

ALEXANDRE BEUTLING

**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO COM BASE EM
EXPERIMENTOS LABORATORIAIS E DE CAMPO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Florestal do Setor de Ciências
Agrárias da Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Doutor em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

CURITIBA

2009



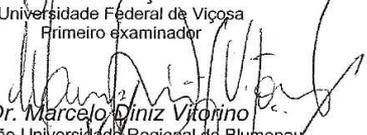
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER

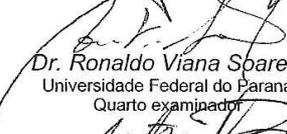
Defesa nº. 804

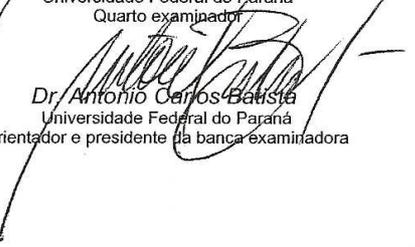
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) doutorando(a) *Alexandre Beutling* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO COM BASE EM EXPERIMENTOS LABORATORIAIS E DE CAMPO**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**.


Dr. Guido Assunção Ribeiro
Universidade Federal de Viçosa
Primeiro examinador


Dr. Marcelo Diniz Vitorino
Fundação Universidade Regional de Blumenau
Segundo examinador

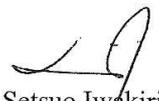

Dr. Flavio André Cecchini Deppe
Instituto Tecnológico Simepar
Terceiro examinador


Dr. Ronaldo Viana Spares
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador


Dr. Antonio Carlos Bastia
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 09 de outubro de 2009.


Setsuo Iwakiri

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
João Carlos Garzel Leodoro da Silva
Vice-coordenador do curso

Ao Grande Amigo e Professor,

José Renato Soares Nunes

Zé!

Você sabia que dava!

Sempre acreditou!

Sempre “pegou no pé”!

E aqui está!!

É para você!!

... e eu sei que você está vendo!

Aos meus pais,

Gerhard Beutling e Beti Aneli Beutling

Aos meus irmãos,

Cássio e Felipe

E a você Lorena, minha Esposa

Para quem pretendo dedicar todo o meu tempo

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta conquista. Obrigado.

Ao amigo e Professor Antonio Carlos Batista, que acreditou, foi paciente e, acima de tudo, ORIENTADOR.

Ao Professor Ronaldo Viana Soares, pelas sugestões e pela avaliação deste material.

Ao amigo e Professor Marcelo Diniz Vitorino, que sugeriu a realização do Mestrado, caminho que me trouxe até aqui.

Aos meus amigos, dos quais muitas vezes estive ausente por causa deste trabalho.

À empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda, cuja estrutura foi fundamental para a pesquisa com fogo e a experiência com incêndios. E ao Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios – LPCI Rio Sagrado, minha terceira casa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE QUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS.....	xviii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Geral.....	2
1.1.2 Específicos	2
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 INTRODUÇÃO AO FENÔMENO FOGO	3
2.2 COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS	6
2.2.1 Localização dos Combustíveis Florestais	7
2.2.2 Caracterização dos Combustíveis Florestais.....	8
2.2.3 Inflamabilidade e Combustibilidade	11
2.2.4 Influência do Material Combustível no Comportamento do Fogo	13
2.2.5 Modelagem de Combustíveis Florestais	15
2.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	17
2.4 TOPOGRAFIA	19
2.5 VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO	19
2.5.1 Intensidade do Fogo	20
2.5.2 Velocidade de Propagação	22
2.5.3 Calor Liberado por Unidade de Área.....	25
2.5.4 Tempo de Residência do Fogo.....	26
2.5.5 Altura de Crestamento	28
2.6 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO.....	30

3	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO	35
3.1.1	Características dos Laboratórios	36
3.1.1.1	Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná....	36
3.1.1.2	Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado).....	37
3.1.2	Procedimentos Metodológicos.....	40
3.1.2.1	Procedimentos Metodológicos Adotados no Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná	40
3.1.2.1.1	<i>Materiais utilizados</i>	40
3.1.2.1.2	<i>Coleta e preparo do material combustível</i>	40
3.1.2.1.3	<i>Queimas e monitoramento do fogo</i>	41
3.1.2.1.4	<i>Processamento dos dados e análise estatística</i>	41
3.1.2.2	Procedimentos Metodológicos Adotados no Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado)	42
3.1.2.2.1	<i>Coleta e preparo do material combustível</i>	42
3.1.2.2.2	<i>Queimas e monitoramento do fogo</i>	43
3.1.2.2.3	<i>Processamento dos dados e análise estatística</i>	43
3.2	AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL E QUEIMAS EM POVOAMENTOS DE PINUS.....	44
3.2.1	Caracterização da Área de Estudo	44
3.2.1.1	Localização	44
3.2.1.2	Clima	45
3.2.2	Características dos Povoamentos Seleccionados na Fazenda Experimental	45
3.2.3	Procedimentos Metodológicos para Amostragem de Material Combustível em Povoamentos de Pinus.....	46
3.2.3.1	Materiais utilizados	46
3.2.3.1.1	<i>Em campo</i>	46

3.2.3.1.2	<i>Em laboratório</i>	47
3.2.3.2	Procedimentos executados para amostragem de material combustível florestal.....	48
3.2.3.2.1	<i>Em campo</i>	48
3.2.3.2.2	<i>Em laboratório</i>	56
3.2.4	Procedimentos Metodológicos para Condução de Queima das Parcelas de Campo	57
3.2.4.1	Materiais utilizados em campo	57
3.2.4.2	Procedimentos executados em campo	58
3.2.4.3	Processamento dos dados e análise estatística	59
3.3	EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO	60
3.3.1	Caracterização da Área	62
3.3.2	Materiais e Equipamentos Utilizados	64
3.3.3	Procedimentos de Construção das Parcelas	65
3.3.4	Queimas e Monitoramento do Fogo nas Parcelas Artificiais	67
3.3.5	Processamento dos Dados e Análise Estatística	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1	EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO	72
4.1.1	Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná....	72
4.1.1.1	Condições ambientais durante as queimas.....	72
4.1.1.2	Avaliação da influência da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo em queimas com carga de 0,2 kg m ⁻²	73
4.1.1.3	Avaliação da influência da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo em queimas com carga de 0,4 kg m ⁻²	74
4.1.1.4	Avaliação da influência da carga e da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo.....	76
4.1.1.4.1	<i>Velocidade de propagação</i>	78
4.1.1.4.2	<i>Intensidade do fogo</i>	78

4.1.1.4.3	<i>Equações matemáticas</i>	79
4.1.2	Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado).....	80
4.1.2.1	Condições ambientais durante as queimas.....	80
4.1.2.2	Avaliação do comportamento do fogo.....	81
4.1.2.2.1	<i>Velocidade de propagação e altura das chamas</i>	81
4.1.2.2.2	<i>Intensidade do fogo</i>	81
4.1.2.2.3	<i>Relações entre parâmetros do fogo e ambiente – Correlações</i>	82
4.1.2.2.4	<i>Equações matemáticas</i>	84
4.2	QUEIMAS SOB POVOAMENTOS DE PINUS	86
4.2.1	Material Combustível.....	86
4.2.1.1	Carga total do material combustível florestal	86
4.2.1.2	Carga do material combustível florestal por classes de diâmetro.....	87
4.2.1.3	Proporção representativa das classes do material combustível florestal	88
4.2.1.4	Espessura da manta	89
4.2.1.5	Densidade de carga do material combustível florestal	90
4.2.1.6	Correlações.....	91
4.2.2	Descrição das Queimas	92
4.2.2.1	Comportamento do fogo	95
4.2.2.1.1	<i>Velocidade de propagação média</i>	95
4.2.2.1.2	<i>Altura média das chamas</i>	95
4.2.2.1.3	<i>Intensidade média do fogo</i>	95
4.2.2.2	<i>Equações matemáticas</i>	96
4.3	EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO	102
4.3.1	Descrição do Comportamento do Fogo nas Queimas das Parcelas Artificiais.....	104
4.3.2	Equações matemáticas e modelagem do comportamento do fogo nas queimas das parcelas artificiais.....	106
4.3.3	Considerações em Relação à Metodologia Utilizada.....	109

5	CONCLUSÕES	110
5.1	DOS EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO	110
5.1.1	Realizados no Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná.....	110
5.1.2	Realizados no Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios (LPCI) da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda	111
5.2	DAS QUEIMAS SOB POVOAMENTOS DE PINUS	111
5.2.1	Em Relação à Amostragem do Material Combustível Florestal.....	111
5.2.2	Em Relação aos Dados de Comportamento do Fogo.....	112
5.3	DOS EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO.....	112
	REFERÊNCIAS	114
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO EM DIVERSOS TIPOS DE VEGETAÇÃO ..	32
TABELA 2 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA INTENSIDADE DO FOGO...	33
TABELA 3 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA DE CRESTAMENTO EM DIVERSOS TIPOS DE POVOAMENTOS.....	34
TABELA 4 – MODELOS DE PROBABILIDADE DE SOBREVIVÊNCIA DAS ÁRVORES AO FOGO	34
TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA DO AR E UMIDADE RELATIVA DO AR NOS ENSAIOS DE QUEIMAS EM LABORATÓRIO	72
TABELA 6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) EM QUEIMAS COM $0,2 kg m^{-2}$	73
TABELA 7 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) EM QUEIMAS COM $0,2 kg m^{-2}$	74
TABELA 8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) EM QUEIMAS COM $0,4 kg m^{-2}$	75
TABELA 9 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) EM QUEIMAS COM $0,4 kg m^{-2}$	75
TABELA 10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$)	76
TABELA 11 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$).....	77
TABELA 12 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR E AS VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO E ALTURA DAS CHAMAS	82

TABELA 13 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR E AS VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO.....	83
TABELA 14 – INTENSIDADE DO FOGO ESTIMADA COM BASE NO MODELO DE BYRAM PARA CADA UMA DAS PARCELAS QUEIMADAS.....	96
TABELA 15 – VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO, OBTIDAS DURANTE A REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS E UTILIZADAS PARA COMPOR A MATRIZ DE DADOS DO EXPERIMENTO.....	97
TABELA 16 – SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO DURANTE AS QUEIMAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS EM UM PLANTIO DE <i>Pinus elliottii</i> NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO –PR.....	98
TABELA 17 – CORRELAÇÕES (PEARSON) ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO DURANTE A REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS SOB OS PLANTIOS DE <i>Pinus elliottii</i> EM RIO NEGRO-PR.....	99
TABELA 18 – MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO FOGO EM QUEIMAS CONTROLADAS SOB PLANTIOS DE <i>Pinus elliottii</i> , NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO-PR.....	99
TABELA 19 – CLASSIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO.....	105

