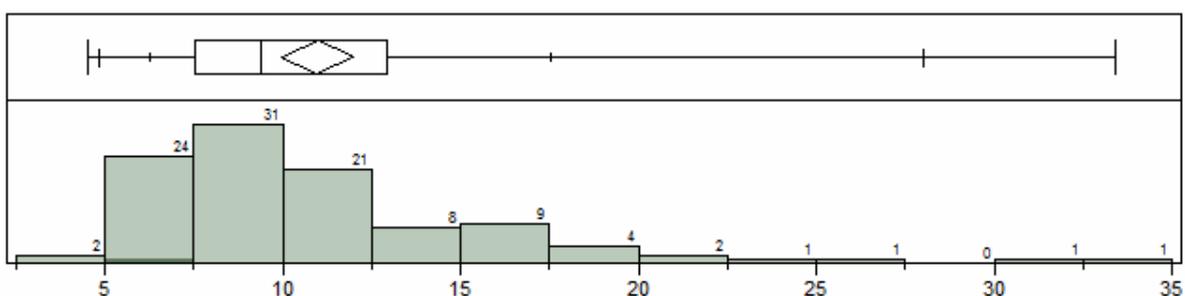


Figura 24 - Distribuição e *quantile box plot* da carga do material combustível total (t/ha) nas 105 queimas experimentais realizadas.

As respectivas cargas das classes MS1 e MS2 e, conseqüentemente, a carga total, durante os experimentos laboratoriais, buscaram descrever, principalmente, situações normalmente encontradas em campo definidas através da caracterização da área de estudo, por isso os valores médios das respectivas variáveis em laboratório foram bem próximo aos valores encontrados em campo. Além disso, conforme mencionado anteriormente, alguns experimentos simularam situações adversas como pós colheita ou pós desbaste. O desenho experimental foi conduzido desta forma a fim de que os modelos construídos com base nos dados destas variáveis fossem aplicáveis a um maior leque de situações possíveis.

7.2.1.4. Espessura do leito do material combustível

A espessura do leito do material combustível durante as 105 queimas experimentais variou de 0,008 m a 0,118 m, apresentando valor médio de 0,037 ($\pm 0,021$) m (Figura 25).

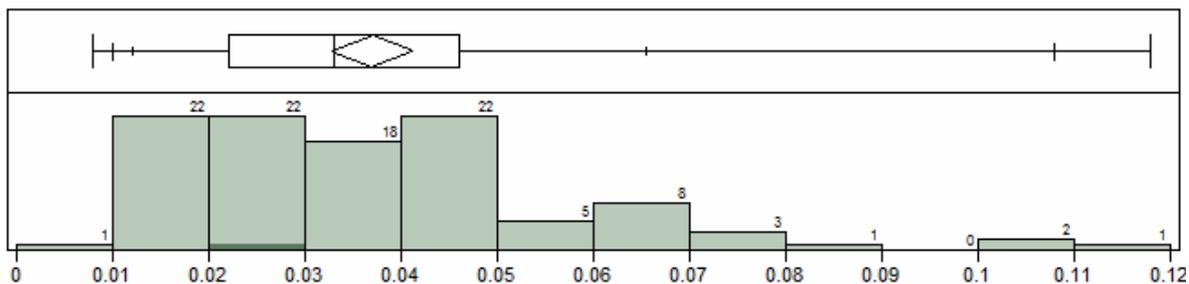


Figura 25 - Distribuição e *quantile box plot* da espessura do leito do material combustível (m) nas 105 queimas experimentais realizadas.

Já era de se esperar que a espessura do leito fosse um pouco inferior em condições de laboratório do que no campo, a explicação para tal fato se dá em função de que para transportar até o laboratório o material era acondicionado em sacos de náilon o que inevitavelmente acabava por compactar o material combustível.

Embora no estudo de caracterização das plantações de eucalipto a espessura do leito máxima medida tenha sido de 19 cm, a média e o desvio padrão 5,67 ($\pm 3,67$) das medições de campo estão dentro do espectro das condições experimentais em laboratório. Ocorreram medições pontuais em laboratório que a espessura foi superior a 11,8 cm, entretanto para cada experimento foi utilizado apenas o valor médio, definido através de cinco medições aleatórias na mesa de combustão.

7.2.1.5. Densidade do leito

A densidade do leito, ou *bulk density*, variou de 13,8 a 96,45 kg/m³, apresentando valor médio de 35,58 ($\pm 17,9$) kg/m³ (Figura 26). As queimas que apresentaram os maiores valores de densidade foram aquelas na qual a maior parte do material combustível presente eram galhos da classe MS2. Os experimentos que apresentaram os menores valores da respectiva variável foram realizados apenas com material da classe MS1, composto, principalmente, por folhas inteiras sem compactação.

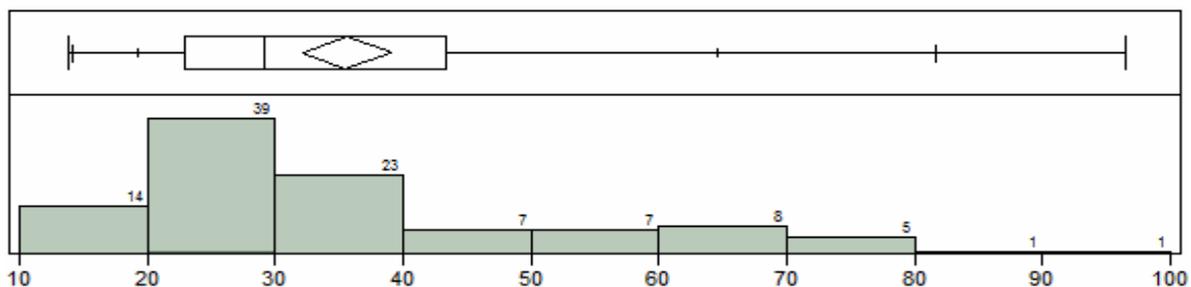


Figura 26 - Distribuição e *quantile box plot* da densidade do material combustível (kg/m^3) nas 105 queimas experimentais realizadas.

Já que a média da espessura do leito do material combustível nos experimentos laboratoriais foi inferior à média definida em campo, a densidade média acabou sendo superior em condições de laboratório. Entretanto, os valores médios não são tão importantes quanto aos valores máximos e mínimos que são os limiares para a utilização dos modelos matemáticos que utilizam desta variável.

7.2.1.6. Umidade do material combustível da classe MS1

Para as 105 queimas em laboratório, o material combustível da classe MS1 apresentou teor de umidade médio de 17,78 ($\pm 7,12$) %, com valor máximo de 38,5% e valor mínimo de 7,7% (Figura 27).

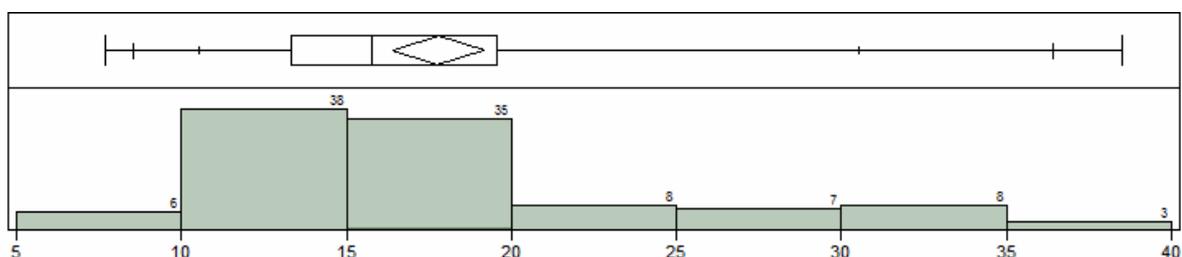


Figura 27 - Distribuição e *quantile box plot* do teor de umidade do material combustível da classe MS1 (%) nas 105 queimas experimentais realizadas.

Em todos os experimentos com o material da classe MS1 apresentando teor de umidade acima de 30% (n = 11) o fogo apagou-se antes de chegar ao final da mesa de combustão (Tabela 12). Mesmo não sendo o objetivo deste estudo, os dados obtidos apontam, de forma preliminar, que a umidade de extinção para a liteira de eucalipto esteja em torno de 30%. Tal valor corrobora os resultados descritos por Scott e Burgan (2005), que afirmam que a umidade de extinção varia entre 25 e 35% para o material combustível composto principalmente por liteira das mais diversas espécies florestais. Brown e Davis (1973) afirmam que a probabilidade de ignição de materiais combustíveis com teor de umidade entre 25 e 30% é próxima de 0, aumentando à medida que a umidade diminui e atingindo valor máximo para materiais com umidade abaixo de 5%.

Tabela 12 - Relação das 17 queimas laboratoriais que apresentaram o maior teor de umidade do material combustível da classe MS1.

Nº do experimento	Umidade do Material Combustível MS1 (%)	Fogo se propagou até o final da mesa de combustão?	Respectivo consumo do material combustível (%)
48	25,33	Sim	46
21	27,59	Não	2
22	27,59	Não	16
64	27,91	Não	2
59	27,92	Sim	70
42	29,86	Sim	58
70	29,92	Não	2
39	30,52	Não	6
45	30,59	Não	10
53	30,64	Não	22
56	31,23	Não	0
63	32,33	Não	1
57	32,94	Não	2
38	33,5	Não	4
46	34,47	Não	9
43	36,31	Não	4
41	36,59	Não	5
37	38,5	Não	0

É necessário levar em consideração que o teor de umidade do material combustível da classe MS1 não é o único fator determinante para estabelecer a umidade de extinção. O arranjo, a densidade do leito, a velocidade do vento e a carga do material combustível também irão influenciar no teor de umidade de extinção do material combustível. O que pode explicar o porquê das queimas de número 21, 22 e 64 não terem o fogo se propagado até o final da mesa de combustão, enquanto que nas queimas 59 e 42, que apresentaram o combustível com maior teor de umidade, o fogo se propagou até o fim e tiveram um maior consumo de material combustível.

7.2.1.7. Umidade do Material Combustível da classe MS2

O teor de umidade do material combustível da classe MS2 apresentou valor médio de 16,64 ($\pm 4,69$) %, com valores máximo e mínimo de 41,52% e 8,4%, respectivamente (Figura 28). Como a classe MS2 não esteve presente em todas as queimas experimentais, os respectivos valores foram definidos com base em 95 amostragens.

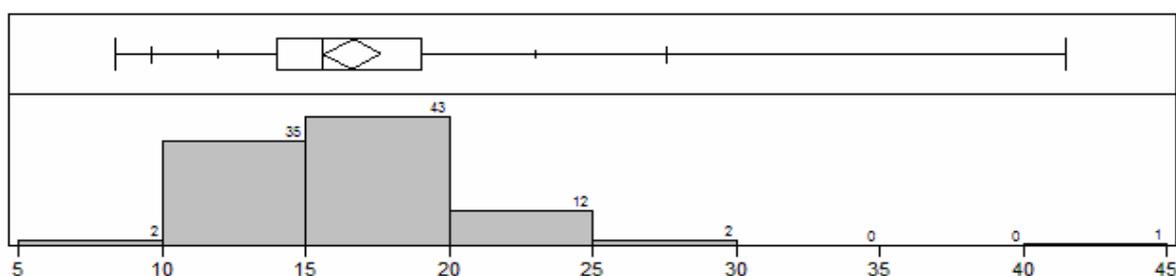


Figura 28 - Distribuição e *quantile box plot* do teor de umidade do material combustível da classe MS2 (%) nas 95 queimas experimentais que apresentaram material combustível da respectiva classe.

Embora o processo de perda ou ganho de umidade seja distinto nos materiais combustíveis da classe MS1 e MS2, já que os materiais da classe MS1 possuem 1h de *timelag* enquanto que a classe MS2 10h de *timelag*, os valores de ambos foram próximos e apresentaram uma correlação positiva significativa ($r = 0,66$; $p < 0,001$) (Figura 29). Portanto há de se esperar que o efeito de ambas as variáveis no comportamento do fogo seja similar.

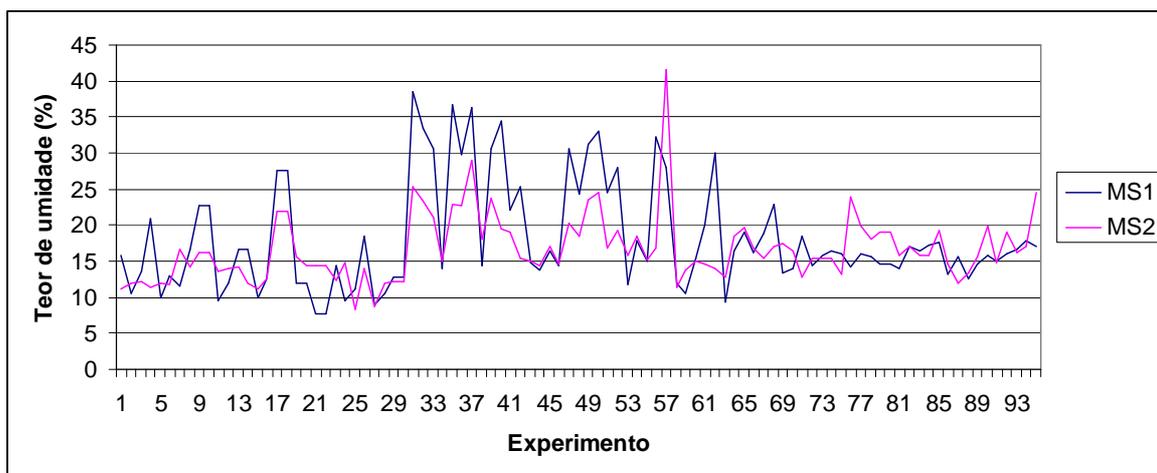


Figura 29 - Correlação entre o teor de umidade da classe MS1 e MS2 para as 95 queimas laboratoriais nas quais ambas as classes estavam presentes.

7.2.1.8. Temperatura do ar pré-queima

A temperatura do ar para cada queima laboratorial foi estabelecida com base em uma única medição realizada imediatamente antes de se iniciar o processo de ignição. Com base na análise dos dados dos 105 experimentos, a temperatura do ar variou entre 24,2 °C e 31,7 °C, apresentando um valor médio de 27,61 ($\pm 1,5$) °C (Figura 30).

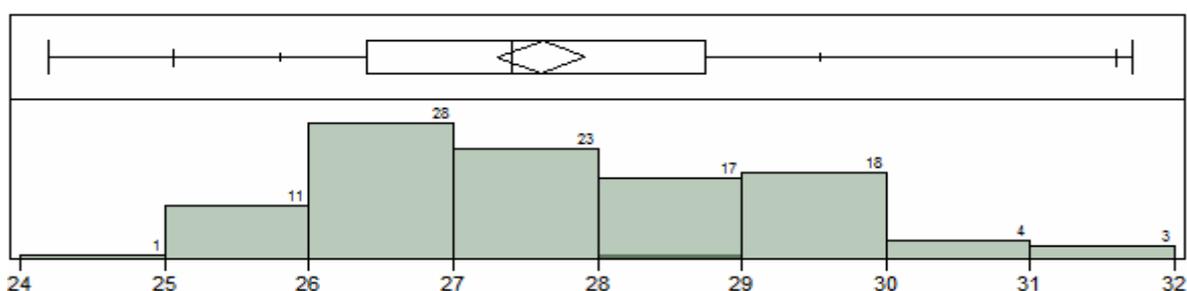


Figura 30 - Distribuição e *quantile box plot* da temperatura do ar pré-queima (°C) para as 105 queimas experimentais realizadas.

Os valores para a temperatura do ar nos quais os experimentos foram realizados são próximos e estão dentro do escopo das temperaturas do ar para os municípios do litoral

Norte da Bahia onde se encontram os povoamentos de eucalipto da empresa COPENER Florestal Ltda. (WHITE et al., 2013d).

7.2.1.9. Umidade relativa do ar pré-queima

Assim como a temperatura do ar, a umidade relativa do ar para cada experimento foi definida com base em uma única leitura realizada imediatamente antes de se iniciar o processo de ignição. A mesma apresentou valor médio de 74,45 ($\pm 5,3$) % com máximo de 93% e mínimo de 59,8% (Figura 31). Conforme White et al. (2013d), estes valores são próximos e estão dentro do escopo dos valores para o Litoral Norte da Bahia.

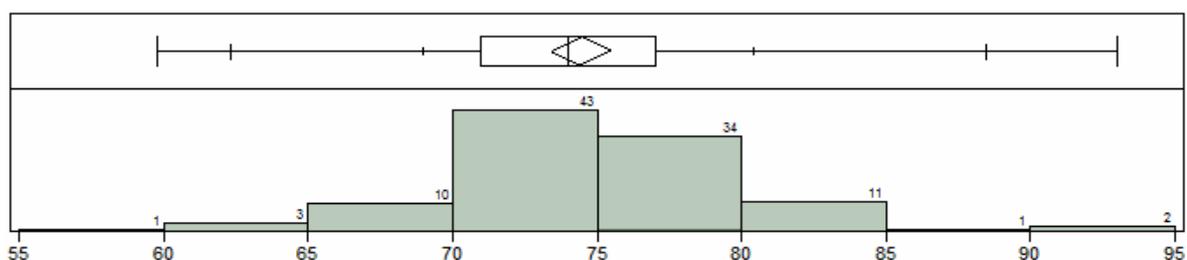


Figura 31 - Distribuição e *quantile box plot* da umidade relativa do ar pré-queima (%) para as 105 queimas experimentais realizadas.

Ambas as variáveis, temperatura do ar e umidade relativa do ar, vão interferir indiretamente no comportamento do fogo devido ao seu efeito no teor de umidade dos materiais combustíveis (SCHROEDER e BULK, 1970; BROWN e DAVIS, 1973).

Em função da importância e elevada influência que o teor de umidade do material combustível irá exercer no comportamento do fogo, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos ao redor do mundo com o objetivo de se estimar o seu valor, já que a medição direta em campo é trabalhosa e demorada. A maioria dos estudos apontam a umidade relativa do ar como sendo o principal fator que irá influenciar na umidade do material combustível (eg. PÊCH, 1967; SIMARD e MAIN, 1982; BATISTA, 1984). Batista (1984), por exemplo, procurando estimar o teor de umidade das acículas em povoamentos de *Pinus taeda* no Paraná, obteve a mais alta correlação para a variável em

questão com a umidade relativa do ar ($r = 0,93$; $p < 0,001$). De acordo com o mesmo autor, a influência da temperatura também foi significativa, porém, em menor intensidade ($r = -0,46$; $p < 0,05$). Sendo assim, uma análise da umidade relativa do ar (um dos parâmetros mais simples e fáceis de ser medido) pode ser utilizada a fim de se estimar o perigo de ocorrência de incêndios para uma determinada região.

7.2.1.10. Velocidade do vento

A velocidade do vento foi medida em 101 dos 105 experimentos. Quatro dos experimentos não tiveram a velocidade do vento medida em função do fogo ter se apagado muito cedo, com consumo inferior ou igual 2% do material combustível. Com base nas 101 medições, a velocidade do vento apresentou valor médio de $3,66 (\pm 3,7)$ km/h, com valor máximo de 15 km/h e valor mínimo de 0 km/h (Figura 32). Todas as queimas foram realizadas sempre com o vento a favor do sentido de propagação.

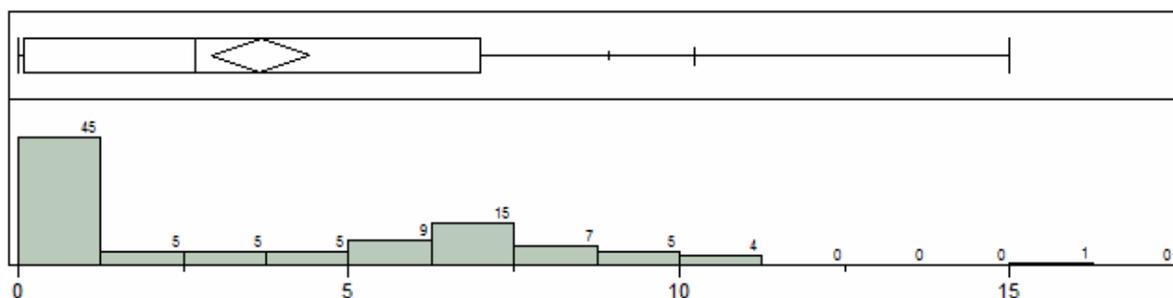


Figura 32 - Distribuição e *quantile box plot* da velocidade do vento (km/h) para as 101 queimas laboratoriais realizadas.

Os valores para a velocidade do vento durante os experimentos estão dentro do espectro dos valores obtidos em campo por White et al. (2013d), que determinaram a velocidade média do vento para os povoamentos de eucalipto do litoral norte da Bahia como sendo de $4,47 (\pm 1,33)$ km/h, com valor máximo e mínimo de 14,14 e 0,02 km/h, respectivamente.

7.2.2. Análise das variáveis de saída

7.2.2.1. Velocidade de propagação do fogo

A velocidade média de propagação do fogo, com base nas 105 queimas experimentais, foi de 0,46 ($\pm 0,59$) m/min, apresentando valor máximo e mínimo de 3,13 e 0,0 m/min, respectivamente (Figura 33). O valor de 0,0 m/min foi atribuído para 20 das 105 queimas em que o fogo se apagou antes de chegar até a linha final da mesa de combustão.

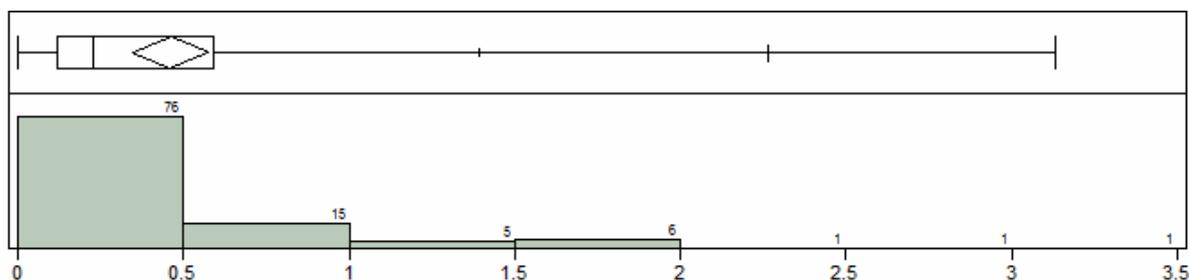


Figura 33 - Distribuição e *quantile box plot* da velocidade de propagação do fogo (m/min) durante as 105 queimas experimentais realizadas.

Levando-se em consideração a classificação proposta por Botelho e Ventura (1990) (Tabela 13), apenas em três queimas a velocidade de propagação foi classificada como sendo média, enquanto que no restante ($n = 102$) a velocidade de propagação foi considerada como sendo lenta. A maioria dos resultados foram classificados como lento, principalmente porque todas as queimas laboratoriais realizadas neste estudo foram feitas em terreno plano e mais da metade delas com velocidade do vento inferior a 3 km/h. Além disso, a tabela de Botelho e Ventura (1990) foi desenvolvida para descrever uma grande diversidade de incêndios que ocorrem ao redor do mundo nas mais distintas formações vegetais.

Em países com clima temperado e com florestas nativas de *Pinus* e *Eucalyptus*, como Estados Unidos, Canadá e Austrália, por exemplo, o fogo, quando atinge a copa das árvores, costuma se propagar em velocidade bem superior. De acordo com Gould et al.

(2007), por exemplo, incêndios experimentais realizados em florestas naturais de eucalipto na Austrália chegaram à marca de 22,73 m/min. Já estudos de Alexander e Cruz (2006), descrevem velocidade de propagação máxima de 107 e média de 39,1 m/min para incêndios florestais de grande porte em florestas de *Pinus* no Canadá, e velocidade máxima de 80,5 e média de 37,4 para incêndios de grande porte em florestas de *Pinus* nos Estados Unidos.

Tabela 13 - Classificação da velocidade de propagação do fogo proposta por Botelho e Ventura (1990).

Velocidade de Propagação (m/min)	Classificação
< 1,98	Lenta
1,98 - 9,96	Média
9,96 - 69,96	Alta
> 69,96	Extrema

Estudos realizados no Brasil, como o de Soares (1979), descrevem uma velocidade média de propagação do fogo entre 1,98 e 2,52 m/min para queimas controladas em povoamentos de *Pinus* em Minas Gerais. Batista (1995) obteve velocidade de propagação de 0,54 m/min para queimas controladas a favor do vento também em plantações de *Pinus* no Paraná. Já Ribeiro (1997) descreve a velocidade de propagação do fogo máxima de 2,63 m/min para queimas controladas em floresta de *Eucalyptus* em Santa Catarina.

Estudos mais recentes, também realizados no Brasil, descrevem a velocidade média de propagação do fogo de 0,25 m/min para experimentos laboratoriais envolvendo liteira de *Pinus elliottii* (LORO e HIRAMATSU, 2004); 0,42 m/min, 0,78 m/min e 0,06 m/min para materiais combustíveis provenientes de *Pinus* sp., *Tectona grandis* e Mata Atlântica, respectivamente (ALMEIDA et al., 2009); e 0,51 m/min para vegetação de caatinga arbustiva arbórea fechada (RIBEIRO, 2010).

7.2.2.2. Comprimento das chamas

O comprimento das chamas foi medido com base nas 105 queimas experimentais. Em sete dos experimentos, o valor do comprimento das chamas foi definido como sendo 0 em função do fogo ter se apagado rapidamente, com consumo do material combustível menor ou igual a 2%. O seu valor médio foi de 0,45 ($\pm 0,29$) m com máximo e mínimo de 1,2 e 0,0 m, respectivamente (Figura 34).

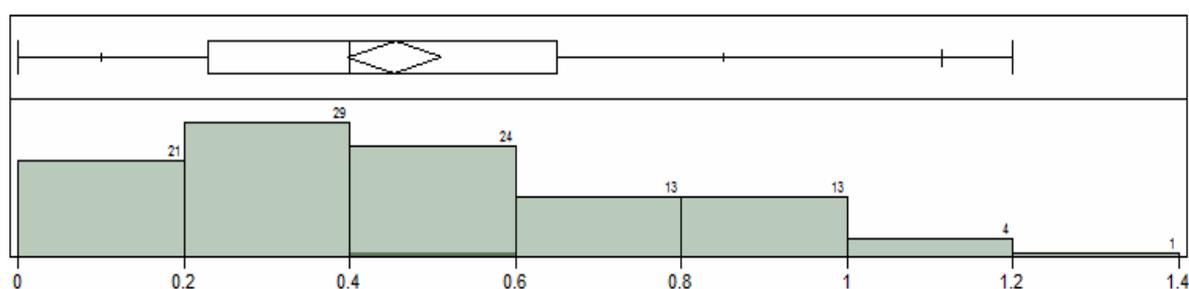


Figura 34 - Distribuição e *quantile box plot* do comprimento das chamas (m) nas 105 queimas laboratoriais.

A velocidade de propagação do fogo e o comprimento das chamas são as duas variáveis comumente analisadas nos estudos de comportamento do fogo. Em florestas naturais de eucalipto na Austrália e em florestas naturais de *Pinus*, o fogo superficial costuma atingir comprimento e altura bem maiores do que o observado neste estudo, por vezes chegando a atingir a copa das árvores e originando incêndios de copa de alta intensidade. Gould et al. (2007), por exemplo, descreveram chamas de até 14 metros de altura para queimas em florestas naturais de eucalipto na Austrália; Stocks et al. (2004), descrevem altura das chamas de até 40 metros para incêndios de copa em florestas naturais de *Pinus* no Canadá.

Queimas experimentais de menor porte (apenas superficiais) foram analisadas por Fernandes (2009) que descreve o comprimento das chamas entre 0,5 e 4 metros para queimas experimentais superficiais em *Pinus pinaster* em Portugal. Botelho et al. (1998), também em Portugal e também em florestas de *Pinus pinaster*, descrevem o comprimento das chamas entre 0,25 e 2,5 metros. Em experimentos realizados no Brasil, Beutling (2009)

descreve a altura das chamas entre 0,75 a 5,63 metros em acículas de *Pinus elliottii* com espessura da manta estabelecida em 16 cm.

Roussopoulos e Johnson (1975) afirmam que incêndios com comprimento das chamas de até 0,60 metros podem ser facilmente apagados sem risco de ferimentos. Sendo assim, em 70% (n = 74) das queimas laboratoriais, o fogo foi classificado como de chamas de baixo comprimento e fácil de apagar, enquanto que em apenas 30% das queimas, maiores precauções seriam necessárias. De acordo com os mesmos autores, em incêndios com comprimento das chamas de aproximadamente 2,7 metros é necessário manter uma distância de entre 9 e 12 metros para evitar riscos de queimadura. Já Andrews (2009), afirma que a distância segura para os bombeiros, utilizando roupas específicas de proteção ao fogo, equivale a 4 vezes o comprimento das chamas. Sendo assim, no pior dos cenários, seria necessário manter uma distância de no mínimo 4,8 metros da linha do fogo para prevenir queimaduras, enquanto que na grande maioria das queimas uma distância de 1,8 metros seria suficiente. Lembrando que as respectivas recomendações são válidas apenas para povoamentos sem presença de sub-bosque e em terreno plano.

Além de sua importância para se determinar a área de segurança, o valor do comprimento das chamas também pode ser utilizado para a construção de aceiros. De acordo com Smith e Lamont (2007) o tamanho do aceiro deve ser, no mínimo, 4 vezes maior que o comprimento das chamas. Portanto, de acordo com os dados obtidos neste estudo, os aceiros devem ser de no mínimo 4,8 metros para povoamentos de eucalipto da área de estudo sem presença de vegetação de sub-bosque e em terreno plano.

7.2.2.3. Consumo do material combustível

Com base nos valores encontrados para as 105 queimas experimentais realizadas, o consumo do material combustível variou de 0 a 100%, apresentando um valor médio de 68 ($\pm 34,4$) % (Figura 35).

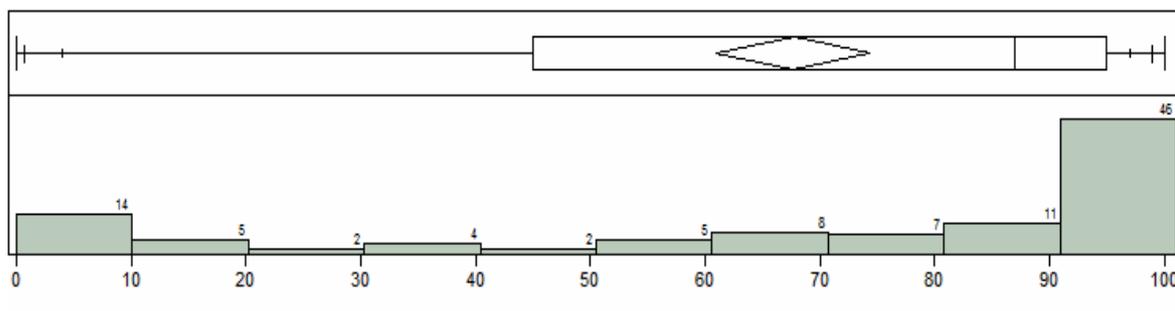


Figura 35 - Distribuição e *quantile box plot* do consumo do material combustível (%) durante as 105 queimas experimentais realizadas.

O consumo do material combustível não é uma variável comumente analisada por trabalhos que descrevem o comportamento do fogo. Algumas poucas publicações são feitas por pesquisadores para avaliar técnicas de queima controlada e a eficiência do fogo em reduzir o risco de incêndios de grande porte. Botelho et al. (1994), por exemplo, ao avaliar o consumo do material combustível através de queimas prescritas em povoamentos de *Pinus pinaster* em Portugal e na Espanha, encontraram valores entre 21 e 95%, sendo o valor médio de 53%. Fernandes e Loureiro (2013), baseados em 90 queimas prescritas em *Pinus pinaster*, em Portugal, definiram o consumo do material combustível total entre 24 e 94,8%.

Não foi encontrada na literatura a definição de um valor do consumo do material combustível considerado como sendo ideal para operações de redução do material combustível, mas, é importante mencionar a necessidade de se estabelecer um balanço para que o material combustível seja consumido e ao mesmo tempo o fogo e o consumo não sejam tão elevados a ponto de provocar danos ao ambiente ou destruir o hábitat dos animais que ali vivem.

7.2.2.4. Tempo de queima

O tempo de queima foi medido em 69 dos 105 experimentos. Vinte experimentos não tiveram tempo de queima medidos em função do fogo não ter se propagado até o final da mesa de combustão. Em outros 16 experimentos a variável não foi medida porque até então não fazia parte dos objetivos do estudo.

Com base nos valores obtidos durante os experimentos (Figura 36), o tempo de queima médio foi de 10,29 ($\pm 4,74$) min, com máximo e mínimo de 26,57 min e 3 min, respectivamente.

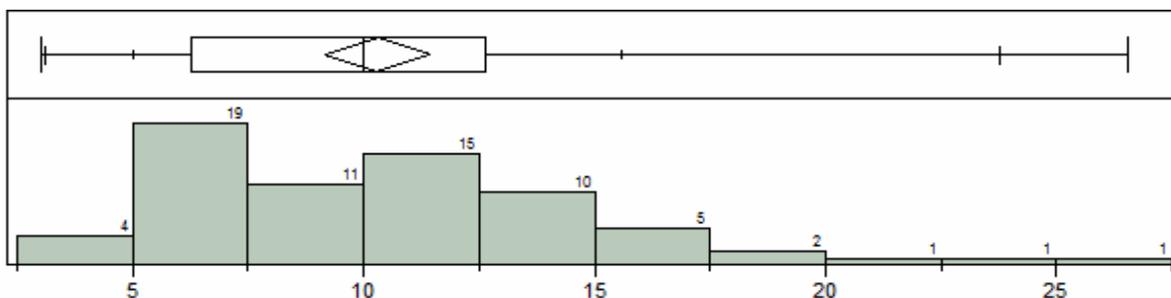


Figura 36 - Distribuição e *quantile box plot* do tempo de queima (min) ao longo de 69 queimas experimentais realizadas.

Apesar de o tamanho das amostras queimadas serem distintas, é válido citar o trabalho de Ribeiro (2010) que definiu o tempo de queima para 21 amostras de 1m² em vegetação de caatinga na Paraíba. De acordo com a autora, o tempo de queima variou de 3,58 min até 40 min, apresentando um valor médio de 16 min por queima.

O tempo de queima total não costuma ser uma variável avaliada, principalmente em função de que seu valor irá variar conforme o tamanho da área queimada. O que normalmente costuma-se medir é o tempo de residência, que compreende o tempo no qual as chamas permanecem em um determinado ponto. Apesar de distintas, ambas as variáveis são importantes a fim de se determinar o tempo no qual o fogo vai permanecer sobre o solo, e, conseqüentemente, definir a intensidade dos danos sobre o mesmo.

7.2.2.5. Intensidade da linha do fogo

A intensidade da linha do fogo foi calculada com base na equação desenvolvida por Byram (1959). A mesma apresentou valor médio de 146,07 ($\pm 200,43$) kW/m/s, com valor máximo de 1385,2 e valor mínimo de 0,0 kW/m/s (Figura 37).

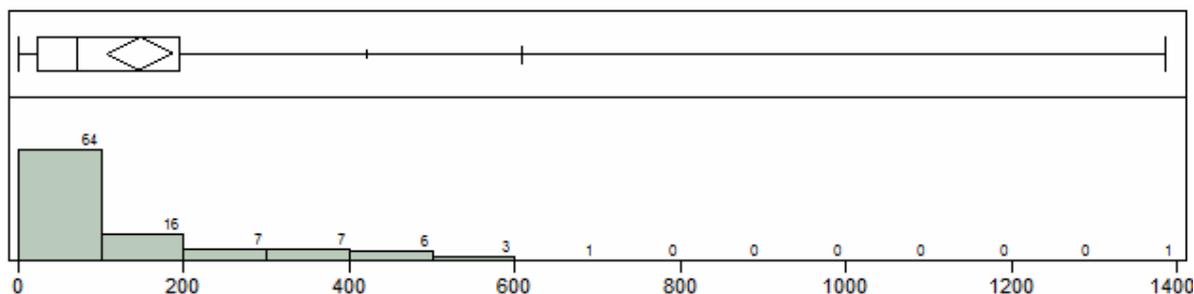


Figura 37 - Distribuição e *quantile box plot* da intensidade da linha do fogo calculada através do modelo de Byram (1959) para as 105 queimas laboratoriais.

Botelho et al. (1994) calcularam a intensidade da linha do fogo através da equação de Byram (1959) para queimas prescritas em *Pinus pinaster*, em Portugal, e obtiveram valores entre 39 a 812, apresentando o valor médio de 148 kW/m/s, valores estes bem próximos aos encontrados neste estudo. Batista e Soares (1995), para queimas em povoamentos de *Pinus taeda*, no norte do estado do Paraná, utilizando a equação de Byram (1959), encontraram valores entre 10,33 e 162,42 kW/m/s, com valor médio de 40,2 kW/m/s para a intensidade da linha do fogo. Burrows et al. (1989), para queimas controladas em *Pinus radiata*, na Austrália, obtiveram valores para a intensidade da linha do fogo entre 12,05 e 602,5 kW/m/s.

Em função da grande diversidade de valores encontrados na literatura e obtidos nas queimas laboratoriais realizadas neste estudo, é importante determinar quais os limites máximos aceitáveis da intensidade da linha do fogo que não produzam danos às árvores e ao meio ambiente. Neste contexto, McArthur (1967) desenvolveu uma tabela para os limites da intensidade do fogo para danos aceitáveis em florestas comerciais de eucalipto (Tabela 14).