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPARAÇÃO ENTRE INFLAMABILIDADE E COMBUSTIBILIDADE.....	13
QUADRO 2 – DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	41
QUADRO 3 – DETALHAMENTO DOS BLOCOS (SUB-ÁREAS) SELECIONADOS PARA ESTUDO	45
QUADRO 4 – NÚMERO DE PARCELAS COLETADAS POR BLOCO PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FLORESTAL	52
QUADRO 5 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) NOS DIFERENTES NÍVEIS DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE, EM QUEIMAS COM $0,2 kg m^{-2}$	73
QUADRO 6 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ($m s^{-1}$) NOS DIFERENTES NÍVEIS DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE, EM QUEIMAS COM $0,4kg m^{-2}$	75
QUADRO 7 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” ($m s^{-1}$) PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA CONHECIDA ($0,2 kg m^{-2}$) E DIFERENTES INCLINAÇÕES DE TERRENO “ d ” (graus).....	79
QUADRO 8 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” ($m s^{-1}$) PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA CONHECIDA ($0,4 kg m^{-2}$) E DIFERENTES INCLINAÇÕES DE TERRENO “ d ” (graus).....	80
QUADRO 9 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS.....	81
QUADRO 10 – VALORES MÉDIOS DE VELOCIDADE DO FOGO ($m s^{-1}$) E ALTURA DAS CHAMAS (m) DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS – LPCI RIO SAGRADO.....	81

QUADRO 11 – VALORES MÉDIOS DE INTENSIDADE DO FOGO ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS – LPCI RIO SAGRADO	82
QUADRO 12 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m)	84
QUADRO 13 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m), TEMPERATURA DO AR “ T ” ($^{\circ}\text{C}$) E UMIDADE RELATIVA DO AR “ UR ” (%)	85
QUADRO 14 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE INTENSIDADE DO FOGO “ I ” ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m).....	85
QUADRO 15 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE INTENSIDADE DO FOGO “ I ” ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m), TEMPERATURA DO AR “ T ” ($^{\circ}\text{C}$) E UMIDADE RELATIVA DO AR “ UR ” (%)	86
QUADRO 16 – CARGA TOTAL DE MATERIAL COMBUSTÍVEL (Mg ha^{-1}) DO POVOAMENTO DE <i>Pinus elliottii</i> COM 25 ANOS	87
QUADRO 17 – VALORES MÉDIOS DE CARGA (kg m^{-2}) DAS CLASSES DE DIÂMETRO DO POVOAMENTO DE <i>Pinus elliottii</i> COM 25 ANOS	88
QUADRO 18 – VALORES PERCENTUAIS MÉDIOS DE CARGA (kg m^{-2}) DE ACORDO COM AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL	88
QUADRO 19 – ESPESSURA DA LITEIRA (cm).....	90
QUADRO 20 – DENSIDADE DE CARGA DO MATERIAL COMBUSTÍVEL TOTAL (kg m^{-3})	90
QUADRO 21 – CORRELAÇÕES SIGNIFICATIVAS ENTRE VARIÁVEIS DOS POVOAMENTOS ESTUDADOS	91
QUADRO 22 – OUTRAS CORRELAÇÕES SIGNIFICATIVAS ESTABELECIDAS ENTRE AS VARIÁVEIS DOS POVOAMENTOS ESTUDADOS	92

QUADRO 23 – DADOS CLIMÁTICOS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO MEDIDAS DURANTE AS QUEIMAS NAS PARCELAS ARTIFICIAIS DE CAMPO	103
QUADRO 24 – RESULTADOS DAS QUEIMAS REALIZADAS A FAVOR E CONTRA O VENTO EM PARCELAS ARTIFICIAIS DE CAMPO.....	104
QUADRO 25 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal m ⁻¹ s ⁻¹)” COM BASE NA ALTURA MÉDIA DAS CHAMAS - hc (m)	106
QUADRO 26 – MODELO DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal m ⁻¹ s ⁻¹)” COM BASE NA UMIDADE RELATIVA DO AR - UR (%).....	107
QUADRO 27 – MODELO DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal m ⁻¹ s ⁻¹)” COM BASE NA VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO - V_v (m s ⁻¹).....	107
QUADRO 28 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min ⁻¹)” COM BASE NA ALTURA MÉDIA DAS CHAMAS - hc (m)	108
QUADRO 29 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min ⁻¹)” COM BASE NA UMIDADE RELATIVA DO AR - UR (%).....	108
QUADRO 30 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min ⁻¹)” COM BASE NA VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO - V_v (m s ⁻¹).....	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TRIÂNGULO DO FOGO	3
FIGURA 2 – COMBINAÇÃO DE TRIÂNGULOS RELATIVOS À OCORRÊNCIA E PROPAGAÇÃO DO FOGO.....	4
FIGURA 3 – QUADRADO DO FOGO.....	5
FIGURA 4 – O HEXAGRAMA DO COMPORTAMENTO DO FOGO	5
FIGURA 5 – DIAGRAMA DAS PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS	7
FIGURA 6 – DIMENSÕES DA CHAMA EM UM INCÊNDIO A FAVOR DO VENTO	21
FIGURA 7 – GRÁFICO EXEMPLIFICANDO A VARIÁVEL TEMPO DE RESIDÊNCIA	27
FIGURA 8 – ALTURA DE CRESTAMENTO LETAL (AS FOLHAS, MORTAS PELO CALOR SECAM E SE DESPRENDEM POSTERIOR À PASSAGEM DO FOGO)	28
FIGURA 9 – CÂMARA DE COMBUSTÃO DO LABORATÓRIO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS DA UFPR.....	37
FIGURA 10 – CROQUI DO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS (LPCI-RIO SAGRADO).....	38
FIGURA 11 – PLATAFORMA AUXILIAR.....	39
FIGURA 12 – PLATAFORMA “V”	39
FIGURA 13 – PLATAFORMA PRINCIPAL.....	39
FIGURA 14 – PLATAFORMA DE COMBUSTÃO.....	42
FIGURA 15 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM RELAÇÃO AO BRASIL, AO ESTADO DO PARANÁ E AO MUNICÍPIO DE RIO NEGRO	44
FIGURA 16 – GABARITO UTILIZADO PARA DELIMITAR A ÁREA DAS PARCELAS AMOSTRAIS.....	47

FIGURA 17 – CALIBRADOR DE DIÂMETRO UTILIZADO PARA SEPARAR AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL	47
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DOS BLOCOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO E FOTOGRAFIA DO BLOCO “B” CONSTRUÍDO CONFORME CROQUI	49
FIGURA 19 – CROQUI DOS BLOCOS COM A LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL, AMOSTRAGEM DO TEOR DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL NO DIA DA QUEIMA E PARCELAS DESTINADAS À QUEIMA.....	50
FIGURA 20 – CROQUI DO BLOCO “D” COM A LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL.....	51
FIGURA 21 – CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL	55
FIGURA 22 – DIMENSÃO DAS ÁRVORES	62
FIGURA 23 – LOCALIZAÇÃO DA FAZENDA EXPERIMENTAL DO CANGUIRI .	63
FIGURA 24 – ÁREA DE ESTUDO	63
FIGURA 25 – PESAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL SUPERFICIAL	65
FIGURA 26 – POSICIONAMENTO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL NA PARCELA.....	67
FIGURA 27 – PARCELAS MONTADAS EM CAMPO.....	68
FIGURA 28 – EXEMPLOS DE ALTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS NAS PARCELAS.....	70
FIGURA 29 – VELOCIDADE DO FOGO ($m s^{-1}$) EM ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA DE 0,2 E 0,4 $kg m^{-2}$ E SIMULAÇÃO DE RELEVO COM 0, 5, 10, 15 E 20° DE INCLINAÇÃO.....	78
FIGURA 30 – INTENSIDADE DO FOGO ($kcal m^{-1} s^{-1}$) EM ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA DE 0,2 E 0,4 $kg m^{-2}$ E SIMULAÇÃO DE RELEVO COM 0, 5, 10, 15 E 20° DE INCLINAÇÃO.....	79

FIGURA 31 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA (T) E UMIDADE RELATIVA DO AR (UR) DURANTE A CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DO DIA 22 EM FUNÇÃO DA HORA DE INÍCIO E FIM DE CADA QUEIMA	94
FIGURA 32 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA (T) E UMIDADE RELATIVA DO AR (UR) DURANTE A CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DO DIA 23 EM FUNÇÃO DA HORA DE INÍCIO E FIM DE CADA QUEIMA	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- DAP : diâmetro à altura do peito;
- Dv : direção do vento no início da queima (Graus);
- d : inclinação do terreno ou declividade (Graus ou %);
- eaq : espessura da manta combustível antes da queima;
- edq : espessura da manta combustível depois da queima;
- esp : espessura da manta combustível;
- F : acículas de deposição mais antiga à “L” (2ºcamada superficial);
- H : acículas de deposição antiga (3ºcamada superficial), mais próxima ao solo propriamente dito;
- Ha : calor liberado (kcal m^{-2});
- hc : altura ou comprimento das chamas;
- H : poder calorífico ou calor de combustão (kcal kg^{-1});
- Hr : Hora de início da queima;
- hs : altura de crestamento letal;
- hv : altura da vegetação;
- I : intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$);
- L : acículas de deposição recente (1ºcamada superficial);
- LPCI : Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios;
- Mg ha⁻¹: unidade de medida de carga de material combustível;
- Período: período do dia em que a queima foi realizada;
- PQ : profundidade de queima (cm);
- r : velocidade de propagação do fogo;
- S1 : material lenhoso cujo diâmetro era inferior ou igual a 0,7 cm;
- S2 : material lenhoso cujo diâmetro encontrava-se entre 0,71 e 2,5 cm;
- S3 : material lenhoso cujo diâmetro encontrava-se entre 2,51 e 7,6 cm;
- S4 : material lenhoso cujo diâmetro era superior a 7,6 cm;
- SNK : teste de comparação de médias de *Student*, *Newman* e *Keuls*;

T : temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);
 t_r : tempo de residência do fogo;
 U : umidade do material combustível (%);
 UR : umidade relativa do ar (%);
 V_v : velocidade do vento (m s^{-1});
 w : carga de material combustível;
 w_{aq} : peso do material combustível antes da queima;
 w_{dq} : peso do material combustível depois da queima;
 w_{cons} : peso do material combustível consumido pelo fogo;