Tabela 14 - Limites da intensidade do fogo para danos aceitáveis em florestas comerciais de eucalipto (McArthur, 1967)

Intensidade do fogo (kW/m/s)	Descrição do comportamento do fogo
17 - 42	Intensidade muito baixa; altura das chamas menor que 0,3m e o fogo geralmente se extingue sozinho.
43 - 172	Intensidade ótima; altura das chamas variando de 0,3 a 0,9m; altura de crestamentos entre 1,8 a 4,5m; pouca chance do fogo escapar ao controle
173 - 243	Intensidade muito severa para alguns tipos florestais; altura das chamas entre 0,9 e 1,5m; altura de crestamento entre 4,8 e 9,0m; dificuldade em se controlar o fogo especialmente em altas concentrações de material combustível.
244 - 348	Limite máximo para danos aceitáveis em florestas comerciais de eucalipto

Através da análise da tabela de McArthur (1967), a maioria das queimas laboratoriais foram classificadas como sendo de intensidade ótima para realização de queimas controladas (n = 38); 23 queimas tiveram intensidade do fogo inferior a 17 kW/m/s; 13 queimas foram classificadas como de intensidade muito baixa; 8 de intensidade severa; 9 no limite máximo para danos aceitáveis em florestas comerciais de eucalipto; e 14 com intensidade superior a este limite.

Quanto aos valores propostos por Rothermel (1983) (Tabela 15) 92 das queimas experimentais foram classificadas como fogo de baixo perigo, podendo ser controlado por pessoas utilizando equipamentos de mão e atacando diretamente a frente ou os flancos. O restante (n = 13) foi classificado como fogo muito intenso para ser apagado diretamente por pessoas utilizando equipamentos de mão, recomendando-se a utilização de equipamentos de grande porte e o ataque ao fogo através dos flancos.

É importante ressaltar que os resultados obtidos descrevem apenas povoamentos de eucalipto em terreno plano. Quando o fogo se propaga em terrenos acidentados em aclive, a velocidade de propagação aumenta e, conseqüentemente, a intensidade da linha do fogo também, na mesma proporção.

Tabela 15 – Caracterização do fogo de acordo com a altura das chamas e a intensidade da linha do fogo (Rothermel, 1983).

Altura das Chamas (m)	Intensidade da Linha do fogo (kW/m/s)	Interpretação
Abaixo de 1,2	Abaixo de 346	O fogo pode, normalmente, ser controlado por pessoas utilizando equipamento de mão atacando a frente ou os flancos.
Entre 1,2 e 2,4	Entre 346 e 1732	O fogo é muito intenso para ser apagado diretamente por pessoas utilizando equipamentos de mão. Equipamentos como escavadoras, caminhões com bombas d'água e aeronaves retardantes podem ser efetivos.
Entre 2,4 e 3,3	Entre 1732 e 3464	O fogo pode apresentar sérios problemas para ser controlado. Fogo na copa das árvores, brasas sendo transportadas pelo vento. Tentativas de apagar o fogo através da sua frente provavelmente não terão sucesso.
Acima de 3,3	Acima de 3464	Ocorrência de fogo na copa das árvores, brasas sendo carregadas pelo vento podendo incendiar outras áreas. Tentativas de apagar o fogo através da sua frente serão ineficientes.

7.2.2.6. Energia por Unidade de área

A energia liberada por unidade de área foi calculada com base no modelo de Byram (1959) através da multiplicação da carga total de material combustível disponível pela energia calorífica do material combustível. A mesma apresentou valor médio de 16.198,22 ($\pm 12.372,42$) kJ/m² apresentando valor máximo de 67.334 e valor mínimo de 0 kJ/m² (Figura 38)

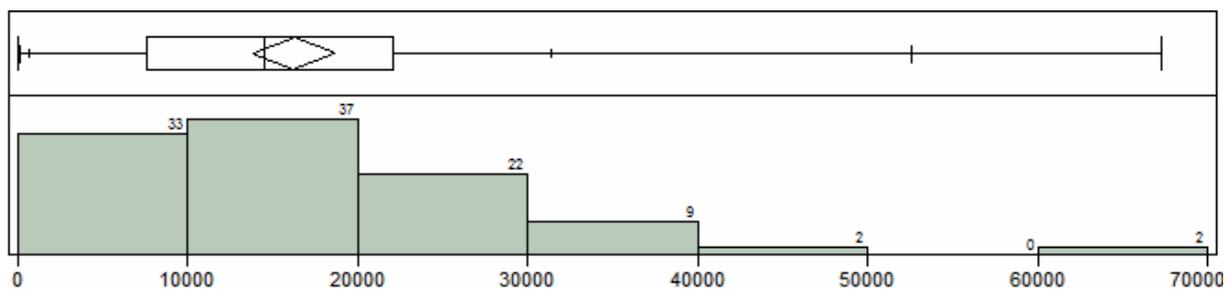


Figura 38 - Distribuição e *quantile box plot*, da energia por unidade de área calculada através do modelo de Byram (1959) para as 105 queimas laboratoriais.

Botelho et al. (1994) definiram a energia por unidade de área, para queimas prescritas em *Pinus pinaster* em Portugal, entre 4.432 e 20.157 kJ/m² com valor médio de 11.384,61 kJ/m². Já Batista e Soares (1995) encontraram valores entre 2.217,52 e 12.105,34 kJ/m² e valor médio de 6.573,06 kJ/m² para queimas controladas em povoamentos de *Pinus taeda* no estado do Paraná, Brasil.

7.2.3. Construção dos modelos matemáticos de previsão do comportamento do fogo.

Para a construção dos modelos matemáticos para estimar o comportamento do fogo foram utilizadas as variáveis independentes: carga do material combustível MS1, carga do material combustível MS2, carga total (MS1 + MS2), espessura do leito, densidade do leito, umidade do material combustível da classe MS1, umidade do material combustível da classe MS2, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Deu-se preferência a modelos baseados apenas em variáveis independentes passíveis de serem medidas pré-fogo. Em alguns casos em que foi grande o aumento da eficiência do modelo (medida pelo coeficiente de determinação e pela raiz do erro quadrado médio) foram desenvolvidos modelos alternativos que utilizaram como variável independente (variável de entrada) características do comportamento do fogo.

7.2.3.1. Velocidade de propagação do fogo

O modelo matemático para a velocidade de propagação do fogo foi construído com base em dados de 85 queimas experimentais. Vinte queimas foram descartadas devido ao fogo não ter se propagado até o final da mesa de combustão.

Com base no procedimento *foward stepwise*, em ordem decrescente, as variáveis velocidade do vento, umidade do material combustível MS1 e densidade do leito do material combustível, foram as que responderam significativamente pela variação na velocidade de propagação do fogo (Tabela 16). Embora a adição das demais variáveis melhorasse a capacidade preditiva do modelo, por outro lado, quanto mais variáveis independentes adicionadas, maior o trabalho em obtê-las e, conseqüentemente, maior a dificuldade de uso das equações e sua adoção por parte dos gestores. O pequeno acréscimo na capacidade de predição não justificou a inclusão de demais variáveis no modelo.

Tabela 16 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo da velocidade de propagação do fogo. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R² acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento *foward stepwise* ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.

Parâmetro	<i>Sig. Prob.</i>	Seq. SQ	R ² Acum.	Pearson (r)
<u>Velocidade do vento</u>	0,000	31,350	0,507	0,720*
<u>Densidade do leito</u>	0,001	4,054	0,572	-0,206
<u>Umidade do material combustível MS1</u>	0,001	3,614	0,631	-0,307*
Carga da classe MS2	0,061	1,431	0,654	-0,144
Espessura do leito	0,070	1,153	0,660	0,143
Carga total (MS1 + MS2)	0,105	0,697	0,667	-0,112
Carga da classe MS1	0,204	0,420	0,673	-0,008
Umidade relativa do ar	0,266	0,320	0,673	-0,086
Temperatura do ar	0,733	0,030	0,673	0,117
Umidade do material combustível MS2	0,902	0,004	0,674	-0,174

*Correlações de Pearson significativas ao nível de significância de 5%.

A análise individual dos gráficos de correlação e das linhas de tendência entre as variáveis selecionadas pelo procedimento *forward stepwise* versus a velocidade de propagação do fogo, demonstra que a relação entre as mesmas não foi linear (Figura 39). Além disso, evidencia-se que quando a densidade do leito e a umidade do material combustível aumentam, a velocidade de propagação diminui, já quando a velocidade do vento aumenta, a velocidade de propagação também aumenta.

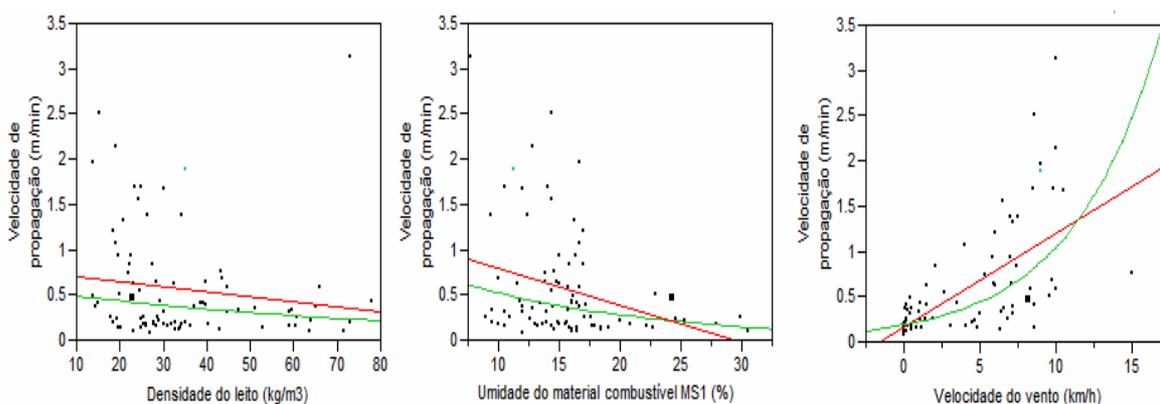


Figura 39 - Linhas de tendência entre as variáveis: densidade do leito (kg/m^3), umidade do material combustível MS1 (%) e velocidade do vento (km/h), versus a velocidade de propagação do fogo (m/min). Percebe-se que a linha de tendência logaritimizada (linha verde) está mais próxima dos pontos do que a linha de tendência linear (vermelha), indicando assim que a relação entre as variáveis não é linear.

O modelo matemático construído que apresentou um maior R^2 foi obtido ao se logaritimizar a variável velocidade de propagação ($R^2 = 0,65$; $\text{RMSE} = 0,55$; $p < 0,0001$). A equação gerada e o gráfico real versus previsto estão representados abaixo (Figura 40).

$$R = e^{(-0,385 - 0,016 * Bd - 0,048 * Mms + 0,172 * U)}$$

Onde:

R = Velocidade de propagação do fogo (m/min);

e = Base dos logaritmos naturais (2,718...);

Bd = Densidade do leito (kg/m^3);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%);

U = Velocidade do vento (km/h).

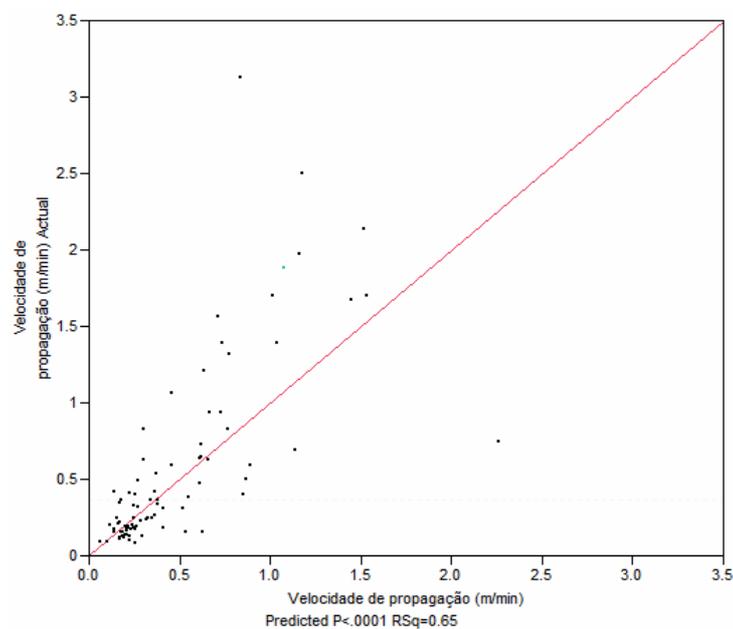


Figura 40 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo da velocidade de propagação do fogo construído (m/min). A linha de tendência (linha vermelha) indica os valores ideais, ou seja, quanto mais distante os pontos estão da linha, pior o modelo.

É necessário levar em consideração que a velocidade de propagação da frente do fogo irá variar a depender da inclinação do terreno. É conhecido e já confirmado por diversos autores (eg. MCARTHUR, 1962; VAN WAGNER, 1977b; GOULD et al., 2007) que a velocidade de propagação do fogo irá aumentar de forma exponencial, para incêndios se propagando em aclives, à medida que a inclinação do relevo for aumentando de acordo com a equação proposta por McArthur (1962):

$$\Phi S_f = \exp(0,069 * \Phi) \quad (\text{McArthur, 1962})$$

Onde:

S_f = Fator de ajuste da velocidade de propagação do fogo

Φ = Inclinação do terreno (°)

Portanto, caso seja necessário ajustar a velocidade de propagação da frente do fogo para incêndios se propagando em aclives com inclinação maior do que 0°, é necessário multiplicar o valor de R obtido, pelo respectivo fator de ajuste com base na inclinação do terreno (Tabela 17).

Tabela 17 - Fator de ajuste da velocidade de propagação do fogo para a inclinação do terreno com base na equação de McArthur (1962).

Inclinação do terreno (°)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Fator de ajuste	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	2,3	2,6	3	3,5	4	4,6	5,2	6	6,9	7,9

A relação das variáveis que influenciaram a velocidade de propagação do fogo e que foram selecionadas para fazerem parte do modelo matemático seguem o padrão da maioria dos modelos descritos na literatura.

A velocidade do vento e a umidade do material combustível são as variáveis mais utilizadas para medir a velocidade de propagação do fogo. Ambas estão inseridas no modelo de propagação do fogo superficial de Rothermel (1972), além disso, diversos outros trabalhos como, por exemplo, o de Mendes-Lopes et al. (2003) e o de Fernandes (2009) para fogo em liteira de *Pinus pinaster* na Europa; o de Gould (1994) e o de Gould et al. (2007) para florestas de eucalipto na Austrália; e o de Fernandes (2001) para vegetações arbustivas em Portugal, utilizam as respectivas variáveis para definir a velocidade de propagação do fogo. Em todos os trabalhos supracitados a velocidade do vento irá influenciar positivamente a velocidade de propagação enquanto que a umidade do material combustível irá influenciar negativamente, mudando apenas, de caso para caso, o fator de influência de cada variável.

Apesar de alguns modelos para a velocidade de propagação do fogo não utilizarem a variável densidade do leito, a maioria o utiliza, seja de forma direta ou de forma indireta através da mensuração da altura e da carga do material combustível, como no trabalho de Gould et al. (2007). Diversos trabalhos como o de Soares (1979), por exemplo, relatam que o fogo se propaga mais rapidamente em materiais menos compactos, ou seja, materiais

com uma menor densidade do leito. A própria equação de Rothermel (1972) utiliza a variável densidade do material combustível como um fator negativo para a velocidade de propagação do fogo, ou seja, quanto maior o valor da densidade, menor o valor da velocidade de propagação do fogo.

7.2.3.2. Comprimento das chamas

O modelo matemático para se estimar o comprimento das chamas foi construído com base em dados de 98 queimas experimentais. Em sete experimentos o comprimento das chamas não foi avaliado em função do fogo ter se apagado rapidamente não chegando a consumir mais que 2% do material combustível.

Com base no procedimento *forward stepwise*, em ordem decrescente, as variáveis espessura do leito, umidade do material combustível MS1 e velocidade do vento, foram as variáveis que responderam significativamente pelo comprimento das chamas. As demais variáveis não foram significativas o suficiente para entrarem no modelo (Tabela 18).

Tabela 18 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do comprimento das chamas. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento *forward stepwise* ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.

Parâmetro	<i>Sig. Prob.</i>	Seq. SQ	R^2 Acum.	Pearson (r)
<u>Espessura do leito</u>	0.000	2.114	0.327	0,547*
<u>Umidade do material combustível MS1</u>	0.000	1.580	0.571	-0,501*
<u>Velocidade do vento</u>	0.000	0.832	0.700	0,437*
Temperatura do ar	0.053	0.086	0.713	0,111
Carga da classe MS1	0.053	0.083	0.726	0,394*
Densidade do leito	0.109	0.056	0.734	-0,311*
Carga da classe MS2	0.944	0.000	0.735	0,276*
Carga total (MS1 + MS2)	0.838	0.001	0.735	0,434*
Umidade do material combustível MS2	0.980	0.000	0.735	-0,364*
Umidade relativa do ar	0.982	0.000	0.735	-0,088

*Correlações de Pearson significativas ao nível de significância de 5%.

A análise individual dos gráficos de correlação e da linha de tendência entre as variáveis selecionadas pelo procedimento *forward stepwise* e o comprimento das chamas, demonstra que a melhor relação entre as variáveis é a linear (Figura 41). Evidencia-se que a espessura do leito e a velocidade do vento são fatores que influenciam positivamente o comprimento das chamas, enquanto que o teor de umidade dos materiais da classe MS1, negativamente.

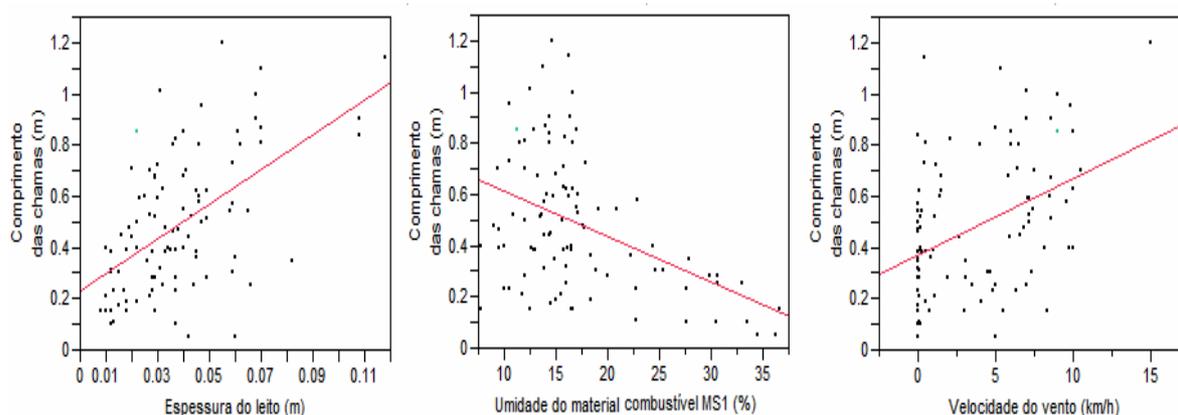


Figura 41 - Linhas de tendência entre as variáveis: espessura do leito (m), umidade do material combustível MS1 (%) e velocidade do vento (km/h), versus o comprimento das chamas (m).