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver e ajustar modelos de predição do comportamento do fogo em experimentos de laboratório e queimas sob povoamentos de pinus, e propor uma metodologia de montagem de parcelas artificiais em campo para monitoramento do comportamento do fogo. Dois laboratórios foram utilizados para atender aos experimentos de avaliação da relação entre carga de material combustível e declividade do terreno sobre a variável velocidade de propagação e determinação de modelos de comportamento do fogo tendo por base queimas em superfície plana, com carga e espessura da manta pré-determinadas. A Estação Experimental de Rio Negro, localizada no município de Rio Negro-PR foi o cenário escolhido para o desenvolvimento e ajuste de modelos de comportamento do fogo com base em queimas sob povoamentos de pinus e a Fazenda Experimental do Canguiri, localizada no município de Pinhais-PR, foi utilizada para o desenvolvimento da metodologia de montagem de parcelas artificiais para monitoramento do comportamento do fogo com base em queimas com variáveis conhecidas. Para os experimentos de laboratório foram pré-determinados os valores de carga de material combustível, espessura da manta e declividade do terreno. Durante a condução das queimas nestes ambientes, as variáveis do comportamento do fogo velocidade de propagação e altura das chamas e as variáveis ambientais temperatura e umidade relativa do ar foram monitoradas. Nas queimas sob povoamentos de pinus em Rio Negro, a caracterização da área foi complementada com a amostragem do material combustível superficial, e as queimas conduzidas em parcelas de 50,0 m². Na Fazenda do Canguiri, o desenvolvimento da nova metodologia e as queimas ocorreram em parcelas com dimensões de 2,0 x 6,0 metros, com carga, espessura da manta e arranjo do combustível pré-determinados, e com monitoramento de vento, temperatura e umidade relativa do ar. Nos experimentos de laboratório concluiu-se que nas inclinações de até 15° a carga de combustível foi o fator determinante na velocidade de propagação do fogo e que após 15° a declividade foi o fator determinante da velocidade. Os modelos polinomiais de segunda ordem foram os que apresentaram melhor ajuste na predição da velocidade de propagação do fogo em função da declividade, com R² acima de 0,76. Foram ajustados modelos de predição da velocidade do fogo em função da altura das chamas (R² = 0,8063) e de predição da intensidade do fogo em função da altura de chamas (R² = 0,8272). Um modelo envolvendo as variáveis altura de chamas, temperatura e umidade relativa do ar também foi ajustado, fornecendo R² de 0,8436. Das queimas sob povoamentos de pinus, cuja amostragem da carga total apresentou uma média de 32,23 Mg ha⁻¹, o modelo que melhor estimou a velocidade de propagação foi $r = 0,104716 + 0,0124587T - 0,00400681UR + 0,0478819Vv$ (R² = 0,8273) e que melhor estimou intensidade do fogo foi $I = -718,028 + 1275,87hc + 8,33757UR$ (R² = 0,8523). As queimas das parcelas artificiais produziram intensidade do fogo entre 30,19 e 582,22 kcal m⁻¹ s⁻¹, altura de chamas entre 0,75 e 5,63 metros e velocidade do fogo entre 0,19

a $3,66 \text{ m min}^{-1}$. Os resultados desta metodologia possibilitaram o ajuste de modelos de predição da intensidade do fogo com base na altura de chamas ($R^2 = 0,7999$) e velocidade do vento ($R^2 = 0,709$) e modelos de estimativa da velocidade do fogo com base na altura das chamas ($R^2 = 0,7995$), velocidade do vento ($R^2 = 0,7101$) e umidade relativa do ar ($R^2 = 0,5661$).

Palavras-chave: modelos, queima controlada, amostragem, pinus

ABSTRACT

This research was carried through with the purpose to develop and to adjust fire behavior prediction models in laboratory experiments and burns under pine stands as well as to propose an artificial plot assembly methodology in field to monitor fire behavior. The “*Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná*”, located in Curitiba County, Paraná State and the “*Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios*” of *Rio Sagrado Industrial Química Ltda* enterprise, located in Quatro Barras County, Paraná State, were both sites at which experiments were performed to a) evaluate the relationship between fuel weight and land slope considering fire spread variables b) define patterns of fire behavior based on fire burns on a flat landscape, with predetermined weight and fuel depth. The “*Estação Experimental de Rio Negro*”, located in Rio Negro County, Paraná State, was the location chosen for the development and adjustment of fire behavior models based on burns under pine stands and the “*Fazenda Experimental do Canguiri*”, located in Pinhais County, Paraná State, was used for the development of an artificial plot assembly methodology to monitor fire behavior based on burns with known variables. For the lab experiments, fuel weight, fuel depth and slope figures were predetermined. During the burns conduction in these environments, fire behavior variables such as fire spread and flame height, temperature and relative humidity were monitored. For burns under pine stands in Rio Negro, the characterization of the area was complemented by a superficial forest fuel sampling and the burns were conducted in plots with 50.0 m². At the Canguiri farm, the development of the new methodology and burns were carried out in plots with dimensions of 2x6 meters, with fuel weight, fuel depth and further fuel arrangements predetermined and with the monitoring of wind, temperature and relative humidity. It was verified during the lab experiments that in inclinations less than 15 degrees, the fuel weight was the principal factor in the fire spread and that above 15 degrees, the slope was the principal factor in the fire spread. The second order polynomials models presented the best adjustment in the fire spread prediction according the slope, with R² above 0.76. Fire spread prediction models were adjusted according to flame height (R² = 0.8063) and fire intensity prediction according to flame height (R² = 0.8272). A model comprising of variables such as flame height, temperature and relative humidity was also adjusted, providing R² equal to 0.8436. Regarding burns under pine stands, of which its total fuel load provided an average of 32.23 Mg ha⁻¹, the model to provide the most accurate estimate for fire spread was $r = 0.104716 + 0.0124587T - 0.00400681UR + 0.0478819Vv$ (R² = 82.73) and for fire intensity was $I = -718.028 + 1275.87hc + 8.33757UR$ (R² = 85.23). The burns of artificial plots produced fire intensities between 30.19 and 582.22 kcal m⁻¹ s⁻¹, flame height between 0.75 and 5.63 meters and fire spread between 0.19 and 3.66 m min⁻¹. The results of this methodology allowed fire intensity prediction model adjustments based on flame height (R² = 0.7999), wind speed (R² = 0.7090) and fire spread estimate models based on flame height (R² = 0.7995), wind speed (R² = 0.7101) and relative humidity (R² = 0.5661).

Key-words: models, fire behavior, sampling, pine.

1 INTRODUÇÃO

O fogo figura como um dos principais agentes causadores de danos aos povoamentos florestais. Muitas vezes, mesmo com a adoção de diversas técnicas de prevenção e combate atualmente conhecidas, os incêndios florestais podem ocorrer e se propagar de forma devastadora, comprometendo irreversivelmente os investimentos aplicados no setor florestal.

Diversos estudos têm contribuído para a redução das ocorrências de incêndios nas empresas florestais. Neste contexto, destacam-se o treinamento e aperfeiçoamento constante das equipes de combate e, principalmente, o emprego e desenvolvimento de novas técnicas preventivas baseadas em informações advindas de pesquisas científicas.

É de longa data que modelos para predição do comportamento do fogo vêm sendo desenvolvidos no exterior, com destaque para EUA, Canadá, Portugal e Chile. Estes modelos resultaram de uma série de estudos com simulações de incêndios em condições de campo e laboratório. Os povoamentos homogêneos apresentam condições mais favoráveis ao desenvolvimento destes modelos, bem como são igualmente os mais suscetíveis à ocorrência dos incêndios.

A determinação das características do material combustível, topografia e condições climáticas permitem que sejam realizadas estimativas sobre o comportamento do fogo, bem como a predição do grau de risco de incêndio e a probabilidade de ignição do combustível em condições de campo. Dentre as variáveis estimadas pelos modelos, a velocidade de propagação da frente de fogo é a informação de maior interesse ao chefe de brigada, pois auxilia no desenvolvimento da estratégia de combate, principalmente nos incêndios de grande porte, onde o risco aos combatentes é maior.

A modelagem do comportamento do fogo em povoamentos de pinus é inédita no Brasil, fato que motivou a realização deste projeto. Através de medições de variáveis do comportamento do fogo, realizadas a partir de queimas controladas em condições de laboratório e de campo, obtiveram-se dados que proporcionaram a geração de modelos matemáticos, tornando possível a estimativa do comportamento

do fogo na ocorrência de um incêndio florestal em condições semelhantes às apresentadas pelas áreas de estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

- a) Desenvolver e ajustar modelos para predição do comportamento do fogo em diferentes condições.

1.1.2 Específicos

- a) Desenvolver e ajustar modelos para estimativa do comportamento do fogo em condições de laboratório;
 - i. avaliar a influência da relação entre carga de material combustível e inclinação do terreno sobre a variável velocidade de propagação do fogo;
 - ii. estabelecer modelos de comportamento do fogo tendo por base queimas realizadas em superfície plana, com carga e espessura da manta do material combustível pré-determinadas.
- b) Desenvolver e ajustar modelos para predição do comportamento do fogo em reflorestamentos de pinus localizados na Fazenda Experimental de Rio Negro-PR;
- c) Propor uma nova metodologia de montagem de parcelas artificiais para monitoramento do comportamento do fogo em combustíveis florestais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO AO FENÔMENO FOGO

O fogo pode ser interpretado como o fenômeno físico resultante da rápida combinação entre o oxigênio e uma substância combustível, com produção de calor, luz e, geralmente, chamas (SOARES, 1985); é uma reação química de rápida oxidação (GAYLOR, 1974), caracterizada por reações exotérmicas em cadeia que compreendem o processo conhecido por combustão (BATISTA, 1990).

Nas pesquisas de GOLDAMMER (1982), CIANCIULLI (1981), BATISTA (1990) e SOARES (1985) observam-se referências ao “triângulo do fogo”, que é a representação dos elementos básicos da combustão. Segundo esses autores, para que ocorra o processo de combustão, é necessário a interação de três elementos: calor, oxigênio (comburente) e material combustível (Figura 1).

FIGURA 1 – TRIÂNGULO DO FOGO

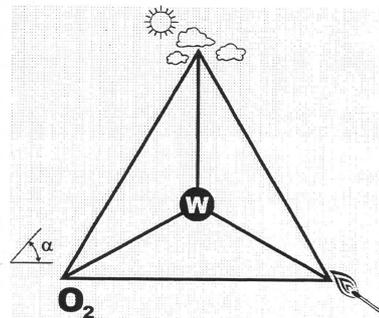


FONTE: VESPER – Estudo Orientado (2004)

A eliminação ou ausência de qualquer um dos elementos do triângulo impede a ocorrência da combustão (BATISTA, 1995), tornando impossível a ignição ou a propagação do fogo (CIANCIULLI, 1981).

SOUZA (2000) enfatizou, de forma ainda mais detalhada, a importância do triângulo do fogo, não somente para o processo de combustão, mas também nos processos envolvendo prevenção e combate a incêndios florestais, referindo-se a uma “pirâmide” formada pela junção de três triângulos: 1 – Triângulo do fogo, formado pelos elementos que constituem a base do processo de combustão; 2 – Triângulo do comportamento do fogo, formado pelas condições do tempo, topografia e material combustível; e 3 – Triângulo do regime de fogo, formado pelo agente de ignição, material combustível e condições para queimar. Esta pirâmide constitui a base para ocorrência e propagação do fogo, ou seja, seus elementos constituintes são os responsáveis pela caracterização do comportamento do fogo (Figura 2). Faz-se necessário mencionar que o material combustível é o único elemento comum aos três triângulos, evidenciando sua importância no fenômeno fogo.