O modelo matemático construído apresentou alta significância ($R^2 = 0,68$; $RMSE = 0,15$; $p < 0,0001$). Neste caso nenhuma transformação dos valores foi necessária para aumentar a sua significância. A equação e o gráfico real versus previsto estão representados abaixo (Figura 42).

$$Fl = 0,428 + 7,397 * Fbd - 0,019 * Mms1 + 0,027 * U$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

Fbd = Espessura do leito (m);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%);

U = Velocidade do vento (km/h).

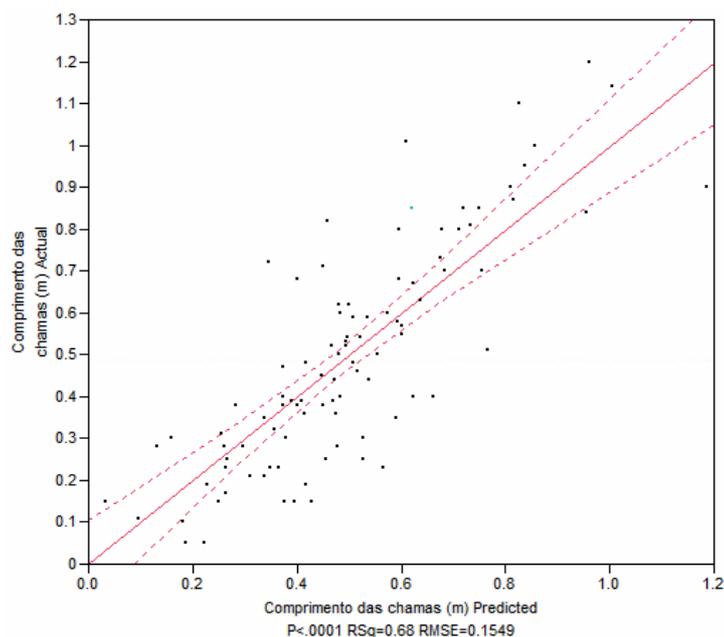


Figura 42 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo do comprimento das chamas construído (m). Linha vermelha tracejada indica a linha de tendência e linha vermelha pontilhada, a curva de significância (95%).

A maioria dos modelos existentes e amplamente utilizados na literatura para descrever o comprimento das chamas costuma definir esta variável em função da intensidade da linha do fogo ou da velocidade de propagação. O modelo mais utilizado no mundo (BYRAM, 1959), por exemplo, calcula o comprimento das chamas com base na intensidade do fogo, que por sua vez é calculada em função da velocidade de propagação do fogo, carga de material combustível disponível e calor de combustão. O modelo de Thomas (1963), que também costuma ser utilizado por modelos Norte Americanos de modelagem do comportamento do fogo, também calcula o comprimento das chamas com base na intensidade da linha do fogo. Trabalhos mais recentes como o desenvolvido por Dupuy et al. (2011), por exemplo, também estimam o comprimento das chamas com base na intensidade da linha do fogo. Já o modelo de Fernandes (2009) desenvolvido através de queimas experimentais em florestas de *Pinus pinaster* em Portugal, utiliza a velocidade de propagação do fogo e o teor de umidade do material combustível para descrever o comprimento das chamas. O modelo de Gould et al. (2007), desenvolvido a partir de queimas experimentais em florestas secas de eucalipto na Austrália, utiliza a velocidade de propagação do fogo e a espessura do material combustível.

Neste estudo verificou-se a existência de uma alta correlação entre o comprimento das chamas e a intensidade da linha do fogo ($r = 0,73$; $p < 0,0001$) (Figura 43). Em função disto, um modelo alternativo foi desenvolvido utilizando esta variável.

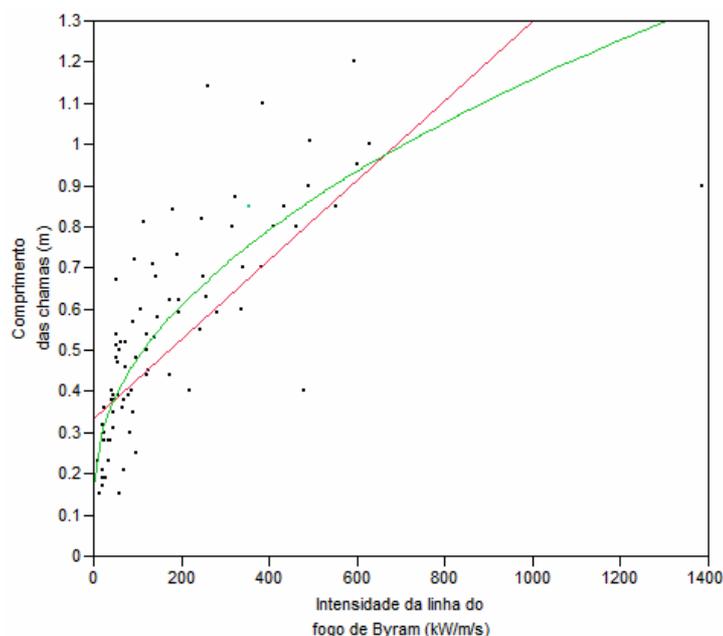


Figura 43 - Linhas de tendência entre as variáveis comprimento das chamas (m) e intensidade da linha do fogo de Byram (kW/m/s). Percebe-se que a linha de tendência linear (vermelha) não respondeu tão bem quanto a linha não linear (verde) obtida ao ajustar os valores utilizando a raiz quadrada da I_b .

Além da intensidade da linha do fogo de Byram, o modelo alternativo apresentou um acréscimo de sua eficiência ao inserir as variáveis espessura do leito e umidade do material combustível da classe MS1 ($R^2 = 0,79$; $RMSE = 0,13$; $p < 0,0001$) (Figura 44).

$$Fl = 0,202 + 0,024 * \sqrt{I_B} + 3,63 * Fbd - 0,006 * Mms1$$

Onde:

Fl = Comprimento das chamas (m);

I_B = Intensidade da Linha do Fogo medida pela equação de Byram (1959) (kW/m/s);

Fbd = Espessura do leito (m);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%).

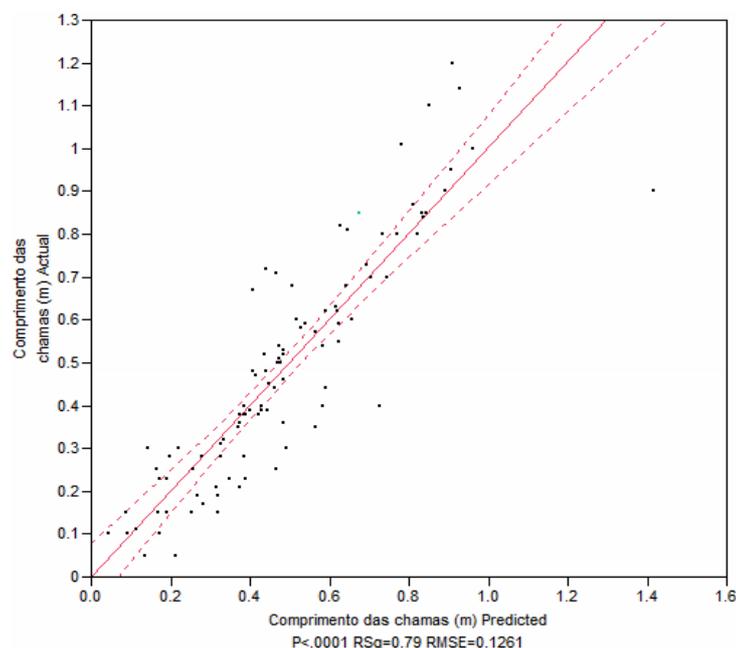


Figura 44 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo alternativo do comprimento das chamas (m).

Como o modelo alternativo é calculado com base na intensidade da linha do fogo, que por sua vez depende da velocidade de propagação, é possível estimar o comprimento das chamas para regiões com inclinação de relevo utilizando esta última fórmula, bastando apenas ajustar a velocidade de propagação de acordo com a tabela de ajuste de McArthur (1962) e calcular a intensidade da linha do fogo com base nessa velocidade ajustada. Entretanto, é conveniente lembrar que o modelo foi desenvolvido apenas para terrenos planos, a sua aplicação em terrenos com inclinação do relevo utilizando este último modelo matemático pode gerar valores insatisfatórios.

7.2.3.3. Consumo do Material Combustível

O modelo para se estimar o consumo do material combustível pelo fogo foi construído com base nos dados de todas as 105 queimas experimentais. Utilizando-se do procedimento *forward stepwise*, em ordem decrescente, as variáveis umidade do material combustível MS1, densidade do leito e carga do material combustível da classe MS1,

foram as que responderam significativamente pela alteração no consumo do material combustível durante as queimas experimentais. As demais variáveis não foram significativas o suficiente para entrarem no modelo (Tabela 19).

Tabela 19 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do consumo do material combustível. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R² acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento *forward stepwise* ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.

Parâmetro	Sig. Prob.	Seq. SQ	R² Acum.	Pearson (r)
<u>Umidade do material combustível MS1</u>	0.000	38138.346	0.389	-0,685*
<u>Densidade do leito</u>	0.000	15479.806	0.547	-0,272*
<u>Carga da classe MS1</u>	0.000	9834.374	0.647	0,278*
Espessura do leito	0.115	992.088	0.657	0,259*
Velocidade do vento	0.411	267.300	0.660	0,129
Carga da classe MS2	0.612	102.509	0.661	0,007
Temperatura do ar	0.836	17.358	0.661	0,207*
Umidade relativa do ar	0.787	29.708	0.662	-0,207*
Carga total (MS1 + MS2)	0.879	9.543	0.662	0,166
<u>Umidade do material combustível MS2</u>	0.920	4.260	0.662	-0,487*

*Correlações de Pearson significativas ao nível de significância de 5%.

Através da análise individual dos gráficos de correlação e da linha de tendência entre as variáveis selecionadas pelo procedimento *forward stepwise* e o consumo do material combustível, conclui-se que nenhuma alteração dos valores é necessária para aumentar a eficiência do modelo, sendo a relação linear a de melhor ajuste (Figura 45). Evidencia-se que a carga do material combustível da classe MS1 é um fator positivo, ou seja, quanto maior, maior o consumo, enquanto que a densidade do leito e a umidade do material combustível da classe MS1 são fatores negativos, ou seja, quanto maior, menor o consumo.

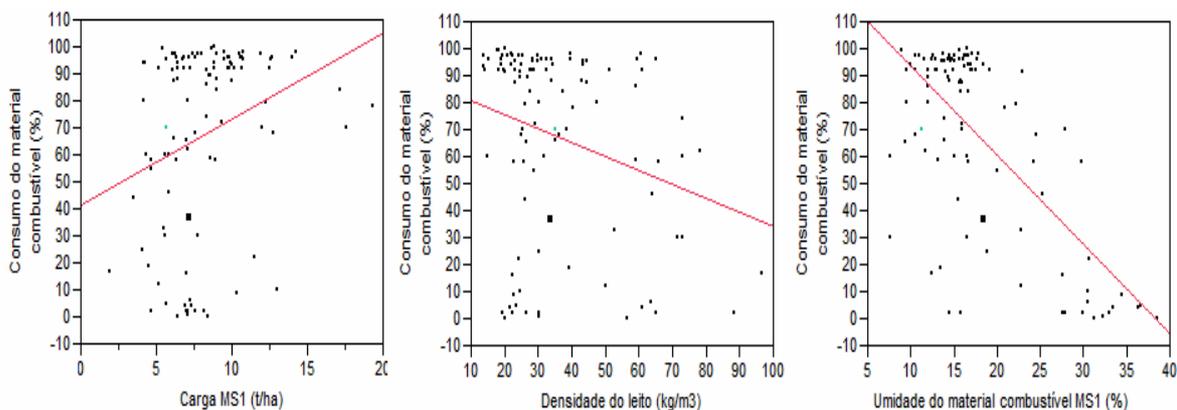


Figura 45 - Linhas de tendência da relação entre as variáveis: carga do material combustível MS1 (t/ha), densidade do leito (kg/m^3) e umidade do material combustível MS1 (%), versus o consumo do material combustível (%).

O modelo construído apresentou alta significância, não sendo necessária nenhuma transformação dos dados para se obter um melhor resultado ($R^2 = 0,68$, $\text{RMSE} = 19,65$; $p < 0,0001$). A equação e o gráfico real versus previsto estão representados abaixo (Figura 46).

$$Fc = 127,173 + 3,269 * Wms1 - 0,603 * Bd - 3,651 * Mms1$$

Onde:

Fc = Consumo do material combustível das classes MS1 e MS2 (%);

$Wms1$ = Carga do material combustível da classe MS1 (t/ha);

Bd = Densidade do leito (kg/m^3);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%).

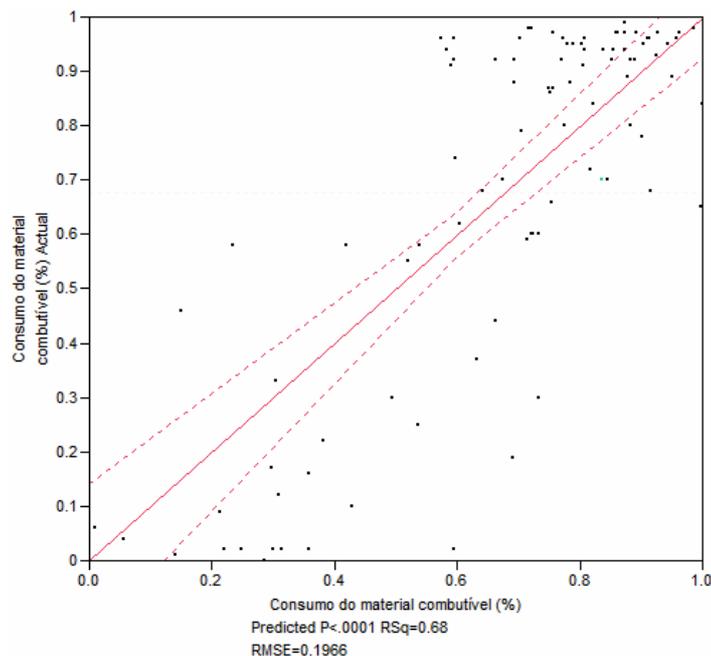


Figura 46 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo do consumo do material combustível (%).

Dentre os estudos que avaliam o consumo do material combustível, Brown et al. (1991) citam que para a sua predição é necessária uma estimativa do conteúdo de umidade, e, principalmente, da carga do material combustível. Ambas as variáveis também foram descritas neste trabalho como importantes fatores afetando o consumo do material combustível pelo fogo.

A densidade do material combustível também é descrita, indiretamente, por Harrington (1987) como um dos fatores que afeta o consumo do material combustível pelo fogo. De acordo com o autor, quanto maior a espessura do material combustível, maior o consumo do mesmo pós-fogo. Sendo a espessura inversamente proporcional à densidade do leito, logo, define-se que quanto menor a densidade maior o consumo.

Na literatura já é clara a relação entre a umidade e o consumo (BROWN et al., 1985; BROWN et al., 1991; HARRINGTON, 1987; FERNANDES e LOUREIRO, 2013) e entre a espessura e o consumo (HARRINGTON, 1987), entretanto a relação entre a carga e o consumo ainda não é um tópico muito discutido.

Neste estudo, apenas a carga do material combustível da classe MS1 correlacionou-se positivamente com o consumo do material combustível. Isto pode ser explicado porque

em experimentos com pouco material combustível o fogo por vezes apagava-se sozinho ou se propagava de forma irregular, não queimando por toda a mesa de combustão e, conseqüentemente, reduzindo a área de ação do fogo e o consumo do material.

A carga de material combustível da classe MS2, por sua vez, não apresentou correlação com o consumo do material combustível ($r = 0,007$; $p = 0,944$). A explicação para tal fato se dá em função da dificuldade que materiais com menor relação área superficial por volume possuem para queimar (ROTHERMEL, 1972; SOARES e BATISTA, 2007). Entretanto, nos experimentos com alta liberação energia por unidade de área (experimentos com muito material disponível), todo o material combustível, inclusive os da classe MS2, queimavam bem.

O modelo alternativo foi desenvolvido com a substituição da variável carga de material combustível da classe MS1 pela energia liberada por unidade de área em função da alta correlação da mesma com o consumo do material combustível ($r = 0,69$; $p < 0,0001$) (Figura 47).

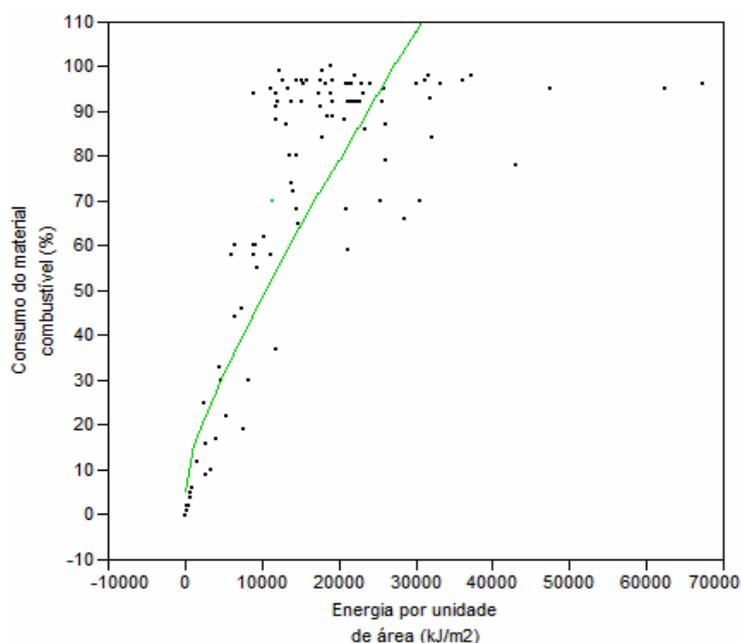


Figura 47 - Linha de tendência (não linear) entre a energia por unidade de área liberada durante a queima (kJ/m^2) e o respectivo consumo do material combustível (%).

O respectivo modelo foi mais eficiente, apresentando uma melhoria no coeficiente de determinação e uma redução do seu erro quadrado médio ($R^2 = 0,82$; $RMSE = 14,82$; $p < 0,0001$). A equação e o gráfico dos valores reais versus valores previstos estão logo abaixo (Figura 48).

$$Fc = 71,9 + 0,38 * \sqrt{HA} - 0,439 * Bd - 1,838 * Mms1$$

Onde:

Fc = Consumo do material combustível das classes MS1 e MS2 (%);

HA = Energia calorífica por unidade de área de acordo com o modelo de Byran (kJ/m^2);

Bd = Densidade do leito (kg/m^3);

$Mms1$ = Umidade do material combustível da classe MS1 (%).