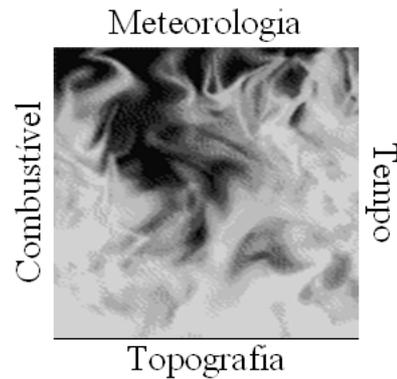
FIGURA 2 – COMBINAÇÃO DE TRIÂNGULOS RELATIVOS À OCORRÊNCIA E PROPAGAÇÃO DO FOGO



FONTE: SOUZA (2000)

VIEGAS (2007) também cita o combustível, a topografia e a meteorologia como fatores condicionantes do comportamento do fogo e faz menção a um “quadrado do fogo”, afirmando categoricamente ser esta a figura representativa quando se considera a descrição dos elementos diretamente responsáveis pelo comportamento do fogo (Figura 3).

FIGURA 3 – QUADRADO DO FOGO

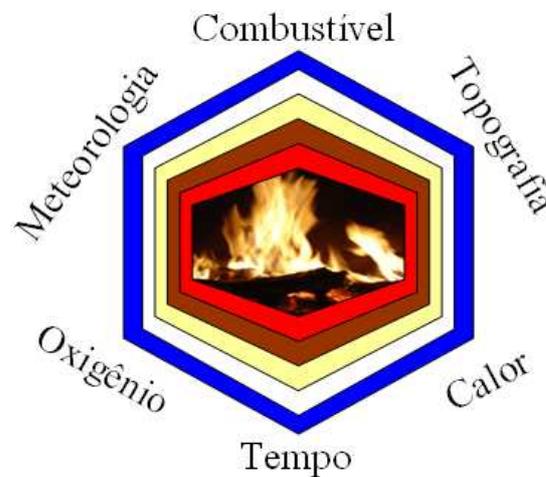


FONTE: O AUTOR

Para este mesmo autor, o tempo intervém de forma explícita no comportamento de um incêndio, pois o comportamento do fogo é dinâmico e, apesar das condições locais permanecerem constantes, as características de propagação vão se alterando ao longo do tempo, evidenciando a importância desta variável.

Resumindo as descrições e formas geométricas representativas do fenômeno fogo, suas conseqüências, interdependências, relações e reações, uma nova figura é apresentada, podendo muito bem ser denominada de hexagrama do fogo e/ou do comportamento do fogo, que potencialmente reúne todos os componentes acima apresentados e discutidos (Figura 4).

FIGURA 4 – O HEXAGRAMA DO COMPORTAMENTO DO FOGO



FONTE: O AUTOR

As variáveis do triângulo do regime de fogo “agente de ignição” e “condições para queimar” encontram-se implícitas no hexagrama do comportamento do fogo, pois subentende-se que um agente de ignição gera calor e que as condições para queimar são determinadas pelos fatores climáticos, topográficos e características do material combustível.

2.2 COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS

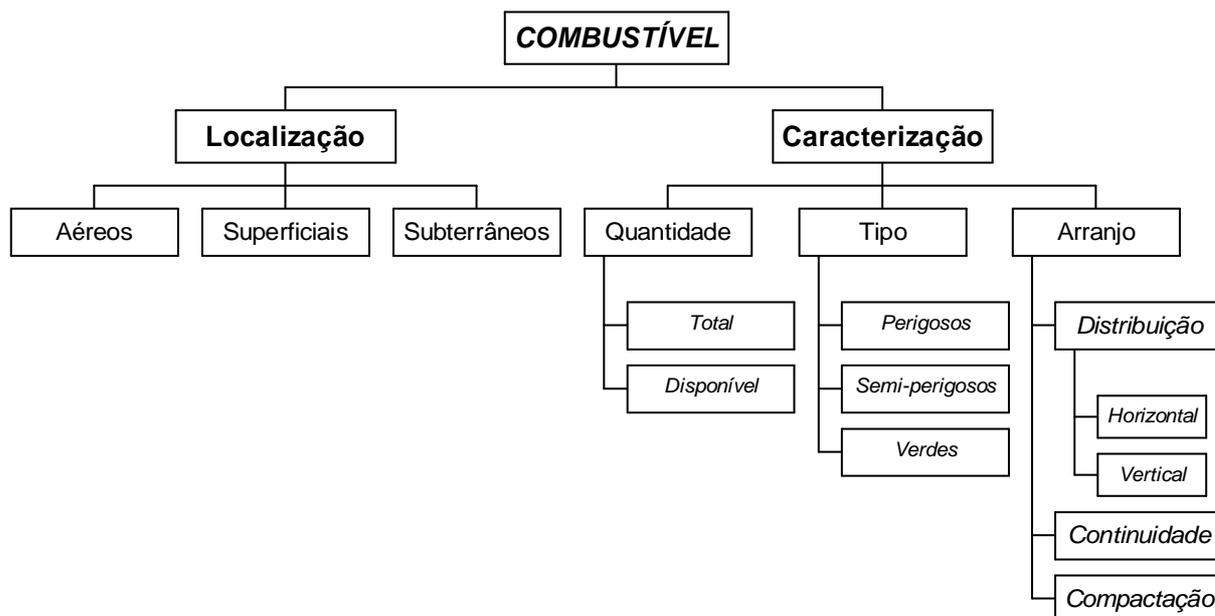
Combustível florestal é qualquer material orgânico, vivo ou morto, no solo ou acima deste, suscetível de participação no processo de combustão (BATISTA, 1990; SOARES, 1985).

De acordo com VÉLEZ (2000), é dos combustíveis florestais que dependem, mais do que qualquer outro fator, o início e a propagação do fogo, sendo que para estimar corretamente o comportamento de um incêndio, o autor frisa a necessidade de se observar, com antecedência, as particularidades dos diversos combustíveis presentes em determinada região.

Segundo FERRER (2004), os combustíveis florestais podem ser caracterizados sob o ponto de vista macroscópico e microscópico. A análise macroscópica se refere à caracterização da disposição do combustível no meio. Já a análise microscópica trata principalmente das características térmicas, geométricas e químicas das partículas do combustível, ou seja, as propriedades intrínsecas de cada espécie.

Conforme BEUTLING (2005), os combustíveis florestais podem ser analisados observando-se o diagrama abaixo (Figura 5).

FIGURA 5 – DIAGRAMA DAS PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS



De acordo com este diagrama, a localização e as características dos combustíveis florestais são, de uma forma geral, os principais fatores que regem o comportamento do fogo. Clima, topografia e o conteúdo de umidade existente no material combustível são os outros fatores que influenciam na propagação dos incêndios florestais.

2.2.1 Localização dos Combustíveis Florestais

Segundo SOARES (1985), os combustíveis florestais podem ser classificados em aéreos e superficiais. No estrato florestal, os combustíveis aéreos são aqueles que se encontram acima de 1,80 m de altura, compreendendo principalmente os galhos e as copas das árvores. Os combustíveis superficiais são todos aqueles localizados sobre, e imediatamente acima ou no piso da floresta, até 1,80 m de altura, e compreendem

basicamente folhas, galhos, troncos e demais materiais que se encontram neste intervalo. Os combustíveis subterrâneos são todos os materiais combustíveis que estão abaixo da superfície da floresta, como húmus, raízes de árvores, madeira em decomposição, turfa, entre outros (BATISTA, 1990).

Em relação ao comportamento do fogo, os combustíveis depositados sobre a superfície do solo (littera) e o estrato herbáceo são os responsáveis pela ignição, propagação horizontal e superficial do fogo. Já o estrato arbustivo é o responsável pelo desenvolvimento do fogo e pela transformação de um incêndio superficial em incêndio de copas. Por último, os combustíveis subterrâneos são responsáveis por possíveis reignições um incêndio aparentemente extinto (REGO e BOTELHO, 1990).

2.2.2 Caracterização dos Combustíveis Florestais

Independente da localização do material combustível, estes podem ser classificados em função da quantidade, do tipo e do arranjo que apresentam no estrato florestal. Estas características, em conjunto com os aspectos climáticos e topográficos da região, associados ao teor de umidade do material combustível, são os responsáveis pelo comportamento do fogo durante sua ocorrência.

Na floresta, a quantidade de combustível existente pode ser sub-dividida em total e disponível. Esta divisão decorre principalmente do fato de que nem todo combustível se encontra disponível para consumo pelo fogo, devido ao teor de umidade existente no mesmo, à proporção entre material vivo e morto, ao tamanho das partículas do combustível e à sua continuidade sobre a superfície do terreno (BATISTA, 1990). Segundo REGO e BOTELHO (1990), a disponibilidade do material combustível pode alterar-se segundo a hora, a época do ano, o estrato, o tempo atmosférico, a vegetação e a intensidade do fogo.

SOARES (1985) também cita que é a quantidade de material combustível que determina a intensidade de calor liberada pelo fogo durante um incêndio, sendo esta muito importante na caracterização de outros fatores bastante relevantes do comportamento do fogo, dentre os quais, a propagação do mesmo na área atingida.

Quanto maior a carga do combustível maior é a intensidade da combustão (REGO e BOTELHO, 1990). Os mesmos autores afirmam que baseados na relação superfície/volume apresentada pelos combustíveis, que influencia diretamente o comportamento do fogo, estudiosos e pesquisadores trataram de classificar os combustíveis florestais.

Para SOARES (1985) os combustíveis florestais são classificados em:

- a) perigosos: todos os materiais secos com diâmetro igual ou inferior a 1,0 centímetro, constituindo-se de pequenos galhos, folhas, líquens, musgos e gramíneas. Esses materiais perdem umidade de forma bastante rápida, apresentam menor temperatura de ignição, facilitam o início do fogo e aceleram a propagação, queimando-se rapidamente com produção de calor e chamas intensas sendo, também, a principal matéria consumida pelo fogo;
- b) semi-perigosos: todos os materiais secos com diâmetro acima de 1,0 centímetro, constituindo-se de galhos, troncos caídos, tocos, húmus e turfa. São materiais lenhosos ou em decomposição e compactados, que por suas características queimam lentamente e, embora de ignição mais lenta e difícil, desenvolvem intenso calor e podem manter-se em combustão latente, com risco de reiniciar incêndios dados como controlados;
- c) verdes: constituídos pela vegetação viva existente na floresta, estes combustíveis podem ser considerados como não-inflamáveis devido ao alto teor de umidade. No entanto, é importante mencionar o fato de que o calor liberado pela combustão de outros combustíveis pode secar estes materiais, tornando-os igualmente inflamáveis.