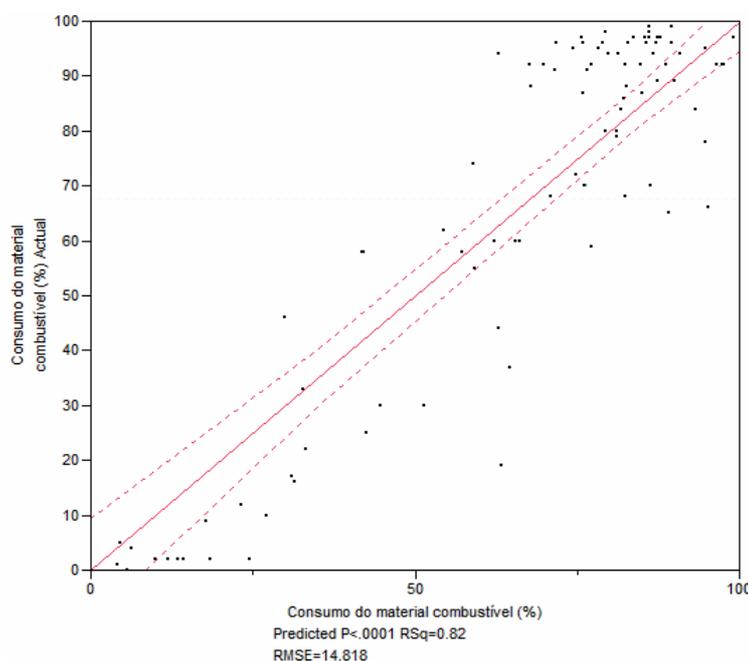


Figura 48 - Valores reais versus valores previstos para o modelo alternativo do consumo do material combustível (%).

Já era de se esperar que quanto maior a quantidade de energia liberada por unidade de área maior seria o consumo de material combustível, já que a quantidade de energia

liberada está diretamente relacionada aos efeitos que o fogo produz no ambiente (BYRAM, 1959; ROTHERMEL, 1972; SOARES e BATISTA, 2007).

Embora o modelo tenha sido desenvolvido apenas para áreas planas, alguns estudos como Botelho et al. (1994), não encontraram nenhuma relação significativa entre o consumo da liteira em queimas experimentais em povoamentos de *Pinus* em áreas com distintos graus de inclinação entre 0 e 20°. Em um recente estudo específico sobre o assunto, Dupuy et al. (2011) ao analisarem o efeito da inclinação do terreno no consumo do material combustível através de 109 queimas laboratoriais, descrevem que nos experimentos com 0° de inclinação o consumo foi de 76%, nos de 10° de inclinação 72%, nos de 20° - 75% e nos de 30° - 78%. Sendo assim os autores concluem que não foi possível definir uma relação clara entre ambas as variáveis. Apesar dos estudos supracitados apontarem inexistência de relação significativa entre o consumo e a inclinação do relevo, muita cautela deve ser tomada ao se utilizar o modelo proposto neste trabalho em áreas não planas. Ressalta-se a necessidade de pesquisas nesta área que é muito pouco estudada e compreendida.

7.2.3.4. Tempo de queima

O modelo matemático para estimar esta variável foi construído com base em dados de 69 queimas experimentais. Utilizando-se do procedimento *forward stepwise*, em ordem decrescente, as variáveis: carga do material combustível da classe MS2; velocidade do vento; e densidade do leito, foram as que responderam significativamente pela alteração no tempo de queima durante os experimentos. As demais variáveis não foram significativas o suficiente para entrarem no modelo (Tabela 20).

Tabela 20 - Relação das variáveis utilizadas para a construção do modelo do tempo de queima. As colunas indicam, respectivamente, a probabilidade de entrar no modelo, a soma dos quadrados sequenciais, o R^2 acumulado e a correlação de Pearson. As variáveis sublinhadas foram as selecionadas através do procedimento *forward stepwise* ($\alpha = 0,05$) para fazerem parte do modelo.

Parâmetro	Sig. Prob.	Seq. SQ	R² Acum.	Pearson (r)
<u>Carga da classe MS2</u>	0,000	473,46	0,371	0,599*
<u>Velocidade do vento</u>	0,000	204,74	0,532	-0,394*
<u>Densidade do leito</u>	0,030	46,89	0,568	0,331*
Umidade do material combustível MS1	0,062	34,18	0,595	0,1
Umidade do material combustível MS2	0,258	12,22	0,605	0,111
Espessura do leito	0,315	9,59	0,612	0,164
Carga MS1	0,017	52,07	0,653	0,181
Temperatura do ar	0,668	1,61	0,654	-0,162
Umidade relativa do ar	0,901	0,14	0,655	0,063
Carga total (MS1 + MS2)	0,998	0,00	0,655	0,558*

*Correlações de Pearson significativas ao nível de significância de 5%.

Analisando os gráficos de correlação e as linhas de tendência entre as variáveis selecionadas pelo procedimento *forward stepwise* e o tempo de queima, percebe-se que a melhor relação entre as variáveis foi a linear, não sendo, portanto, necessário nenhum ajuste dos valores (Figura 49). A carga do material combustível da classe MS2 e a densidade do leito exercem uma influência positiva, ou seja, quanto maior o valor das respectivas variáveis, maior o tempo de queima, enquanto que a velocidade do vento negativa, ou seja, quanto maior, menor o tempo de queima.

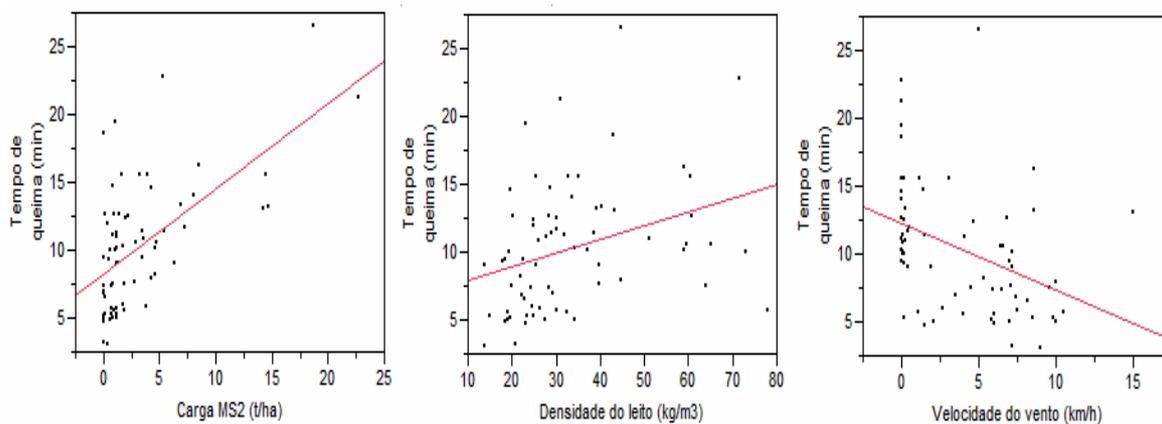


Figura 49 - Linhas de tendência entre as variáveis: carga do material combustível MS2 (t/ha); densidade do leito (kg/m^3) e velocidade do vento (km/h), versus o tempo de queima (min).

O modelo matemático construído apresentou alta significância e um razoável coeficiente de determinação ($R^2 = 0,58$; $\text{RMSE} = 3,15$; $p < 0,0001$). Nenhuma transformação dos valores foi necessária para aumentar a eficiência do modelo. A equação e o gráfico real versus previsto estão representados abaixo (Figura 50)

$$Tq = 8,189 + 0,598 * Wms2 + 0,067 * Bd - 0,523 * U$$

Onde:

Tq = Tempo de queima (min);

Bd = Densidade do leito (kg/m^3);

$Wms2$ = Carga do material combustível da classe MS2 (t/ha);

U = Velocidade do vento (km/h).

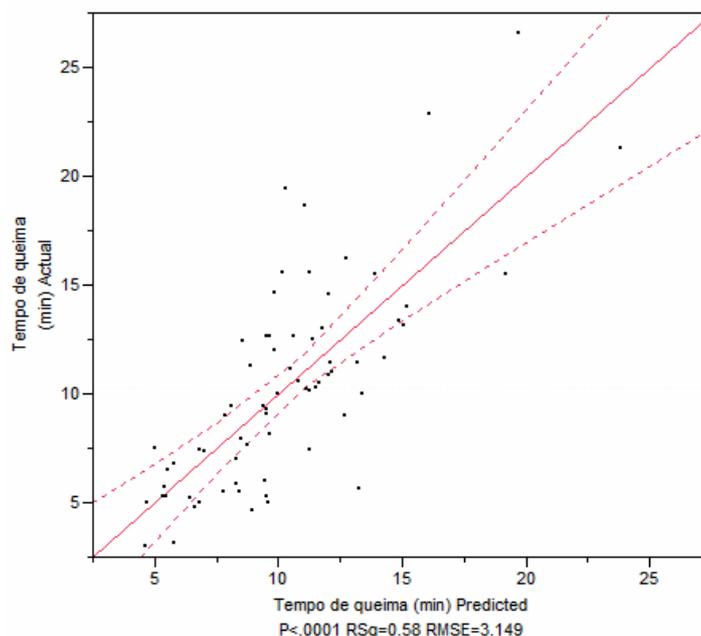


Figura 50 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo desenvolvido para o tempo de queima (min).

Além do modelo baseado apenas em variáveis independentes passíveis de serem medidas pré-fogo, um modelo alternativo utilizando as variáveis de saída velocidade de propagação do fogo e intensidade da linha do fogo de Byram, foi construído. Ambas as variáveis foram incluídas no modelo em função de sua alta correlação com o tempo de queima (Figura 51).

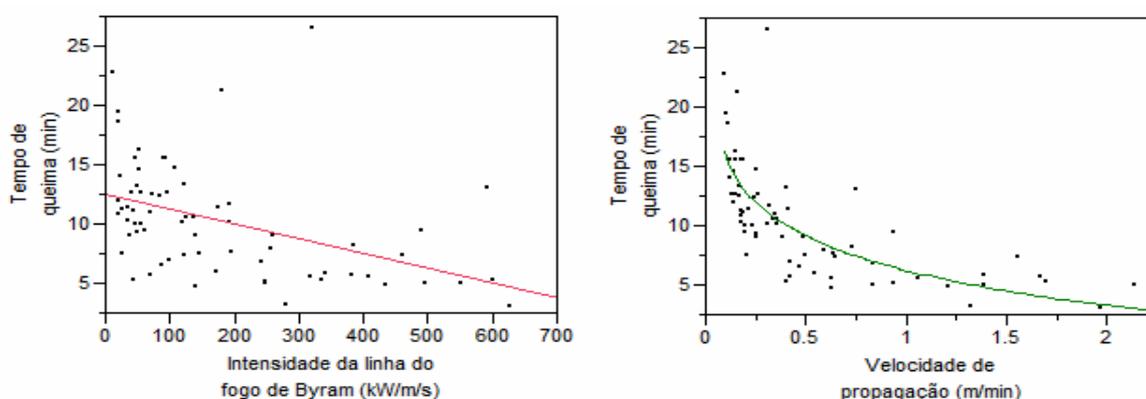


Figura 51 - Relação entre as variáveis: intensidade da linha do fogo de Byram (kW/m/s) e velocidade de propagação (m/min) versus o tempo de queima (min). A linha de tendência indica relação linear entre o tempo de queima e a intensidade, e relação não linear entre o tempo de queima e a velocidade de propagação. Neste último caso foi necessário logaritmizar os valores da velocidade de propagação para se obter um modelo com maior coeficiente de determinação.

Além das duas variáveis citadas acima, o respectivo modelo apresentou um acréscimo de sua significância ao inserir a variável carga do material combustível da classe MS2 ($R^2 = 0,81$; RMSE = 2,08; $p < 0,0001$) (Figura 52).

$$Tq = 0,921 + 0,377 * Wms2 + 0,013 * I_B - 5,958 * Ln(R)$$

Onde:

Tq = Tempo de queima (min);

$Wms2$ = Carga do material combustível da classe MS2 (t/ha);

$ln(R)$ = Logaritmo natural da velocidade de propagação do fogo (m/min);

I_B = Intensidade da linha do fogo medida pelo modelo de Byram (1959) (kW/m/s).

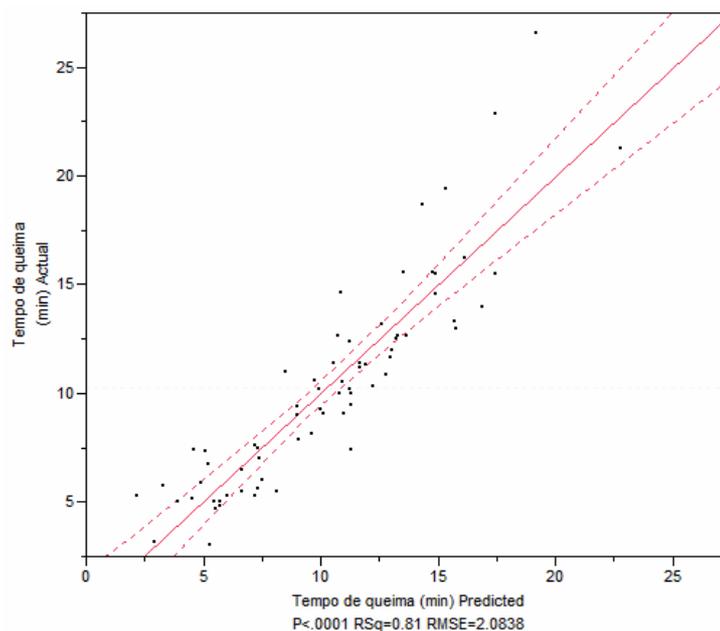


Figura 52 - Valores reais, obtidos durante as queimas experimentais, versus valores previstos através do modelo alternativo para o tempo de queima (min).

Assim como no modelo alternativo para o comprimento das chamas, o modelo alternativo para o tempo de queima é calculado com base na intensidade da linha do fogo, que por sua vez depende da velocidade de propagação. Sendo assim, é possível definir o

tempo de queima para áreas com inclinação de relevo utilizando este modelo alternativo, bastando apenas ajustar a velocidade de propagação de acordo com a tabela de ajuste de McArthur (1962) e em seguida calcular a intensidade da linha do fogo. Entretanto, conforme já mencionado anteriormente, o modelo foi construído apenas para condições de relevo plano, a sua aplicação em áreas com inclinação pode gerar resultados insatisfatórios.

A comparação dos valores da variável tempo de queima com demais trabalhos é dificultada em razão de que o que normalmente se calcula é o tempo de residência. Entretanto, o princípio de ambas as variáveis é o mesmo: enquanto o tempo de queima consiste no tempo total durante o qual há combustão com chamas dentro de uma determinada área, o tempo de residência consiste no tempo em que as chamas irão permanecer sobre um determinado ponto. O que muda é apenas a área de ação. Ambas as variáveis são utilizadas para definir os efeitos que o fogo irá exercer no solo e nos organismos que ali vivem.

O modelo mais utilizado para se calcular o tempo de residência é o desenvolvido por Rothermel e Deeming (1980) que consideram o tempo de residência como resultado da divisão entre a profundidade das chamas pela velocidade de propagação, ou seja, quanto maior a velocidade de propagação, menor o tempo de residência, relação esta também encontrada neste trabalho e aplicada no modelo alternativo.

Em um trabalho mais recente desenvolvido por Wotton et al. (2012) em florestas naturais de *Eucalyptus marginata* na Austrália, os autores descreveram que apenas a velocidade de propagação do fogo possui uma correlação levemente significativa ($p = 0,059$) com o tempo de residência. Ainda de acordo com os mesmos autores, não foram encontradas correlações significativas entre a carga de material combustível fino da classe MS1 ($p = 0,69$) e a densidade do leito ($p = 0,16$) versus o tempo de residência.

Entretanto, os resultados encontrados neste estudo, que indicam a carga de material combustível da classe MS2 e a densidade do leito como responsáveis pela mudança no tempo de queima, estão de acordo com o trabalho de Burrows (2001). De acordo com o autor, quanto maior o diâmetro do material combustível, maior será o tempo de residência das chamas e maior será o tempo total de queima com chamas ativas. Em experimentos realizados em laboratório, o autor definiu o tempo de queima para 10 t/ha de liteira de eucalipto da classe MS1 em uma mesa de 1m^2 entre 4,2 e 6,8 min, enquanto que o tempo

de queima para a mesma quantidade de materiais combustíveis da classe MS2 (15 mm de diâmetro) entre 12 e 15 minutos.

7.3. Simulando o comportamento do fogo

Com base nos dados de entrada referente as 105 queimas experimentais realizadas em laboratório, foram realizadas o mesmo número de simulações utilizando o *software BehavePlus Fire Modeling System 5.0.5* a fim de verificar a eficiência dos modelos matemáticos da velocidade de propagação e do comprimento das chamas, utilizados pelo programa, quando comparados com os dados experimentais obtidos em laboratório.

7.3.1. Velocidade de Propagação do fogo

A velocidade de propagação experimental foi em média 2,89 vezes maior do que a velocidade de propagação simulada. Através da análise da variância (ANOVA) verificou-se que os resultados obtidos em laboratório foram diferentes estatisticamente ($\alpha = 0,05$) dos resultados simulados no *BehavePlus* ($F = 23,98$; $p < 0,0001$) (Figura 53).

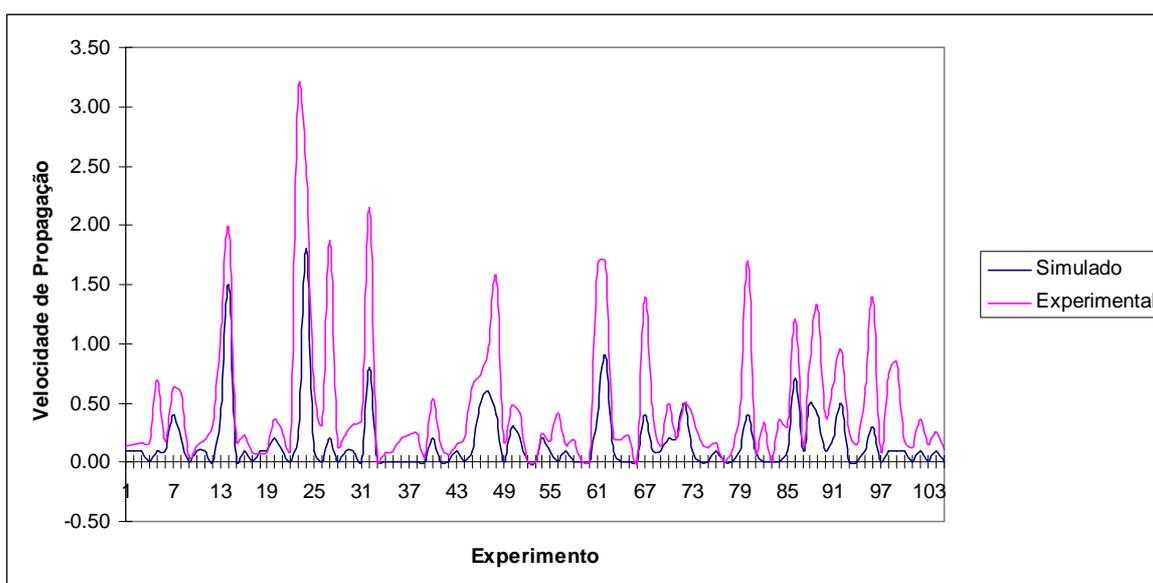


Figura 53 - Velocidade de propagação experimental e simulada para as 105 queimas laboratoriais.

Apesar de seus valores serem considerados diferentes de acordo com o teste ANOVA, ambos apresentaram uma alta correlação significativa ($r = 0,72$; $p < 0,0001$). Em função desta alta correlação, foi possível desenvolver uma equação de ajuste do modelo de Rothermel (1972) com base nos dados experimentais com um razoável coeficiente de determinação ($R^2 = 0,52$; $RMSE = 0,42$; $p < 0,0001$).

$$R_{exp} = 0,274 + 1,481 * R_{sim}$$

Onde:

R_{exp} = Velocidade de propagação do fogo experimental (m/min);

R_{sim} = Velocidade de propagação do fogo simulado no *BehavePlus* (m/min).

Entretanto, o modelo para a velocidade de propagação do fogo desenvolvido neste estudo obteve um melhor desempenho estatístico que o ajuste do modelo da velocidade de propagação do fogo de Rothermel (1972). Embora ambos os modelos sejam significativos, o primeiro obteve um $R^2 = 0,64$, enquanto o segundo $R^2 = 0,52$ (Figura 54).

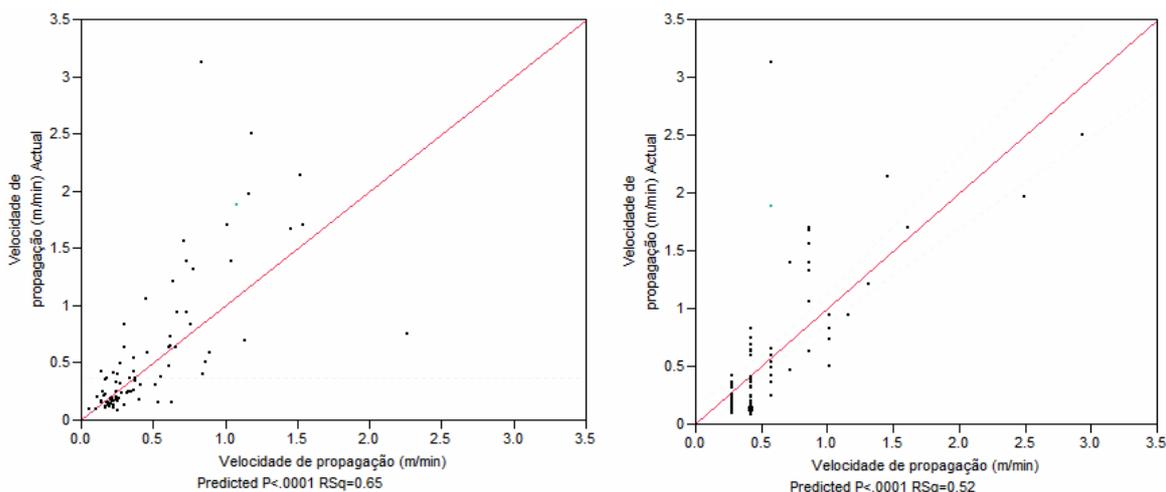


Figura 54 - Regressão linear entre a velocidade de propagação estimada pelo *BehavePlus* e estimada pelo modelo matemático desenvolvido neste estudo, versus a velocidade de propagação obtida durante as queimas laboratoriais.

7.3.2. Comprimento das chamas

O comprimento das chamas durante os experimentos foi em média 2,47 vezes maior do que o simulado. Através da análise da variância (ANOVA) observou-se que os resultados obtidos em laboratório foram diferentes estatisticamente ($\alpha = 0,05$) dos resultados simulados no *BehavePlus* ($F= 59,39$; $p < 0,0001$) (Figura 55).

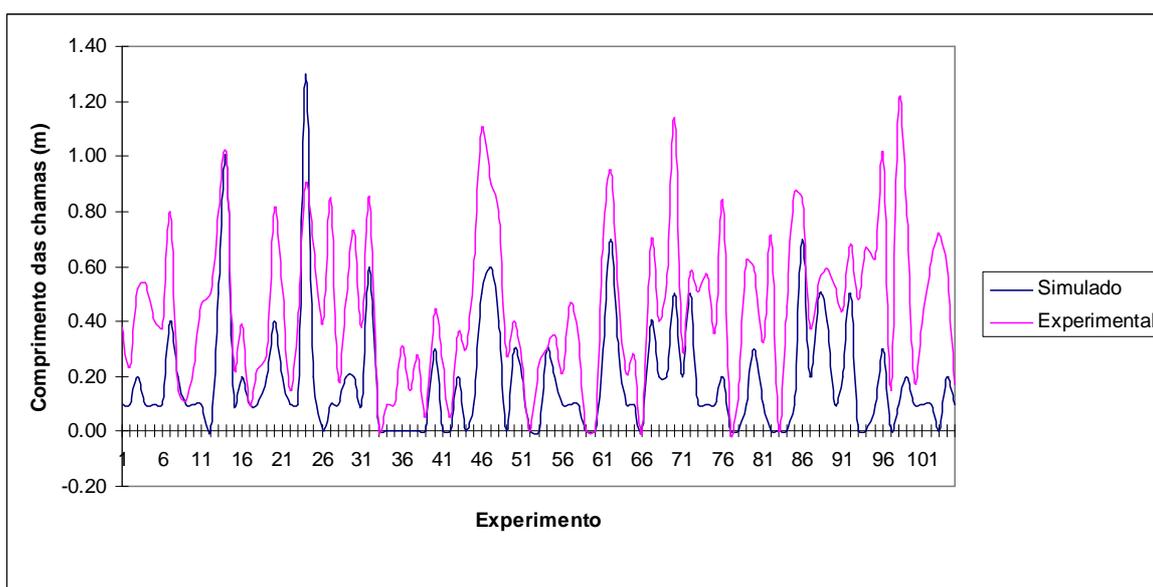


Figura 55 - Valores do comprimento das chamas, simulado pelo *BehavePlus* e obtidos através das queimas laboratoriais.

Assim como na velocidade de propagação, o comprimento das chamas experimental e simulado pelo *BehavePlus* apresentaram uma correlação significativa ($r = 0,60$; $p < 0,0001$). Um modelo matemático de ajuste dos dados simulados pelo *software* com base nos dados experimentais foi desenvolvido, entretanto seu coeficiente de determinação foi baixo ($R^2 = 0,36$; $RMSE = 0,22$; $p < 0,0001$).

$$Fl_{exp} = 0,341 + 0,739 * Fl_{sim}$$

Onde:

Fl_{exp} = Comprimento das chamas experimental (m);

F_{sim} = Comprimento das chamas simulado no *BehavePlus* (m).

Através da análise dos gráficos de regressão linear percebe-se, claramente, que o modelo original do comprimento das chamas desenvolvido neste trabalho foi mais eficiente que o ajuste do modelo ajustado de Byram (1959). Embora ambos sejam significativos, o primeiro obteve um $R^2 = 0,64$, enquanto o segundo $R^2 = 0,36$ (Figura 56).

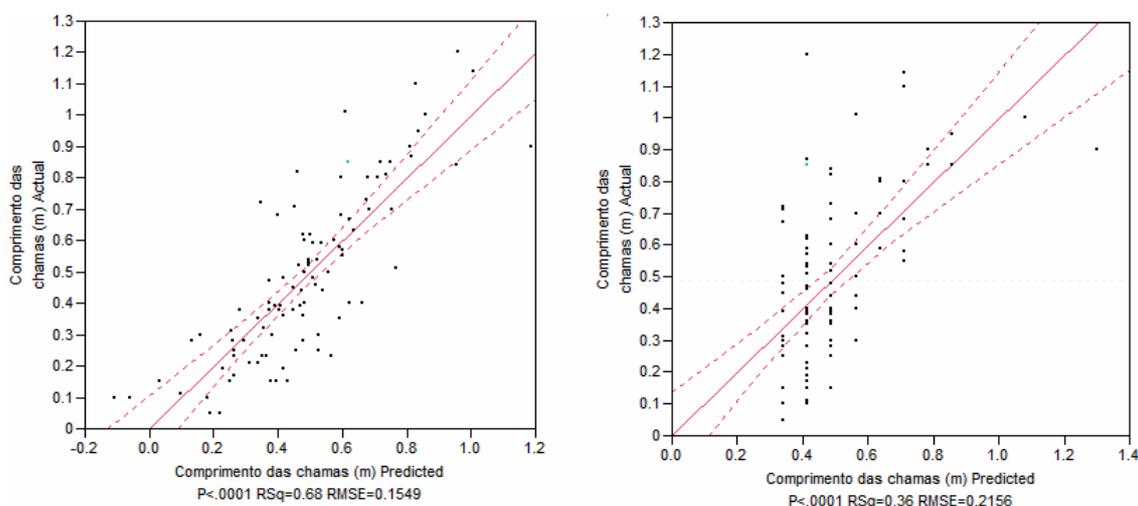


Figura 56 - Regressão linear entre o comprimento das chamas estimado pelo *BehavePlus* e estimada pelo modelo matemático desenvolvido neste estudo, versus o comprimento das chamas obtido durante as queimas laboratoriais.

7.3.3. Discussão sobre a simulação do comportamento do fogo utilizando o *BehavePlus*

Devido às dificuldades e problemas envolvendo a obtenção das variáveis de entrada do *BehavePlus* e do fato de ser um programa recente (primeira versão criada em 2002), não é muito comum encontrar na literatura trabalhos utilizando esta ferramenta. A grande maioria dos estudos são realizados em países como Estados Unidos, Portugal e algumas outras regiões da Europa ocidental, sendo muito pequena a quantidade de trabalhos realizados no Brasil (WHITE et al., 2013a).

De acordo com a metodologia empregada, os estudos podem ser classificados em de simulação ou, de simulação e validação. Estudos baseados apenas em simulações são mais simples e mais fáceis de serem realizados, entretanto, não concluem experimentalmente se os resultados obtidos são similares ou não aos incêndios reais. Já estudos de simulação e validação, como os realizados neste trabalho, são mais complexos de serem realizados e apresentam uma maior importância científica, já que, além de simular, provam experimentalmente se as simulações são ou não condizentes com a realidade (WHITE et al., 2013a).

Em Portugal, Fernandes (2002), por exemplo, realizou queimadas superficiais controladas em povoamentos de *Pinus pinaster* Ait. e comparou os resultados obtidos no campo com os resultados simulados pelo *BehavePlus*. Suas conclusões sugerem que o *software* gera previsões da velocidade de propagação do fogo imprecisas e pouco correlacionadas com as observações em campo, que, quase sempre, foram subavaliadas pelas simulações. Fernandes (2009), também em plantações de *Pinus pinaster* em Portugal, novamente obteve simulações da velocidade de propagação do fogo e da altura das chamas menores do que as observadas através de queimadas experimentais. A velocidade de propagação do fogo simulado chegou a ser 22% menor do que a observada, enquanto que o comprimento simulado das chamas chegou a ser 48% menor do que o valor observado experimentalmente.

Um outro importante experimento que comparou os dados simulados com os dados obtidos através de queimadas experimentais foi realizado por Stephens et al. (2008). Segundo os autores, os resultados da velocidade de propagação do fogo e do comprimento das chamas, em vegetações predominantemente arbustivas da espécie *Adenostoma fasciculatum*, no norte da Califórnia, também foram subavaliados pelo *BehavePlus*. As simulações da velocidade de propagação apresentaram valores entre 50% a 75% dos valores experimentais, enquanto que os valores do comprimento das chamas estiveram entre 27% a 73% dos valores obtidos durante os experimentos em campo.

Cruz e Fernandes (2008) realizaram o procedimento contrário, ou seja, a partir de queimadas experimentais em floresta de *Pinus pinaster* em Portugal, os autores desenvolveram um modelo customizado do material combustível, no qual as simulações geradas pelo *BehavePlus* correspondessem aos dados obtidos em campo. O modelo construído não representou necessariamente as características do material combustível

coletado na área de estudo. Os autores justificam que a construção de modelos customizados de liteira podem subestimar a velocidade de propagação do fogo em função, principalmente, da dificuldade que existe em quantificar a fração e a taxa de compactação da camada da liteira que está conduzindo o fogo, indicando com isso a necessidade da realização de queimadas experimentais.

Embora diversos estudos de simulação e validação tiveram seus resultados subavaliados, alguns outros encontraram resultados satisfatórios para simulações utilizando modelos matemáticos inseridos no sistema *Behave* e *BehavePlus*. Wagtendonk e Botti (1984), por exemplo, testaram o modelo de propagação de fogo de superfície de Rothermel (1972) em seis distintas vegetações no Parque Nacional de Yosemite, na Califórnia, Estados Unidos, e definiram que as simulações foram eficientes. Glitzenstein (2006) definiu, através de queimadas experimentais, que as simulações realizadas pelo *BehavePlus* previram corretamente incêndios de baixa intensidade e de baixa velocidade de propagação em oito parcelas localizadas na Floresta Nacional Francis Marion, no estado da Carolina do Sul, Estados Unidos. Resultados positivos do modelo de propagação do fogo de superfície de Rothermel (1972) também foram descritos por Hough e Albine (1978) (Tabela 21).

Tabela 21 - Descrição dos trabalhos de Simulação e Validação encontrados na literatura, que utilizaram o modelo de Byram (1959) e o de Rothermel (1972) integrado ao módulo "Superfície" no *BehavePlus* com o objetivo de modelagem do comportamento do fogo.

Local	Tipo de Vegetação	Finalidade do uso do <i>BehavePlus</i>	Simulações satisfatórias?	Referência
Sevivas, Portugal	<i>Pinus pinaster</i>	Verificar a eficiência das simulações do <i>BehavePlus</i> na modelagem do fogo superficial.	Não. Comprimento das chamas e velocidade de propagação subavaliadas.	Fernandes (2002)
Sevivas, Portugal	<i>Pinus pinaster</i>	Verificar a eficiência das simulações do <i>BehavePlus</i> na modelagem do fogo superficial.	Não. Comprimento das chamas e velocidade de propagação subavaliadas.	Fernandes (2009)
Califórnia, E.U.A.	<i>Adenostoma fasciculatum</i>	Comparar os dados obtidos em campo com as simulações do <i>BehavePlus</i> .	Não. Comprimento das chamas e velocidade de propagação subavaliadas.	Stephens et al. (2008)
Califórnia, E.U.A.	Seis distintas formações vegetais	Testar o modelo de propagação de Rothermel (1972) com dados de queimadas controladas	Sim. Pequenas diferenças na velocidade de propagação na ordem de 0,9 cm/min	Van Wagtendonk e Botti (1984)
Região Sul dos E.U.A.	<i>Serenoa repens</i> e <i>Ilex glabra</i>	Comparar os dados experimentais com as simulações utilizando o modelo de Rothermel (1972)	Sim. A discrepância não foi considerada grande o suficiente para desqualificar as simulações.	Hough e Albine (1978)
Carolina do Sul, E.U.A.	Vegetação de interface urbana - florestal.	Avaliar a eficiência do <i>BehavePlus</i> na simulação do comportamento do fogo.	Sim	Glitzenstein a et al. (2006)

Apesar do *BehavePlus* ser uma ferramenta comumente utilizada pelas pessoas responsáveis pelo manejo do fogo, principalmente nos Estados Unidos, está claro que o *software* é uma ferramenta auxiliar e que nem todas as decisões devem ser tomadas apenas com base em suas simulações, já que é comum encontrar trabalhos na literatura que reportam discrepâncias entre os dados simulados e os dados obtidos em campo. Neste

estudo em particular as diferenças observadas entre os dados simulados pelo programa e os dados obtidos experimentalmente são muito altas, sendo assim, não é recomendável o uso isolado do *BehavePlus* para simular o comportamento do fogo em liteira de eucalipto na área de estudo.

Ainda que seja possível obter resultados positivos ao simular os aspectos do comportamento do fogo, é necessário que o pesquisador tenha ciência de que durante um incêndio o material combustível e as condições climáticas são muito heterogêneas, e essa heterogeneidade irá interferir no comportamento do fogo. Dificilmente um incêndio terá as mesmas características que algum outro, sendo assim, é perfeitamente natural que exista uma grande diversidade de resultados positivos e negativos acerca do *BehavePlus* e, consequentemente, dos modelos matemáticos inseridos em sua base de dados.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através deste estudo foram definidos os parâmetros médios de caracterização do material combustível em povoamentos de eucalipto no litoral norte da Bahia, que apresentou carga média de 11,31 t/ha, sendo sua maior parte composto pelo material combustível da classe MS1 (8,03 t/ha); seguido pela classe MS2 (2,74 t/ha); Mherb (0,29 t/ha); MS3 (0,17 t/ha) e MVL (0,08 t/ha). A espessura do leito apresentou um valor médio de 5,67 cm o que resultou em uma densidade do leito média de 19,95 kg/m³, representando assim um material combustível pouco compacto.

As queimas da liteira de eucalipto foram de baixa intensidade. A velocidade de propagação do fogo em 97% dos experimentos foi classificada como lenta (velocidade inferior a 1,98 m/min), sendo a velocidade média de 0,46 m/min. O comprimento das chamas médio foi de 0,45 m e máximo de 1,2 m. A intensidade da linha do fogo média foi de 146,07 kW/m/s, sendo que em apenas 14,33% dos casos, foi superior ao limite máximo aceitável para danos em floretas comerciais de eucalipto (348 kW/m/s). O valor médio para a energia por unidade de área obtido durante as queimas laboratoriais foi de 16.198 kJ/m². Já com relação ao consumo do material combustível, 42,86% das queimas apresentaram consumo superior a 90%, o que representa um consumo alto para queimas controladas. O tempo de queima médio foi de 10,29 min.

Do total de 10 variáveis independentes analisadas, seis foram responsáveis, significativamente, por alguma alteração no comportamento do fogo e, conseqüentemente, utilizadas nos modelos, são elas: carga de material combustível da classe MS1, carga de material combustível da classe MS2, espessura do leito do material combustível, densidade do material combustível, umidade do material combustível da classe MS1 e velocidade do vento. As quatro variáveis independentes analisadas que não responderam significativamente pela mudança do comportamento do fogo avaliado e, portanto, não foram utilizadas nos modelos foram: carga total de material combustível (MS1 + MS2), umidade do material combustível da classe MS2, temperatura do ar e umidade relativa do ar.