BATISTA (1990) cita que 70 a 85% da quantidade de material combustível que normalmente é consumida num incêndio florestal possui diâmetro menor que 2,5 cm.

O arranjo do material combustível relaciona-se com as seguintes características (explicadas por BATISTA, 1990 e SOARES, 1985):

- a) distribuição: pode ser entendido como a “posição” vertical ou horizontal que os combustíveis florestais ocupam dentro do estrato florestal, cuja importância está na transformação de incêndios superficiais em incêndios de copa (REGO e BOTELHO, 1990).
- b) continuidade: refere-se à disposição horizontal dos combustíveis sobre uma determinada área. Se a disposição for uniforme e as partículas de combustível estiverem próximas umas das outras, o calor se transfere com facilidade e o incêndio se propaga normalmente (SOARES, 1985).
- c) compactação: refere-se à quantidade de combustível por unidade de volume, isto é, à proximidade das partículas de combustíveis, umas das outras, em relação à livre circulação de ar em torno das mesmas (SOARES, 1985); é o espaçamento entre materiais combustíveis (REGO e BOTELHO, 1990). Quanto maior for a circulação do ar entre as partículas, maior será a quantidade de oxigênio fornecido para o processo de combustão, onde o resultado observado é a maior propagação das chamas sobre a superfície. Uma menor quantidade de oxigênio, oriunda de uma maior compactação das partículas (menor circulação de ar) ocasiona menos calor e conseqüentemente uma taxa de propagação menor do fogo.

Segundo SOARES (1985), o efeito da umidade do combustível na taxa de combustão do material lenhoso e na propagação dos incêndios é tão pronunciado e evidente que nenhuma medição é necessária para demonstrar sua importância. Ou seja, o material combustível com alto teor de umidade não queima. Isto se deve à denominada “umidade de extinção”, que é um determinado valor do conteúdo de umidade dos materiais combustíveis que impede a combustão e a propagação dos incêndios nas áreas ocupadas por estes materiais. SOARES (1979) cita que materiais combustíveis com teor de umidade acima de 25 a 30% possuem remotas possibilidades de ignição, sendo estes os valores atribuídos para caracterizar a umidade de extinção. Já REGO e BOTELHO (1990) mencionam que a combustão com chamas deixa de ser

possível com valores de 12% para certas espécies herbáceas e até 200% para acículas de pinus, além de valores entre 25 a 40% para a “manta morta” e 120 a 160% para a maior parte dos combustíveis vivos. Para os mesmos autores, a umidade do material combustível determina a quantidade de calor requerida para a ignição da matéria vegetal, pois uma grande quantidade de energia é necessária para vaporizar a água existente no combustível, ocasionando a redução da quantidade de calor disponível para a combustão propriamente dita (SOARES, 1985). BATISTA (1990) menciona que os combustíveis vivos e mortos têm diferentes mecanismos de retenção de água e diferentes respostas às variações do clima. Estes fatores caracterizam os materiais combustíveis quanto à probabilidade de ignição e periculosidade. De acordo com BROWN e DAVIS (1973), SOARES (1979) e BATISTA (1990), a variação do conteúdo de umidade do material morto é bastante grande, sendo raramente menor que 2% mas podendo exceder os 200% após longos períodos de precipitação. Já para algumas plantas vivas, a umidade pode atingir os 300%, baixando para até 80% em períodos de seca (REGO e BOTELHO, 1990).

2.2.3 Inflamabilidade e Combustibilidade

Os conceitos de inflamabilidade e combustibilidade são numerosos e muitas vezes nem sempre coincidentes. Entretanto, ambos são determinados em função das características básicas dos materiais combustíveis e estão inter-relacionados. De uma maneira geral, pode-se entender por inflamabilidade a facilidade que um determinado combustível possui em desenvolver chamas (inflamar-se) e, por combustibilidade, a maneira ou forma como este combustível queima, favorecendo ou dificultando o processo de combustão (BEUTLING, 2005).

A inflamabilidade também se relaciona com o tempo que um determinado combustível leva para incendiar (ignição) desde o momento em que entra em contato com uma fonte de calor. Segundo REGO e BOTELHO (1990), “(...) A quantidade de energia necessária para produzir a ignição ou o tempo necessário para haver

inflamação durante a exposição a uma dada energia, estão na base de avaliação da inflamabilidade.”

ANDERSON¹ (1970), citado por VELEZ (2000), considera a inflamabilidade de um combustível como o conjunto de três fenômenos: potencial de ignição, sustentabilidade e combustibilidade. Estes três fenômenos podem ser definidos, segundo os autores, da seguinte forma:

- a) potencial de ignição: facilidade que um material possui de entrar em ignição; tempo transcorrido até que ocorra a ignição;
- b) sustentabilidade: relaciona-se com a propriedade que o combustível possui em continuar queimando;
- c) combustibilidade: relaciona-se com a velocidade que um combustível é consumido.

Além das características básicas dos combustíveis, REGO e BOTELHO (1990) mencionam que a inflamabilidade é influenciada pela composição mineral dos combustíveis e pela presença de substâncias voláteis nos mesmos, e que os estados fisiológicos e fenológicos apresentados pelo material verde tendem a diminuir o grau de inflamabilidade na seguinte ordem: frutificação, dormência, floração, brotação e crescimento ativo e desenvolvimento aéreo da planta. Esta condição pode ser compreendida analisando-se o conteúdo de umidade presente nas folhagens conforme o estágio de desenvolvimento da vegetação, onde plantas com brotação nova apresentam até 300% de umidade, enquanto que folhagens entrando em dormência (começando a amarelar) chegam a possuir no máximo 50% (SOARES e BATISTA, 2007).

REGO e BOTELHO (1990) conceituam combustibilidade como sendo a forma ou maneira como o fogo se desenvolve ou se mantém após a ignição. VÉLEZ (2000) cita que o conceito de combustibilidade se refere ao calor despreendido oriundo da produção das chamas (queima do material combustível), que necessita ser em

¹ ANDERSON, H. E. Forest fuel ignibility. **Fire Tech.** P 312 – 319, 1970.

quantidade suficiente para manter a combustão e prover a propagação do fogo para o material vegetal vizinho.

Torna-se perceptível que é o arranjo do material combustível (principalmente) que rege a combustibilidade, influenciada também pela distribuição (horizontal e vertical) dos combustíveis, sua continuidade no terreno e grau de compactação. O Quadro 1 fornece uma comparação entre inflamabilidade e combustibilidade, de forma a facilitar a compreensão destes dois processos.

QUADRO 1 – COMPARAÇÃO ENTRE INFLAMABILIDADE E COMBUSTIBILIDADE

	INFLAMABILIDADE	COMBUSTIBILIDADE
Rege:	A capacidade de um material combustível produzir chamas.	A capacidade do material combustível em manter o processo de combustão e se propagar.
Expresso:	Pelo tempo que um material combustível leva até entrar em ignição, a partir do momento em que este é submetido a uma fonte externa de calor.	Pela quantidade de calor desprendido pelo processo de combustão (poder calorífico do material combustível).
Proporciona:	Ignição	Manutenção das chamas e a conseqüente propagação do fogo.
Depende:	Do material combustível: sua estrutura (características básicas), conteúdo de umidade, composição mineral e química (substâncias voláteis), fisiologia e fenologia do material combustível verde (vivo).	Da quantidade de calor produzido e das formas de transmissão do calor no meio florestal (condução, convecção e radiação), em função das características apresentadas pelos materiais combustíveis (principalmente quantidade e arranjo)

Fonte: BEUTLING (2005)

2.2.4 Influência do Material Combustível no Comportamento do Fogo

O material combustível é um dos fatores que possui grande influência sobre o comportamento do fogo. Segundo BATISTA (1990), o termo comportamento do fogo se refere à maneira como o material combustível entra em combustão, como se desenvolvem as chamas e como o fogo se propaga e apresenta outros fenômenos. Para SOARES (1985), comportamento do fogo é o “(...) termo geral usado para indicar o que o fogo faz, ou seja, para descrever as principais características de um incêndio florestal.” Para GAYLOR (1974), a ciência sobre o comportamento do fogo envolve a compreensão de como o fogo atua sob as mais variadas condições. Segundo o mesmo

autor, a compreensão do comportamento do fogo é a essência para o controle do mesmo.

BOTELHO *et al.* (1989) citam que a quantidade e as dimensões dos combustíveis florestais, bem como sua umidade e compactação, são responsáveis pela transferência de calor e energia gerada pelo fogo. Segundo os mesmos autores, as diversas formações florestais apresentam diferentes propriedades físicas, responsáveis por diferenças do comportamento do fogo, sobretudo em áreas com material morto (seco) com diâmetro inferior a 0,6 cm, muito mais suscetíveis à mudanças físicas e influências climáticas (BEUTLING, 2005).

Vários autores concordam que o processo de combustão do material florestal é difícil de ser controlado e que as formas de predição do comportamento do fogo estão longe de ser adequadamente conhecidas e compreendidas. Isto se deve única e exclusivamente à complexidade do combustível florestal. Os combustíveis florestais são sólidos, o que, obrigatoriamente, faz com que necessitem ser convertidos ao estado gasoso antes de entrar em ignição. Os gases liberados durante os diversos estágios do processo de combustão variam física e quimicamente, e esta variação depende do tempo, da temperatura e da disponibilidade de oxigênio existente durante este processo. Um incêndio propagando-se livremente aumenta sua energia com o passar do tempo, determina sua própria taxa de alimentação de combustível além de interagir com o ambiente local, o que o torna um processo altamente variável (SOARES, 1985).

WHELAN (1995) aborda ainda a importância ecológica do comportamento do fogo sobre os demais elementos da natureza. Variáveis como velocidade de propagação do fogo, altura de crestamento, área total atingida, entre outras, são relacionadas à distribuição e abundância de organismos, à quantidade de espécies vegetais que morreram ou irão morrer em consequência da passagem do incêndio, à probabilidade de recuperação da área queimada, à formação de erosão, à quantidade de biomassa remanescente entre outras inúmeras questões envolvidas.

BATISTA (1990) menciona que apesar de tamanha diversidade, vários estudos na área têm contribuído para estabelecer certos parâmetros diretamente ligados ao comportamento do fogo. Estes parâmetros são: intensidade do fogo, taxa de

propagação do fogo, altura de crestamento, calor liberado por unidade de área, tempo de residência, entre outros. A determinação destas variáveis culmina com a caracterização do fogo (comportamento), para um dado momento.

Apesar dos parâmetros serem discutidos individualmente para facilitar a compreensão de como os materiais combustíveis atuam sobre estas variáveis, na natureza todo o processo ocorre simultaneamente, culminando com um comportamento do fogo específico para cada situação resultante da interação de todos os fatores envolvidos no processo de combustão.