Ao total sete modelos de previsão do comportamento do fogo foram desenvolvidos:

- Um modelo para a velocidade de propagação do fogo:

$$R = e^{(-0,385 - 0,016 * Bd - 0,048 * Mms1 + 0,172 * U)} \quad (R^2 = 0,65; \text{RMSE} = 0,55; p < 0,0001)$$

- Dois modelos para o comprimento das chamas:

$$Fl = 0,428 + 7,397 * Fbd - 0,019 * Mms1 + 0,027 * U \quad (R^2 = 0,68; \text{RMSE} = 0,15; p < 0,0001)$$

$$Fl = 0,202 + 0,024 * \sqrt{I_B} + 3,63 * Fbd - 0,006 * Mms1 \quad (R^2 = 0,79; \text{RMSE} = 0,13; p < 0,0001)$$

- Dois modelos para o consumo do material combustível

$$Fc = 127,173 + 3,269 * Wms1 - 0,603 * Bd - 3,651 * Mms1 \quad (R^2 = 0,68, \text{RMSE} = 19,65; p < 0,0001)$$

$$Fc = 71,9 + 0,38 * \sqrt{HA} - 0,439 * Bd - 1,838 * Mms1 \quad (R^2 = 0,82; \text{RMSE} = 14,82; p < 0,0001)$$

- Dois modelos para o tempo de queima

$$Tq = 8,189 + 0,598 * Wms2 + 0,067 * Bd - 0,523 * U \quad (R^2 = 0,58; \text{RMSE} = 3,15; p < 0,0001)$$

$$Tq = 0,921 + 0,377 * Wms2 + 0,013 * I_B - 5,958 * Ln(R) \quad (R^2 = 0,81; \text{RMSE} = 2,08; p < 0,0001)$$

Para facilitar o uso dos respectivos modelos, inclusive para pessoas com pouco conhecimento matemático, foi desenvolvido o software Eucalyptus Fire Safty System ®. Para solicitar uma versão, basta entrar em contato através do e-mail: benjmk@hotmail.com.

As simulações utilizando o programa *BehavePlus* demonstraram uma grande discrepância entre os dados obtidos experimentalmente e os dados simulados. A velocidade de propagação do fogo foi em média 2,89 vezes maior e o comprimento das chamas também foi em média 2,47 vezes maior nos experimentos laboratoriais. Os modelos de ajuste da velocidade de propagação ($R^2 = 0,52$; $\text{RMSE} = 0,26$; $p < 0,0001$) e do comprimento das chamas ($R^2 = 0,36$; $\text{RMSE} = 0,22$; $p < 0,0001$) apresentaram uma baixa eficiência estatística. Sendo assim, não é recomendável a utilização do respectivo programa para realizar simulações envolvendo o comportamento do fogo em liteira de eucalipto na área de estudo.

Apesar dos modelos de previsão do comportamento do fogo desenvolvidos neste trabalho serem altamente significativos e apresentarem um razoável coeficiente de determinação (quando comparado a demais trabalhos envolvendo a modelagem do comportamento do fogo), futuros estudos de aplicação em campo são necessários a fim de que os respectivos modelos possam ser utilizados com segurança e ajustes sejam realizados caso necessário. Maior cautela é necessária ao aplicá-los em áreas com inclinação de relevo já que os mesmos foram desenvolvidos para áreas planas, sendo necessária aplicação de equações ajustes nestas situações. Futuros estudos também são necessários para verificar a sua aplicabilidade e eficiência em demais regiões do Brasil que apresentam povoamentos comerciais de eucalipto.

Por fim, ressalta-se que o uso operacional dos modelos matemáticos de previsão do comportamento do fogo, não apenas os desenvolvidos neste trabalho, mas todos eles, deve ser realizado com cuidado e apenas por pessoas experientes no manejo do fogo. Como os incêndios florestais são fenômenos altamente variáveis e dependentes de condições meteorológicas, também altamente variáveis, ele pode mudar suas características em questão de instantes. É essencial que quem esteja coordenando as atividades de combate saiba agir em função das mudanças que possam ocorrer. Mudanças bruscas na velocidade e sentido do vento, por exemplo, podem ser bastante perigosas e são as principais causas de morte de bombeiros durante operações de combate ao fogo. O máximo de cuidado e precaução é essencial já que existem vidas humanas em jogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**: ano base 2011. Brasília, 2012. 24 p.

ALBINI, F. A. **Computer-based models of wildland fire behavior**: a user's manual. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1976a. 68 p.

ALBINI, F. A. **Estimating wildfire behavior and effects**. USDA Forest service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1976b. 92 p. (General Technical Report).

ALEXANDER, M. E. **Proposed revision of fire danger class criteria for forest and rural areas in New Zealand**. NRFA/NZFRI, Circular 1994/2, Wellington, 1994.

ALEXANDER, M. E. **Fire behaviour as a factor in forest and rural fire suppression**. Forest Research, Rotorua, in association with the National Rural Fire Authority, Wellington, 2000, 30 p. (Forest Research Bulletin N°. 197, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series Report N°. 5).

ALEXANDER, M. E.; CRUZ, M. G. Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 36, p. 3015 - 3028, 2006.

ALMEIDA, F. C. P. D; SOUTO P. C.; JÚNIOR J. E. V. C.; S.; ARAÚJO I, E. L. D ; SOUTO J. S. Avaliação da queima controlada de material combustível superficial coletado em povoamentos florestais e fragmento de mata atlântica. In: II CONGRESSO NORDESTINO DE ENGENHARIA FLORESTAL. **Anais...** Campina Grande, 2009.

ALMEIDA, R. M. **Modelo de propagação do fogo em incêndios de superfície baseado no Método Nodal**. 2008, 112 f. Dissertação (Pós-Graduação em Computação Aplicada) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

ANDRÉ, J. C. S.; VIEGAS, D. X. Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores Parte II: Modelos Globais e Sistemas Informáticos. **Silva Lusitana**, v.10, n. 2, p. 217–233, 2002.

ANDREWS, P. L. **BEHAVE**: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. USDA Forest Service, Ogden, 1986. 110 p. (General Technical Report INT-194).

ANDREWS, P. L. **BehavePlus fire modeling system, version 4.0**: Variables. USDA Forest Service, Ogden, 2008. 108 p. (General Technical Report RMRS-GTR-213WWW)

ANDREWS, P. L. **BehavePlus fire modeling system, version 5.0**: Variables. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, 2009. 124 p. (General Technical Report RMRS-GTR-213WWW Revised)

ANDREWS, P. L. Do you Behave? - Application of the BehavePlus Fire Modeling System. In: 3rd Fire Behavior and Fuels Conference. **Proceedings...** Spokane, 2010. 17 p.

ANDREWS, P. L.; QUEEN, L. P. Fire modeling and information system technology. **International Journal of Wildland Fire**, v. 10, p. 343-352, 2001.

ANDREWS, P. L.; BEVINS, C. D.; SELI, R. C. **BehavePlus Fire Modeling System Version 2.0 User's Guide**. USDA Forest Service, Ogden, 2003. 133 p. (General Technical Report RMRS-GTR-106WWW).

ANDREWS, P. L.; BEVINS, C. D.; SELI, R. C. **BehavePlus fire modeling system, version 4.0**: User's Guide. Ogden: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005. 132 p. (General Technical Report RMRS-GTR-106WWW Revised).

BARRETT, T. M.; JONES, J. G.; WAKIMOTO, E. R. H. Forest service spatial information use for planning prescribed fires. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 15, n. 4, p. 1-8, 2000.

BARTH, A.; OLIVEIRA, E. P.; GUSE, J. C; FREITAS, L. A. R. Custos na produção de eucalipto em um propriedade rural no município de Boa Vista do Buricá - RS. In: VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. **Anais...** Rio de Janeiro, 2012. 21 p.

BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: Imprensa Universitária - UFRPE, 1990. 115p.

BATISTA, A. C. **Determinação de Umidade do Material Combustível sob Povoamentos de *Pinus taeda***. 1984, 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1984.

BATISTA, A. C. **Avaliação da queima controlada em povoamentos de *Pinus taeda* L. no norte do Paraná**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995. 180 p.

BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Avaliação do comportamento do fogo em queimas controladas sob povoamento de *Pinus taeda* no norte do Paraná. **Revista Floresta**, v. 25, n. 12, p. 31-42, 1995.

BATISTA, A. C.; LIMA, G. S.; SOARES, R. V. Altura de carbonização da casca das árvores como estimador da intensidade do fogo em queima controlada. In: VII Congresso florestal Brasileiro e I Congresso Florestal Panamericano. **Anais...** Curitiba: SBS-SBEF, p. 169-171, 1993.

BEADLE, N. C. W. Soil temperatures during forest fires and their effect on the survival of vegetation. **Journal of Ecology**, v.28, p. 180-192, 1940.

BEUTLING, A. **Caracterização para modelagem de material combustível superficial em reflorestamento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

BEUTLING, A. **Modelagem do Comportamento do Fogo com Base em Experimentos Laboratoriais e de Campo.** 2009, 121 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2009.

BIDWELL, T. G.; ENGLE, D. M. Behavior of headfires and backfires on tallgrass prairie. In: International Symposium fire and environment: Ecological and cultural perspectives. **Proceedings...** Asheville: USDA Forest Service, p. 344-350, 1991.

BOTELHO, H. S.; VENTURA, J. Modelos de comportamento do fogo. In: REGO, F. C.; BOTELHO, H. S. (Eds.) **A técnica do fogo controlado.** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, p. 49-55, 1990.

BOTELHO, H. S.; VEGA, J. A.; FERNANDES, P. M.; REGO, F. M. C. Prescribed fire behavior and fuel consumption in northern Portugal and Galiza Maritime Pine stands. In: II International Conference in Forest Fire Research. **Proceedings...** Coimbra, p. 343-353, 1994.

BOTELHO, H. S.; REGO, F. C.; RYAN, E. K. C. Tree mortality models for *Pinus pinaster* of Northern Portugal. In: XIII Conference on Fire and Forest Meteorology, IAWF. **Proceedings...** p. 235-240, 1998.

BROCKERHOFF, E. G.; JACTEL, H.; PARROTTA, J. A.; FERRAZ, S. F. B. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystems services. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 43-50, 2012.

BROWN, A. A.; DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. New York, McGraw-Hill, 2^o Ed., 1973. 686 p.

BROWN, J. K. Ratios of surface area to volume for common fine fuels. **Forest Science**, v. 16, n. 1, p. 101-105, 1970.

BROWN, J. K.; OBERHEU, R. D.; JOHNSTON, C. M. **Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West**. USDA Forest Service, 1981. 48 p. (General Technical Report INT-129).

BROWN, J. K.; MARSDEN, M. A.; RYAN, K. C.; REINHARDT, E. D. **Micting Duff and Woody Fuel Consumed by Prescribed Fire in the Northern Rocky Mountains**. USDA Forest Service, 1985. (Research Paper INT-337).

BROWN, J. K.; REINHARDT, E. D.; FISCHER, W. C. Predicting duff and woody fuel consumption in northern Idaho prescribed fires. **Forest Science**, v. 37, n. 6, p. 1550-1566, 1991.

BURGAN, R. E. **Concepts and interpreted examples in advanced fuel modeling.** Ogden: USDA Forest Service, 1987. (General technical report GTR-INT, 238).

BURGAN, R. E.; ROTHERMEL, R. C. **BEHAVE:** fire behavior prediction and fuel modeling system – fuel subsystem. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1984. 126 p.

BURROWS, N. D. Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. **International Journal of Wildland fire**, v. 10, p. 137-143, 2001.

BURROWS, N. D.; WOODS, Y.; WARD, B.,; ROBINSON, A. Prescribing low intensity fire to kill wildings in *Pinus radiata* plantations in Western Australia. **Australian Forestry**, v. 52, n. 1, p. 45-52, 1989.

BYRAM, G. M. Combustion of Forest Fuels. In: Davis, K. P. (ed.) **Forest Fire: Control and Use**, McGraw-Hill. New York, p. 61-89, 1959.

BYRAM, G. B. **An analysis of the drying process in forest fuel material.** USDA Forest Service, Southern Forest Fire Laboratory, Macon, 1963. (Unpublished report).

CATCHPOLE, E. A.; CATCHPOLE, W. R.; VINEY, N. R.; MCCAWE, W. L.; MARSDEN-SMEDLEY, J. B. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. **International Journal of Wildland Fire**, v. 10, p. 215-222, 2001.

CERAPIÁ, V. R. **Predição do Índice de Risco de Incêndio e modelagem computacional do comportamento do avanço da frente do fogo no Parque Nacional da Floresta da Tijuca.** 2006. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CERTANI, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. **Oecologia**, v. 143, p. 1-10, 2005.

CHENEY, N. P. Predicting fire behavior with fire danger tables. **Australian Forestry**, v. 32, n. 2, p. 71-79, 1968.

CHENEY, N. P. Fire Behavior. In: GILL, A. M.; GROVES, R. H.; NOBLE, I. R. (Eds.) **Fire and the Australian biota**. Aust. Acad. Science, Canberra, p. 151-175, 1981.

COMMON, I. F. B. **Moths of Australia**. Melbourne University Press, Carlton, 1990. 535 p.

COMMON, I. F. B. **Oecophorine genera of Australia I: The Wingia Group**. Monographs in Australian Lepidoptera 3; CSIRO Publications, Melbourne, 1994, 390 p.

COUTINHO, L. M. Efeitos ecológicos do fogo no cerrado. In: SOARES, R. V. (Ed.) IV reunião técnica conjunta FUPEF/SIF/IPEF e II curso de atualização em controle de incêndios florestais. **Anais...** Curitiba: FUPEF/DSM-SCA-UFPR, p. 57-61, 1996.

CRUZ, M. G.; ALEXANDER, M. E. Assessing crown fire potential in coniferous forest of western North America: a critique of current approaches and recent simulation studies. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, p. 377-398, 2010.

CRUZ, M. G.; FERNANDES, P. M. Development of fuel models for fire behavior prediction in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands. **International Journal of Wildland Fire**, v.17, p. 194-204, 2008.

DAVIS, K. P. **Forest Fire: Control and Use**. McGraw-Hill. New York, 1959. 584p.

DE RONDE, C.; GOLDAMMER, J. G.; WADE, D. D.; SOARES, R. V. Prescribed fire in industrial plantations. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.) **Fire in the tropical biota - Ecosystem Processes and Global Challenges**. Berlin, Springer-Verlag, p. 216-272, 1990. (Ecological Studies, v.84).

DEBANO, L. F.; NEARY, D. G.; FFOLLIOTT, P. F. **Fire's Effects on Ecosystems**. New York: John Wiley & Sons, 1998, 335 p.

DEEMING, J. E.; BURGAN, R. E.; COHEN, J. D. **The National Fire-Danger Rating System--1978**. Washington: USDA Forest Service, 1977. (General Technical Report INT-39).

DOUROJEAMI, M. **O Eucalipto não é vilão**. 2009. Disponível em: <<http://agrosoft.com/pdf.php/?node=211362>>. Acesso em: 13 de Julho de 2010.

DUPUY, J. L.; MARÉCHAL, J.; PORTIER, D.; VALETTE, J. C. The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour. **International Journal of Wildland Fire**, v. 20, n. 2, p. 272-288, 2011.

EVANS, J. **Plantation Forestry in the Tropics**. Oxford University Press, Oxford, 1992, 403 p.

FERNANDES, P. A. M. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 144, p. 67-74, 2001.

FERNANDES, P. A. M. **Desenvolvimento de relações preditivas para uso no planeamento de fogo controlado em povoamentos de *Pinus pinaster* Ait.** 2002. 285 f.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Ciências Florestais) Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2002.

FERNANDES, P. A. M. "**Eucaliptização**" e vulnerabilidade aos incêndios. 2006. Disponível em: <http://ambio.blogspot.com.br/2006/01/eucaliptizacao-e-vulnerabilidade-aos.html>. Acesso em 05 Jan. 2013.

FERNANDES, P. A. M. Sivicultura Preventiva e Gestão de Combustíveis: Opções e Optimização. In: PEREIRA, J. S. et al. (Eds.). **Incêndios Florestais em Portugal - Caracterização, Impactes e Prevenção**. ISAPress, Lisboa, p. 327-354, 2007.

FERNANDES, P. A. M. Examining fuel treatment longevity through experimental and simulated surface fire behaviour: a maritime pine case study. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, p. 2529-2535, 2009.

FERNANDES, P. A. M.; LOUREIRO, C. Fine fuels consumption and CO₂ emissions from surface fire experiments in maritime pine stands in northern Portugal. **Forest Ecology and Management**, v. 291, p. 344-356, 2013.

FERNANDES P. A. M.; LOUREIRO, C.; PALHEIRO, P.; VALE-GONÇALVES, H.; FERNANDES, M. M.; CRUZ, M. G. Fuels and fire hazard in blue gum (*Eucalyptus globulus*) stands in Portugal. **Boletín del CIDEU**, v. 10, p. 53-61, 2011.

FERRER, E, P. **Contribució A L'estudi Dels Efectes Dels Retardants Em L'extinció D'incêndis Forestals**. 2004. 304 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunha, Espanha, 2004.

FINNEY, M. A. **FARSITE**: fire area simulator - model development and evaluation. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, 2004. 47 p. (Research Paper RMRS-RP-4 Revised).

FINNEY, M. A. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Fuels management - how to measure success. **Proceedings...** USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Portland, Oregon, 2006. p. 213-220.

FONS, W. L. Analysis of fire spread in light forest fuels. **Journal of Agricultural Research**, v. 72, n. 3, p. 93-121, 1946.

GABRIEL, V. A.; VASCONCELOS, A. A.; LIMA, E. F.; CASSOLA, H.; BARRETTO, K. D.; BRITO, M. C. A importância das plantações de eucalipto na conservação da biodiversidade. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 202-213, 2013.

GILL, A. M. **How fires affect biodiversity**. Center for Plant Biodiversity Research. 2002. Disponível em: <http://www.anbg.gov.au/fire_ecology/fire-and-biodiversity.html#INT>. Acesso em: 2 de Novembro de 2007.

GLITZENSTEIN, J. S. Fuels and fire behavior in chipped and unchipped plots: Implications for land management near the wildland/urban interface. **Forest Ecology and Management**, v. 236, n.1, p. 18-29, 2006.

GOLDAMMER, J. G. Controlled burning for stabilizing pine plantations. In: Seminar of Forest Fire Prevention and Control. **Proceedings...** Nijhoff/Junk, The Hague, p. 199-207, 1982.

GOMES, A. do N.; SOUZA, A. L. de; COELHO, F. M. G.; SILVA, M. L. da. Sustentabilidade de empresas de base florestal: o papel dos projetos sociais na inclusão das comunidades locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 951-960, 2006.