2.2.5 Modelagem de Combustíveis Florestais

De acordo com SOUZA (2000), a elaboração de modelos para quantificar materiais combustíveis de florestas ou de povoamentos florestais no Brasil poderá tornar-se uma tarefa de rotina, e menciona que a avaliação de cargas de materiais combustíveis de uma floresta deve considerar aspectos da produção florestal, cuja análise prescinde de um estudo para elaboração de modelos que tenham alguma relação com o crescimento do povoamento florestal.

Para SOARES (1979), “A melhor estimativa para se conhecer, com rapidez, a quantidade de combustível de uma floresta, é desenvolver equações locais (...) que permitam estimar esta quantidade em função de parâmetros fáceis de se obter, como idade e área basal por exemplo.”

SOUZA (2000) citando CATCHPOLE e MESTRE² (1986) menciona que os modelos de material combustível podem fornecer informações para os modelos de predição do comportamento do fogo. Neste contexto, GREENOUGH (2001) menciona que estimativas detalhadas sobre os combustíveis são necessárias para dar suporte à avaliação do risco de incêndio e às decisões sobre o manejo do material combustível.

Dentre os modelos de predição do comportamento do fogo, foi desenvolvido nos Estados Unidos da América, a partir de pesquisas realizadas entre os anos de 1970

² CATCHPOLE, T.; MESTRE, N. Physical model for a spreading line fire. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 49, n. 2, p. 102-111, 1986.

e 1980, o sistema BEHAVE, uma série de programas computacionais interativos de comportamento do fogo, que permite estimar o potencial dos incêndios mediante diversas condições meteorológicas, de combustível e sob diversas situações de topografia (BATISTA, [200-]). ANDERSON (1982) cita que os combustíveis foram classificados em 4 grupos: capim / pastagem (*grass*), arbustos (*brushes*), florestas (*timbers*) e resíduos de exploração (*slash*). Estas categorias de combustível são utilizadas pelo BEHAVE e, segundo BURGAN e ROTHERMEL (1984), constituem-se os 4 maiores grupos de combustível florestal, sendo a base para a realização de modelagem.

VÉLEZ (2000) menciona, referindo-se aos modelos estáticos de combustível, que a sistematização e a criação destes permitem a integração do combustível no estudo do comportamento do fogo, possibilitando a predição do mesmo em áreas cujas características tenham sido determinadas. O mesmo autor também citou o sistema BEHAVE, mencionando a importância deste em construir os modelos de comportamento do fogo mediante a caracterização dos combustíveis florestais, e cuja simulação requer a especificação do teor de umidade dos combustíveis vivos e mortos, que são condicionados pela altitude, exposição solar, grau de cobertura da vegetação, entre outras características do local.

De maneira geral, um modelo de combustível é definido mediante a análise de uma série de características, partindo do geral para o específico. Desta forma, constituem-se as variáveis de interesse o tipo principal de vegetação predominante (com base nos 4 principais grupos definidos) e suas respectivas cargas, a avaliação dos estratos mais suscetíveis ao fogo e a sua continuidade, a proporção dos combustíveis nas classes “*timelag*” de 1-h, 10-h, 100-h, herbáceo e vegetação viva [classes de diâmetro dos combustíveis e proporção entre combustíveis verdes (vivos) e secos (mortos) encontrados no local que se pretende caracterizar], espessura da manta, densidade das partículas, conteúdo mineral, relação superfície-volume e altura média da vegetação de sub-bosque (BURGAN e ROTHERMEL, 1984), além da umidade de extinção e composição química dos combustíveis florestais (ANDERSON, 1982).

2.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Vários são os fatores climáticos atuantes – com maior ou menor relevância de seus efeitos – sobre o comportamento do fogo durante um incêndio florestal. Dentre eles pode-se citar: insolação, radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura do ar, vento e precipitação.

O clima e as condições meteorológicas de uma determinada região exercem influência sobre a capacidade de ignição do material combustível e o desenvolvimento de um incêndio. FERRER (2004) menciona que a inflamabilidade dos combustíveis é afetada pela radiação solar e pela temperatura do ar, que a ignição e propagação dos incêndios sofrem interferência da umidade relativa do ar e que a intensidade da frente e o comportamento do incêndio são influenciados pela estabilidade atmosférica. A mesma autora considera o vento como fator determinante na propagação de um incêndio, na reação de combustão, no predomínio de um ou outro mecanismo de transferência de calor e no transporte de gases e partículas incandescentes da coluna de convecção, responsável pela formação de focos secundários. Além disso, o vento em conjunto com a interação de outros fatores determina a morfologia final do perímetro do incêndio e a geometria das chamas. VIEGAS (2007) também considera o vento como principal fator meteorológico responsável pela propagação do fogo, citando inclusive que o mesmo é caracterizado ponto a ponto e, para cada instante de tempo, por um valor de velocidade e direção. TORRES *et al* (2007) complementam que o vento afeta a taxa de suprimento de oxigênio durante a queima do material combustível.

SOARES e BATISTA (2007) definem umidade relativa do ar como a relação entre a quantidade de vapor d'água contido num certo volume de ar (pressão real de vapor d'água) e a quantidade que este mesmo volume conteria se estivesse saturado (pressão máxima de vapor d'água). Os mesmos autores consideram a umidade atmosférica um elemento chave na determinação das condições de potencial de um incêndio. Mencionam que a umidade, sob forma de vapor, age como qualquer outro gás, misturando-se com os gases presentes na atmosfera, porém mantendo sua própria

característica e identidade [ou seja, um gás não inflamável nem comburente]. Por isto, em condições de alta umidade relativa do ar, não são observados incêndios florestais de grande intensidade. Ocorre que, além da constante relação de equilíbrio estabelecido entre umidade relativa do ar e umidade do material combustível [*timelag*], a presença da água interfere na reação de combustão, fazendo com que a energia disponível e empregada para consumir determinada quantidade de combustível seja destinada primeiramente à evaporação da água contida neste. A própria presença do vapor de água expelida durante a combustão de um material úmido reduz a concentração dos gases inflamáveis da pirólise, contribuindo para a menor intensidade de queima e dificultando a ignição dos gases.

Definida como “...grau de calor de uma substância, medido em uma escala finita” (SOARES e BATISTA, 2004), a temperatura do ar afeta direta e indiretamente a probabilidade de ocorrência e, principalmente, o potencial de propagação dos incêndios florestais (SOARES e BATISTA, 2007). Em teoria, quanto maior a temperatura do ar, maior é a temperatura apresentada pelo combustível, menor tende a ser seu conteúdo de umidade e, conseqüentemente, menor é a diferença para se atingir a temperatura de ignição deste material. Na prática, ambientes mais quentes submetidos a uma fonte de calor tendem a “secar” em menor intervalo de tempo, proporcionando uma atmosfera mais favorável ao desenvolvimento do fogo e à propagação dos incêndios.

Ao mencionar a precipitação neste contexto, fica fácil compreender que a presença da água sobre os combustíveis florestais extingue qualquer chance de combustão. Entretanto, é importante mencionar que uma grande quantidade de chuva, restrita a uma determinada unidade de tempo, tem menos eficácia sobre a diminuição da probabilidade de ocorrência de incêndios do que uma menor quantidade de chuva, distribuída por um período de tempo mais longo (TORRES *et al.* 2007). Tanto é verdade que, baseado na sazonalidade de períodos de chuva, verificam-se alterações nos indicadores do risco de incêndios de uma determinada região.

2.4 TOPOGRAFIA

Para COUTO e CÂNDIDO (1980) “a velocidade desenvolvida por um incêndio florestal morro acima é quase diretamente proporcional à inclinação topográfica”. Já BROWN e DAVIS (1973) mencionam que a topografia implica em significativas mudanças no perigo de incêndios. De acordo com estes autores, o efeito da topografia sobre o comportamento do fogo pode ser comparado ao efeito do vento sobre o fogo, mantidos os demais fatores constantes. De acordo com SOARES (1985) experiências em queimas controladas realizadas no sudeste dos Estados Unidos registraram velocidades de propagação do fogo entre 20 a 30 m/hora [média de 0,0069 m.s⁻¹] em declives e entre 158 a 198 m/hora [média de 0,049 m.s⁻¹] nos aclives. GOLDAMMER (1982) mencionou que a velocidade de propagação do fogo dobra em aclives de 10° e se torna até 4 vezes maior em aclives de 20°. BEUTLING *et al.* (2007) mencionam com base em experimentos laboratoriais que a partir de 15 graus 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.

FERRER (2004) também afirma ser a topografia um dos fatores que mais influenciam no comportamento de um incêndio (afetando diretamente mecanismos de transferência de calor e a reação de combustão). A autora menciona que dos fatores que interferem sobre o comportamento do fogo, a topografia é mais constante, ou seja, não varia e por isso mesmo sua influência sobre um incêndio é mais fácil de prever.

2.5 VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO

SOARES e BATISTA (2007) afirmam que a ação do fogo durante sua duração é governada por certas leis e princípios básicos da combustão, cuja compreensão é relevante ao julgamento do efeito dos vários fatores ambientais sobre o comportamento do fogo. Desta forma, evidencia-se a importância do triângulo do fogo e das fases da combustão que, associadas a programas de pesquisa intensivos

desenvolvidos principalmente nos Estados Unidos da América, Canadá e Austrália, permitiram a estimativa de alguns componentes do fogo e outras variáveis a ele relacionados com razoável precisão.

2.5.1 Intensidade do Fogo

Dentre todos os parâmetros do comportamento do fogo, a estimativa da intensidade constitui uma das variáveis de maior importância num incêndio florestal. Esta variável expressa a taxa de energia liberada pelo fogo durante o processo de combustão (BATISTA, 1990) ou, segundo BYRAM (1959), o calor liberado por unidade de tempo e por unidade de comprimento da frente de fogo.

Pela equação de Byram, a intensidade do fogo é regulada pela quantidade de material combustível disponível para a queima, pelo poder calorífico deste combustível e pela velocidade de propagação do fogo:

$$I = Hwr$$

Sendo:

I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

H = poder calorífico (kcal kg^{-1});

w = peso do combustível disponível (kg m^{-2});

r = velocidade de propagação do fogo (m s^{-1}).

Outra maneira de estimar a intensidade do fogo é através do comprimento das chamas:

$$I = 62,08h_c^{2,17}$$

Sendo:

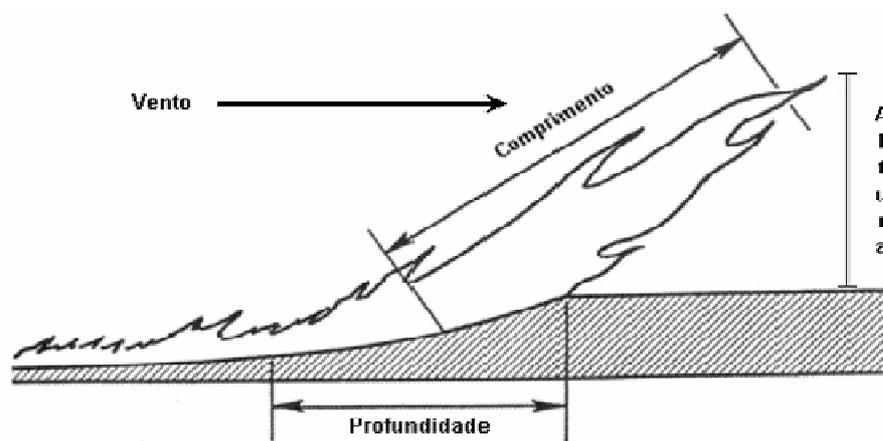
I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

h_c = comprimento das chamas (m).

O comprimento das chamas é a real expressão das condições de queima do material combustível em campo. O arranjo do material combustível e seu teor de umidade, associados à declividade do terreno, vento e condições climáticas, entre outros fatores, condicionam o comprimento das chamas de um incêndio. 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). Ainda há a necessidade de esclarecer e definir os conceitos associados a comprimento, altura e profundidade das chamas. Com auxílio da Figura 6, entende-se por: a) comprimento de chamas: a distância entre a ponta da chama e a superfície do solo, medida no meio de sua zona ativa; b) altura da chama: a distância perpendicular entre o solo e a ponta da chama; e c) profundidade (ou largura) das chamas à distância horizontal da base das chamas.

FIGURA 6 – DIMENSÕES DA CHAMA EM UM INCÊNDIO A FAVOR DO VENTO



FONTE: SOARES E BATISTA (2007)

Outra variável associada às chamas é a altura de carbonização da casca. Dependendo da forma como o incêndio avança, as chamas podem apresentar-se com diferentes ângulos em relação à superfície do solo, promovendo desta forma, na árvore, a carbonização do fuste. Quando a inclinação das chamas é de 45° ou mais, a altura das chamas é praticamente igual ao comprimento. Entretanto, se a inclinação for menor que 45° , a altura será sempre menor que o comprimento das chamas. Ainda assim, a altura das chamas fica “registrada” nas árvores, proporcionando uma

evidência das características do incêndio (comportamento do fogo) que avançou sobre determinada vegetação.

2.5.2 Velocidade de Propagação

Outra variável diretamente influenciada pelas características do material combustível é a taxa de propagação do fogo. Também conhecida como velocidade de propagação do fogo, esta variável “(...) indica o progresso do fogo numa determinada área.” (BATISTA, 1990). Ela se refere à velocidade na qual o fogo se desenvolve e avança por sobre a região de ocorrência do incêndio. SOARES (1985) menciona que a taxa de propagação do fogo é um dos mais importantes parâmetros nos estudos sobre comportamento do fogo e SOARES e BATISTA (2007) citam que nestes estudos, a taxa de propagação linear é uma das mais importantes variáveis a serem consideradas. Atualmente, de acordo com os mesmos autores, nos programas de simulação do comportamento do fogo e em programas de manejo do fogo, a estimativa da velocidade de propagação geralmente é feita através de modelos semi-físicos derivados do modelo de Rothermel (1972) ou através de modelos empíricos obtidos a partir de dados coletados sob condições naturais. Para Fernandes (2001), os sistemas de manejo de fogo baseados em equações empíricas são mais fáceis de usar porque requerem poucas variáveis de entrada e podem ser transformados em tabelas, além de apresentarem resultados satisfatórios quando utilizados dentro da amplitude de variações das condições nas quais foram desenvolvidos.

Segundo SOARES e BATISTA (2007), o modelo semi-físico desenvolvido por Rothermel (1972) se baseia na teoria de conservação de energia:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_W + \Phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

Sendo:

R = velocidade de propagação do fogo (ft min⁻¹);

ξ = razão do fluxo de propagação, adimensional;

I_R = intensidade de reação (Btu ft⁻² min⁻¹);

Φ_W = coeficiente de vento, adimensional;

Φ_S = coeficiente de declividade, adimensional;

ρ_b = peso do material combustível por volume de combustível depositado no solo (lb ft⁻³);

ε = calor de pré - ignição (Btu lb⁻¹);

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

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 seqüência de ignições do combustível disponível existente no piso da floresta. O tamanho e 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). VIEGAS (2007) menciona que o modelo de Rothermel também admite, para um determinado valor de declive, um valor bem definido de velocidade de propagação para cada leito de combustível. O interessante é que o mesmo autor discorda desta teoria, alegando que, nos ensaios laboratoriais realizados em condições bem controladas, observou-se que

efeitos associados à convecção gerada pelo fogo e à modificação da forma da frente de chamas produziram uma variação da velocidade de propagação durante a evolução do fogo, concluindo que, deste modo, não se pode definir uma velocidade precisa em função do declive, sobretudo quando este for elevado.

Devido às diversas pesquisas sobre estimativas de velocidade de propagação do fogo, vários exemplos de modelos empíricos foram construídos (SOARES e BATISTA, 2007), tais como:

- a) Modelo de TRABAUD (1979), desenvolvido a partir de observações em queimas de vegetação arbustiva com 1,5m de altura – velocidade do fogo é função da velocidade do vento, altura da vegetação e seu conteúdo de umidade:

$$r = \frac{5,72 \times V_v^{0,4} \times h_v^{0,352}}{U^{1,12}}$$

Sendo :

r = velocidade de propagação do fogo (cm s^{-1});

V_v = velocidade média do vento (cm s^{-1});

h_v = altura da vegetação (cm);

U = conteúdo de umidade da vegetação (% do peso verde)

- b) Modelo de McARTHUR (1962), desenvolvido com base em observações de queimas em povoamentos de eucaliptos na Austrália – velocidade do fogo é função da umidade do material combustível e da velocidade do vento:

$$R = 0,22 \exp(0,158U_{1,5} - 0,227M_f)$$

Sendo :

R = velocidade de propagação do fogo (m min^{-1});

$U_{1,5}$ = velocidade do vento no interior da floresta a 1,5m de altura (m min^{-1});

M_f = umidade do combustível fino (%).

- c) Modelo de BIDWELL e ENGLE (1991), desenvolvido a partir de queimas em vegetação de campo, nos Estados Unidos da América –

velocidade do fogo estimada com base em umidade do material combustível e umidade relativa do ar:

$$R = 0,07 \times 0,05 FMF - 0,004 RH$$

Sendo:

R = velocidade de propagação do fogo (m min^{-1});

FMF = umidade do material combustível (%);

RH = umidade relativa do ar (%).

d) Modelo de FERNANDES (2001), desenvolvido com base em vegetação arbustiva típica das paisagens mediterrâneas de Portugal – velocidade do fogo estimada com base em velocidade do vento a 2,0m de altura, conteúdo de umidade do combustível fino (< 0,7 cm de diâmetro) e altura da vegetação:

$$R = 7,255 \times \exp(0,092 U) \exp(-0,067 M_d) h^{0,932}$$

Sendo:

R = velocidade de propagação do fogo (m min^{-1});

U = velocidade do vento a 2,0m de altura (km h^{-1});

M_d = conteúdo de umidade do combustível fino (< 0,7cm de diâmetro) morto, em percentual de peso da matéria seca;

h = altura da vegetação (m).

2.5.3 Calor Liberado por Unidade de Área

A combinação entre a velocidade de propagação do fogo e sua intensidade caracteriza o calor liberado por unidade de área, estabelecendo uma relação onde, para uma mesma intensidade, quanto mais rápida for a velocidade de propagação do fogo, menor será a quantidade de calor liberada nesta área, e quanto maior for o tempo de permanência do fogo em um mesmo local (menor velocidade de propagação), maior será a quantidade de calor concentrado sobre ele (BATISTA, 1990; SOARES, 1985):

$$Ha = \frac{I}{r}$$

Sendo:

Ha = calor liberado (kcal m^{-2});

I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

r = velocidade de propagação do fogo (m s^{-1}).

O calor liberado também pode ser calculado multiplicando-se o calor de combustão pela quantidade de material combustível consumido:

$$Ha = H \times w$$

Sendo:

Ha = calor liberado (kcal m^{-2});

H = poder calorífico (kcal kg^{-1});

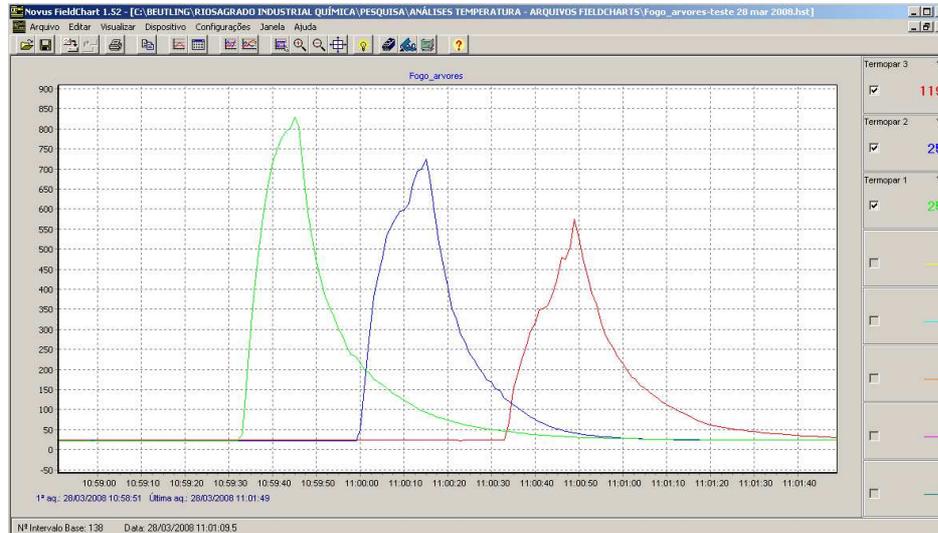
w = quantidade de material combustível consumido (kg m^{-2}).

2.5.4 Tempo de Residência do Fogo

O intervalo de tempo que a frente do fogo leva para passar por determinado ponto, ou o tempo que a frente de fogo permanece sobre determinado local é denominado tempo de residência (BATISTA, 1990; SOARES, 1985). É uma variável que depende da velocidade de propagação do fogo, da quantidade de material combustível disponível e da intensidade de reação do combustível (McARTHUR e CHENEY, 1966). Sua importância reside no fato de que os danos sofridos pela vegetação, em razão do fogo, relacionam-se não apenas à temperatura do mesmo, mas principalmente ao tempo de exposição a esta temperatura (SOARES, 1985).