GOULD, J. S. Evaluation of McArthur's control burning guide in regrowth *Eucalyptus sieberi* forest. **Australian Forestry**, v. 57, n. 2, p. 86-93, 1994.

GOULD, J. S.; MCCAWE, W. L.; CHENEY, N. P.; ELLIS, P. F.; KNIGHT, I. K.; SULLIVAN, A. L. **Project Vesta-Fire in Dry Eucalypt Forest: Fuel Structure, Fuel Dynamics and Fire Behaviour**. Ensis-CSIRO, Canberra ACT, and Department of Environment and Conservation. Perth, WA, 2007, 218 p.

GRABNER, K.; DWYER, J.; CUTTER, B. Validation of Behave Fire Behavior Predictions in Oak Savannas using five fuel models. In: PALLARDY, S. G.; CECICH, R. A.; GARRETT, E. H.; JOHNSON, P. S. (Eds). XI Central Hardwood Forest Conference. **Proceedings...** USDA Forest Service, Columbia, p. 202-215, 1997. (General Technical Report NC-188).

GREENOUGH, J. A. **Fuel characteristic classification system design**. Corvallis, Corvallis Forestry Sciences Lab, 2001. 48p.

HARRINGTON, M. **Predicting Reduction of Natural Fuels by Prescribed Burning Under Ponderosa Pine in Southeastern Arizona**. USDA Forest Service, 1987. (Res. Note RM-472).

HECKERT, P. A. **Temperature and Heat Content Random Molecular Kinetic Energy and Total Thermal Energy**. 2008. Disponível em: http://physics.suite101.com/article.cfm/temperature_and_heat_content#ixzz0Ct9Jo7M7&B. Acesso em: 16 de abril de 2009.

HÉLY, C.; DOWTY, P. R.; ALLEAUME, S.; CAYLOR, K. K.; KORONTZI, S.; SWAP, R. J.; SHUGART, H. H.; JUSTICE, C. O. Regional fuel load for two climatically contrasting years in southern Africa. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, 2003. 17 p.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 31 p. (Documento 54).

HOUGH, W. A.; ALBINI, F. A. **Predicting Fire Behavior in Palmetto-Gallberry Fuel Complexes**. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, 1978. 44 p.

JOHNSON, V. J. The dilemma of flame length and intensity. **Fire management notes**, Washington, v. 43, n. 4, p. 3-7, 1982.

KING, A. R.; LINTON, M. Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate changes. **Australian Journal of Applied Science**, v. 14, n. 1, p. 38-49, 1963.

LORO, L. V.; HIRAMATSU, N. A. Comportamento do fogo, em condições de laboratório, em combustíveis provenientes de um povoamento de (*Pinus elliottii* L.). **Revista Floresta**, v. 34, p. 127-130, 2004.

MAIN, W. A.; PAANANEN, D. M.; BURGAN, R. E. **Fire Family Plus**. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, St. Paul, 1990. (General Technical Report, NC-138).

MARTIN, R. E.; COOPER, R. W.; CROW, A. B.; CUMING, J. A.; PHILLIPS, C. B. Report of task force on prescribed burning. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 75, n. 5, p. 297-301, 1977.

MATTHEWS, S. Effect of drying temperature on fuel moisture content measurements. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, p. 800-802, 2010.

McARTHUR, A. G. **Control burning in eucalypt forest**. Canberra: Commonwealth of Australia Forestry and Timber Bureau, v. 80, 1962. 31 p.

McARTHUR, A. G. **Fire behaviour in eucalypt forests**. Forestry and Timber Bureau, v. 107, 1967.

MENDES-LOPES, J. M. C.; VENTURA, J. M. P.; AMARAL, J. M. P. Flame characteristics, temperature-time curves, and rate of spread in fires propagating in a bed of *Pinus pinaster* needles. **International Journal of Wildland Fire**, v. 12, p. 67-84, 2003.

NAVES, M. A. Efeito do fogo na população de formigas (Hymenoptera: Formicidae) em cerrado do Distrito Federal. In: MIRANDA, H. S.; SAITO, C. H.; DIAS, B. F. S. (Eds). **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Unb, Brasília, p. 170-177, 1996.

NELSON JR., R. M. A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. **Canadian Journal of Forest Research**, v.14, n. 4, p. 597-600, 1984.

NILTON, C. F.; MERLO, D. A.; MEDEIROS, M. B. de. Ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, Goiás. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 153-161, 2006.

PAYRET, C. C. **Dinâmica de la matteria orgânica y de algunos parâmetros fisicoquímicos em molisoles, en la conversión de uma pradera a cultivo florestal em la región de Piedras Coloradas-Algorta (Uruguay).** 2007. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências Agronômicas) Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

PÊCH, G. Y. **The association between atmospheric humidity and fuel moisture.** Minister of Forestry and Rural Development. Forest Branch, Departamental Publication nº 1230, 1968. 18 p.

PYNE J. S. **Wildland fire – Fire management in the United States.** New York: Wiley & Sons, 1984. 769 p.

PYNE, S. J.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire.** 2º ed, John Wiley & Sons, New York, 1996.

REGO, F. C.; BOTELHO, H. S. **A técnica do fogo controlado.** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1990. 124 p.

REINER, A. L.; et al. Mastication and prescribed fire impacts on fuel in a 25-year old ponderosa pine plantation, southern Sierra Nevada. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2365-2372, 2009.

REINHARDT, E.; KEANE, B. FOFEM: The First-Order Fire Effects Model Adapts to the 21st Century. **Forest Science Brief**, v. 62, p. 1-6, 2009.

RIBEIRO, G. A. **Estudo do comportamento do fogo e de alguns efeitos da queima controlada em povoamentos de *Eucalyptus viminalis* Labill em Três Barras, Santa**

Catarina. 1997. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

RIBEIRO, G. A. A queima controlada no manejo da terra. In: SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; NUNES, J. R. S. (Eds.) **Incêndios florestais no Brasil: o estado da arte**. Curitiba, p. 1-20, 2009.

RIBEIRO, G. A.; SOARES, R. V. Caracterização do material combustível superficial e efeitos da queima controlada sobre sua redução em um povoamento de *Eucalyptus viminalis*. **Revista Cerne**, Lavras, v.4, n.1, p. 58-72, 1998.

RIBEIRO, G.A.; BONFIM, V.R. Incêndio Florestal versus queima controlada. **Ação Ambiental**, Viçosa, v. 2, n. 12, p. 8-11, 2000.

RIBEIRO, T. O. **Quantificação do material combustível superficial em unidade de conservação no semiárido da Paraíba**. 2010, 48 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2010.

RODERICK, M. L.; BERRY, S. L.; NOBLE, I. R. A framework for understanding the relationship between environment and vegetation based on the surface area to volume ratio of leaves. **Functional Ecology**, v. 14, p. 423-437, 2000.

RODIGHERI, H. R. **Vantagens Ecológicas e Econômicas de Reflorestamentos em Propriedades Rurais no Sul do Brasil**. 1996. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/i_en/mesa5/4.pdf>. Acesso em 28 de Outubro de 2011.

ROTHERMEL, R. C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1972. 40 p. (Research Paper INT-115).

ROTHERMEL, R. C. **How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires**. National Wildfire Coordinating Group, 1983. 166 p.

ROTHERMEL, R. C. **Predicting behaviour and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains**. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1991. 46 p. (Research Paper INT-438).

ROTHERMEL, R. C.; DEEMING, J. E. **Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects**. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1980. 9 p. (General Technical Report INT-93).

ROUSSOPOULOS, P. J.; JOHNSON, V. J. **Help in making fuel management decisions**. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Minnesota, 1975. 16 p.

SANTOS, J. F.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Perfil dos Incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 93-100, 2006.

SANTOS, J. F. **Estatísticas de incêndios florestais em áreas protegidas no período de 1998 a 2002**. 2004. 94 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SCHROEDER, M. J.; BUCK, C. C. **Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations**. USDA Forest Service, Agriculture Handbook 360, 1970. 229 p.

SCOTT, J. H. **Introduction to Wildfire Behavior Modeling**. USDA Forest Service, National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer, 2012. 149 p.

SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E. **Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model**. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, 2005. 72 p. (General Technical Report RMRS-GTR-153).

SETZER A. W.; SISMANOGLU R. A. **Risco de Fogo – Resumo do Método de Calculo**. DSA / CPTEC / INPE. Versão 5, 2006.

SILVA, M. D. Os cultivos florestais do Pampa, no Sul do Rio Grande do Sul: Desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. **Revista Floresta**, v. 42, n. 1, p. 215-226, 2012.

SIMARD, A. J.; MAIN, W. A. Comparing methods of predicting jack pine slash moisture. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 12, n. 4, p. 793-802, 1982.

SMITH, C. F. **A flora of the Santa Barbara region, California**. Santa Barbara Museum of Natural History. Santa Barbara, Calif, 1976.

SMITH, R.; LAMONT, D. **Kimberley Bush Fire Burning Guidelines and Firebreak Location, Construction and Maintenance Guidelines**. Fire & Emergency Services Authority of Western Australia, Perth, 2007. 56 p.

SOARES, R. V. Determinação da quantidade de material combustível acumulado em plantios de *Pinus* spp na região de Sacramento (MG). **Revista Floresta**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 48-62, 1979.

SOARES, R. V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF, 1985. 213 p.

SOARES, R. V. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1984 a 1987. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 1-2, p. 94-121, 1988.

SOARES, R. V. Estatística dos incêndios florestais no Brasil. In: SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; NUNES, J. R. S. (Eds.) **Incêndios florestais no Brasil: o estado da arte**. Curitiba, p. 1-20, 2009.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Meteorologia e Climatologia Florestal**. Curitiba, 2004. 195 p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba, 2007. 264 p.

SOARES, R. V.; CORDEIRO, L. Análise das causas e épocas de ocorrência de incêndios florestais na região centro-paranaense. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 46-56, 1974.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Dados estatísticos sobre a produção nacional de eucalipto**. Sociedade Brasileira de Silvicultura. 2004. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/secure/estatisticas.htm>>. Acesso em: 20 de Abril de 2009.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. **Fatos e números do Brasil Florestal**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2008. 93p.

SOUZA, L. J. B.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Modelagem do material combustível superficial em povoamentos de *Eucalyptus dunnii*, em Três Barras, SC. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 231-245, 2003.

STANGERLIN, D. M.; HENNERICH, M.; GOMES, F. A.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; GATTO, D. A. Quantificação do material combustível acumulado na serrapilheira de uma floresta de *Eucalyptus grandis*. In: 16 CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. **Anais...** Santa Maria: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, 2007.

STEPHENS, S. L.; WEISE, D. R.; FRY, D. L.; KEIFFER, R. J.; DAWSON, J.; KOO, E.; POTTS, J.; PAGNI, P. J. Measuring the Rate of Spread of Chaparral Prescribed Fires in Northern California. **Fire Ecology**, v. 4, n. 1, p. 74-86, 2008.

STOCKS, B. J. Fire behavior in mature jack pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 19, p. 783-790, 1989.

STOCKS, B. J. ALEXANDER, M. E.; WOTTON, B. M.; STEFNER, C. N.; FLANNIGAN, M. D.; TAYLOR, S. W.; LAVOIE, N.; MASON, J. A.; HARTLEY, G. R.; MAFFEY, M. E.; DALRYMPLE, G. N.; BLAKE, T. W.; CRUZ, M. G.; LANOVILLE, R. A. Crown fire behaviour in a northern jack pine – black spruce forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 1548-1560, 2004.

SWENGEL, A. B. A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat. **Biodiversity and Conservation**, v. 10, n. 1, p. 1141-1169, 2001.

THOMAS, P. H. The size of flames from natural fires. **Symposium (International) on Combustion**, v. 9, n. 1, p. 844-859, 1963.

TROLLOPE, W. S. W.; TROLLOPE L. A.; HARTNETT, D. C. Fire behaviour a key factor in the fire ecology of African grasslands and savannas. In: VIEGAS, D. X. (Ed.). **Forest Fire Research & Wildland Fire Safety**. Millpress, Rotterdam. 2002. 15 p.

TOLHURST, K. G.; CHENEY, N. P. **Synopsis of the Knowledge Used in Prescribed Burning in Victoria**. Department of Natural Resources and Environment, East Melbourne, Australia, 1999, 97 p.

TOZZINI, D. S.; SOARES, R. V. Relações entre comportamento do fogo e danos causados a um povoamento de Pinus taeda. **Revista Floresta**, Curitiba, v.15, n. 1-2, p. 9-13, 1987.

VAN WAGNER, C. E. Conditions for the start and spread of crown fires. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 7, p. 23-34, 1977.

VAN WAGNER, C. E. **Effect of slope on fire spread rate**. Canadian Forest Service, p. 7-8, 1977b. (Bi-Mon. Research Notes 33).

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.

VIEGAS, D. X. Wind and topography effects on fire behaviour. In: EFTICHIDIS, G.; BALABANIS, P.; E GHAZI, A. (Eds.). **Wildfire Management, Proc. Advanced Study Course**, Algosystems S.A., Athens, p. 125-141, 1999.

VEGA, J. A. Investigación sobre control de incendios em Espanha. In: SOARES, R. V. (Ed.) IV reunião técnica conjunta FUPEF/SIF/IPEF e II curso de atualização em controle de incêndios florestais. **Anais...** Curitiba: FUPEF/DSM-SCA-UFPR, 1996.

VOGEL, S. **Life's Devices: The Physical World of Animals and Plants.** Princeton University Press, Princeton, 1988. 370 p.

WAGTENDONK, J. W. V. **Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments Sierra Nevada Ecosystem.** University of California, Centers for Water and Wildland Resources, 1996. 12 p.

WAGTENDONK, J. W. V.; BOTTI, S. J. Modeling Behavior of Prescribed Fires in Yosemite National Park. **Journal of Forestry**, v. 82, n.6, p. 479-484, 1984.

WALTERS, G. A. **Saligna *Eucalyptus* growth in a 15-year old spacing study in Hawaii.** USDA Forest Service, Berkeley, California, 1980. 12 p. (Research Paper: PSW-151).

WELLS, C. G. Effects of prescribed burning on soil chemical properties and nutrient availability. In: Prescribed Burning Symposium. **Proceedings...** USDA Forest Service, Charleston, South Carolina, p. 86-97, 1971.

WELLS, C. G. The Rothermel Fire-Spread Model: Still Running Like a Champ. **Fire Science Digest**, v. 2, p. 1-12, 2008.

WHELAN, R. J. **The Ecology of Fire.** Cambridge University Press, 1998. 346 p.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, A. S. Análise da precipitação e sua influência na ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional Serra de Itabaiana, Sergipe, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 6, n. 1, p. 148-156, 2011.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. O uso do BehavePlus como ferramenta para modelagem do comportamento e efeito do fogo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 73, p. 73-83, 2013a.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, A. S.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Building fuel models and simulating their surface fire behavior in the “Serra de Itabaiana” National Park, Sergipe, Brazil. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 27-38, 2013b.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Efeito do fogo na população de artrópodes e seu uso como bioindicadores para conservação ambiental. In: SOUZA, R. M.; SILVA, M. S. F. (Eds.). **Conservação ambiental e planejamento territorial**. Rede Editora, Porto Alegre, p. 19-28, 2013c.

WHITE, B. L. A.; WHITE, L. A. S.; RIBEIRO, G. T.; FERNANDES, P. A. M. Development of a fire danger index for eucalypt plantations on the northern coast of Bahia, Brazil. **Revista Floresta**, v. 43, n. 4, p. 601-610, 2013d.

WHITE, L. A. S. **Análise espacial e temporal de incêndios florestais para o município de Inhambupe, litoral norte da Bahia**. 2013, 98 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.

WOTTON, B. M.; GOULD, J. S.; McCAY, W. L.; CHENEY, N. P.; TAYLOR, S. W. Flame temperature and residence time in dry eucalypt forest. **International Journal of Wildland Fire**, v. 21, p. 270-281, 2012.

ZIMMER, K.; PARMENTER, R. R. Harvester ants and fire in a desert grassland: ecological responses of *Pogonomyrmex rugosus* (Hymenoptera: Formicidae) to experimental wildfires in central New Mexico. **Environ. Entomology**, v. 27, p. 282-287, 1998.

ANEXO

ANEXO

Anexo 1 - Relação dos modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo e dos limiares (valores máximos e mínimos) de cada variável para os quais os mesmos foram desenvolvidos e podem ser utilizados.

- **Modelo para velocidade de propagação**

$$R = e^{(-0,385 - 0,016 * Bd - 0,048 * Mms1 + 0,172 * U)}$$

$$Bd = \text{Entre } 13,8 \text{ e } 96,45 \text{ kg/m}^3$$

$$Mms1 = \text{Entre } 7,69 \text{ e } 30,52\%$$

$$U = \text{Entre } 0 \text{ e } 15 \text{ km/h}$$

- **Modelos para o comprimento das chamas**

$$Fl = 0,428 + 7,397 * Fbd - 0,019 * Mms1 + 0,027 * U$$

$$Fbd = \text{Entre } 0,008 \text{ e } 0,118 \text{ m}$$

$$Mms1 = \text{Entre } 7,69 \text{ e } 36,59 \%$$

$$U = \text{Entre } 0 \text{ e } 15 \text{ km/h}$$

$$Fl = 0,202 + 0,024 * \sqrt{I_B} + 3,63 * Fbd - 0,006 * Mms1$$

$$I_B = \text{Entre } 0 \text{ e } 1385,16 \text{ kW/m}$$

$$Fbd = \text{Entre } 0,008 \text{ e } 0,118 \text{ m}$$

$$Mms1 = \text{Entre } 7,69 \text{ e } 36,59 \%$$

- **Modelo para o consumo do material combustível (MS1 + MS2)**

$$Fc = 127,173 + 3,269 * Wms1 - 0,603 * Bd - 3,651 * Mms1$$

$Wms1$ = Entre 1,94 e 19,37 t/ha

Bd = Entre 13,8 e 96,45 kg/m³

$Mms1$ = Entre 7,69 e 38,5 %

$$Fc = 71,9 + 0,38 * \sqrt{HA} - 0,439 * Bd - 1,838 * Mms1$$

HA = Entre 0 e 67334 kJ/m²

Bd = Entre 13,8 e 96,45 kg/m³

$Mms1$ = Entre 7,69 e 38,5 %

- **Modelos para o tempo de queima**

$$Tq = 8,189 + 0,598 * Wms2 + 0,067 * Bd - 0,523 * U$$

$Wms2$ = Entre 0 e 22,72 t/ha

Bd = Entre 13,8 e 78,1 kg/m³

U = Entre 0 e 15 km/h

$$Tq = 0,921 + 0,377 * Wms2 + 0,013 * I_B - 5,958 * Ln(R)$$

$Wms2$ = Entre 0 e 22,72 t/ha

I_B = Entre 12,3 e 627,35 kW/m

R = Entre 0.09 e 2.14 m/min