A medição do tempo de residência pode ser feita de diferentes maneiras. SOARES e BATISTA (2007) mencionam a utilização de termopares dispostos sobre a superfície do solo – neste caso, o tempo de residência é o intervalo entre o aumento significativo da temperatura e o seu declínio aos níveis anteriores (Figura 7). Também pode ser medido com um cronômetro, observando-se o tempo gasto pela frente de fogo para passar por um determinado ponto.

FIGURA 7 – GRÁFICO EXEMPLIFICANDO A VARIÁVEL TEMPO DE RESIDÊNCIA



FONTE: Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios (LPCI) – Rio Sagrado Industrial Química Ltda (2008). Termopares distanciados entre si em 50,0cm e a 50,0cm de altura – resultado de experimento de queima em laboratório.

ROTHERMEL (1983) determinou empiricamente o tempo de residência (em minutos) com base no tamanho do material combustível, ficando estabelecida uma relação de 3,15 vezes o diâmetro médio (em centímetros) das partículas de combustível.

$$t_r = 3,15d$$

Sendo:

t_r = tempo de residência (min);

d = diâmetro médio das partículas de combustível (cm).

O tempo de residência também pode ser estimado através da velocidade de propagação do fogo e da profundidade da chama, da seguinte forma (SOARES e BATISTA, 2007):

$$t_r = \frac{p}{r}$$

Sendo:

t_r = tempo de residência (seg);

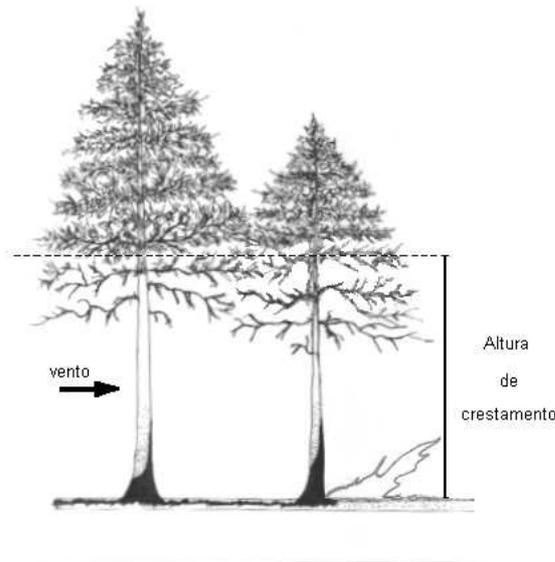
p = profundidade das chamas (m);

r = velocidade de propagação do fogo (m s^{-1}).

2.5.5 Altura de Crestamento

Durante o processo de combustão, a liberação dos gases e vapores quentes que sobem para a atmosfera tende a causar a morte da vegetação localizada acima da zona de queima, ocasionando o fenômeno denominado de crestamento das copas das árvores (Figura 8). É importante frisar que essas folhas não são consumidas pelo fogo, mas morrem pela ação do calor por ele produzido. A altura média de secagem letal da folhagem das árvores é denominada altura de crestamento (SOARES e BATISTA, 2007).

FIGURA 8 – ALTURA DE CRESTAMENTO LETAL (AS FOLHAS, MORTAS PELO CALOR SECAM E SE DESPRENDEM POSTERIOR À PASSAGEM DO FOGO)



FONTE: SOARES e BATISTA (2007)

Segundo SOARES e BATISTA (2007), a altura de crestamento é utilizada para compor modelos de estimativa de probabilidade de sobrevivência das árvores de povoamentos afetados por incêndios florestais. Os mesmos autores exemplificam citando um modelo desenvolvido por FINNEY e MARTIN (1992) desenvolvido para *Sequoia sempervirens*:

$$P = \exp\left\{-\left[DBH / (0,338S_h + 0,1F_c)\right]^{2,149}\right\}$$

Sendo:

P = probabilidade de mortalidade da árvore;

DBH = DAP da árvore (cm);

S_h = altura de crestamento (m);

F_c = material combustível consumido ($Mg\ ha^{-1}$).

A temperatura atingida pela coluna de convecção do fogo depende diretamente de três fatores: intensidade do fogo, temperatura do ar e vento. SOARES e BATISTA (2007) mencionam que a intensidade do fogo é fator primordial na secagem da folhagem, porém que ventos fortes tendem a dissipar horizontalmente o calor, reduzindo a altura de crestamento letal. Por outro lado, a temperatura inicial do ar está diretamente relacionada ao acréscimo de calor necessário para atingir a temperatura letal para as folhagens.

VAN WAGNER (1973) desenvolveu modelos de estimativa da altura de crestamento. Em coníferas, o autor descobriu uma relação de 2/3 da intensidade do fogo para crescer as copas (modelo 1). Posteriormente, foram incluídas as variáveis velocidade do vento e temperatura do ar (modelo 2):

Modelo 1:

$$h_s \approx 0,385I^{\frac{2}{3}}$$

Sendo:

h_s = altura de crestamento letal (m);

I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

Modelo 2:

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

Sendo:

h_s = altura de crestamento letal (m);

I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

V = velocidade do vento (m s^{-1});

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

2.6 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO FOGO

De acordo com JULIO (1996), para avaliação do “fenômeno fogo” é preciso considerar as variáveis e os fatores do comportamento do fogo. As variáveis do comportamento do fogo (velocidade de propagação, intensidade linear do fogo, comprimento das chamas e energia liberada) expressam as características da combustão, enquanto os fatores do comportamento do fogo (condições meteorológicas e topografia do terreno) regulam o processo da combustão e são os responsáveis pela complexidade que um incêndio descontrolado e de livre propagação pode alcançar.

Os modelos de comportamento do fogo são classificados usualmente como físicos ou conceituais. Os modelos físicos são desenvolvidos empiricamente, a partir de observações e coletas de informações de queimas experimentais e incêndios. Os modelos conceituais são elaborados a partir da aplicação de princípios e leis naturais da Física, que depois são testados e validados em condições de campo. Todos os

modelos simulam a realidade, porém não correspondem a ela na sua totalidade justamente devido ao complexo processo de reações e interações que ocorrem ao mesmo tempo durante a ocorrência do fogo e de um incêndio. Em um modelo, a simplificação das relações proporciona a compreensão sobre a importância, particularidade e/ou influência de uma determinada variável ou fator no complexo das reações, geralmente em detrimento de outras variáveis e fatores, ou seja, o modelo geralmente é baseado em uma série simples de condições idealizadas (BATISTA, *não publicado*).

De acordo com BOTELHO *et al.*(1989), a modelação do comportamento do fogo é um meio prático de estudo do fenômeno “incêndio florestal”, constituindo uma das formas de planejar e tomar decisões visando sua prevenção e combate, sendo uma ferramenta essencial na pesquisa sobre fogo devido o grande número de variáveis que agem no ambiente natural. Mas o modelo é também importante para as atividades de organização de controle de incêndios, particularmente as estratégias, táticas e planejamento de controle, e treinamento de pessoal no comportamento de incêndios.

Na modelagem, onde muitos fatores influenciam o fenômeno em estudo, a forma de abordar o problema é excluir ou manter constante todos os fatores ambientais, exceto o de interesse, e fazê-lo variar numa quantidade conhecida, medindo em seguida o efeito no comportamento do fogo. No entanto, este procedimento requer controle rígido e é difícil de ser obtido numa escala normal, motivo pelo qual são empregados vários modelos em escala reduzida para cobrir toda variação. Por outro lado, a alteração das variáveis do comportamento do fogo é mais fácil de ser realizada e, tendo por base o monitoramento dos fatores em escala conhecida, é possível determinar com satisfatória exatidão o comportamento do fogo em função desta variação. Na seqüência, uma correlação entre diferentes valores das variáveis que compõem o comportamento do fogo dentro de um intervalo conhecido de fatores pode ser realizada.

Muitos modelos do comportamento do fogo têm sido desenvolvidos para atender situações específicas a partir de observações de campo em condições conhecidas (ou pré-determinadas). Elas apresentam estimativas razoáveis do

comportamento do fogo quando empregados dentro dos limites para os quais foram desenvolvidos. A utilização de modelos dessa natureza é, portanto, limitada, necessitando sempre de aferições entre os resultados observados e os estimados, ou do desenvolvimento de novos modelos específicos para cada nova situação que se apresentar.

Os modelos para estimativa da velocidade de propagação do fogo, desenvolvidos em diferentes tipos de vegetação, e utilizando diversos fatores do comportamento do fogo são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO EM DIVERSOS TIPOS DE VEGETAÇÃO

AUTOR, ANO, LOCAL E TIPO DE VEGETAÇÃO	MODELO	VARIÁVEIS E FATORES DO COMPORTAMENTO DO FOGO
TRABAUD (1979) França Garrigue	$R = \left(\frac{5,72 \times V^{0,400} \times h_v^{0,352}}{U_{1,12}} \right)$	R = velocidade de propagação do fogo (cm s^{-1}) V = velocidade do vento (cm s^{-1}) h_v = altura da vegetação (cm) U = umidade da vegetação (%)
McARTHUR (1962) Austrália Eucalipo maduro	$R = 0,22 \times w \times \text{EXP}(0,158U_{1,5} - 0,227M_f)$	$U_{1,5}$ = velocidade do vento a 1,5 metros da superfície do solo (km h^{-1}) w = carga do combustível (t ha^{-1}) M_f = umidade do combustível (%)
BIDWELL e ENGLE (1991) EUA Vegetação de campo	$R = 0,07 \times 0,005FMF - 0,004RH$	R = velocidade de propagação do fogo (m min^{-1}) FMF = umidade do material combustível (%) RH = umidade relativa do ar (%)

Dentre os modelos conhecidos desenvolvidos para estimativa da intensidade do fogo, a equação de Byram ou os modelos que utilizam uma relação com o comprimento das chamas são os mais usuais. Entretanto, conforme apresentado pela Tabela 2, alguns trabalhos propuseram a estimativa da intensidade do fogo através da

altura de carbonização da casca ou com base no peso do combustível florestal e seu respectivo teor de umidade.

TABELA 2 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA INTENSIDADE DO FOGO

AUTOR, ANO, LOCAL E TIPO DE VEGETAÇÃO	MODELO	VARIÁVEIS E FATORES DO COMPORTAMENTO DO FOGO
De RONDE (1990) África do Sul <i>Pinus elliottii</i>	$I = -187,49 + (23,93)S_h$	$I =$ intensidade do fogo (kw m^{-1}) $S_h =$ altura de carbonização da casca (cm)
BATISTA <i>et al</i> (1993) Brasil <i>Pinus taeda</i>	$I = -33,7 + 1,71H_{ch}$	$I =$ intensidade do fogo (kw m^{-1}) $H_{ch} =$ altura de carbonização da casca (cm)
BIDWELL e ENGLE (1991) EUA Vegetação de campo	$I = -2274 + 0,39FLF + 24FMF$	$I =$ intensidade do fogo (kw m^{-1}) $FLF =$ peso do combustível florestal recém caído (kg ha^{-1}) $FMF =$ umidade do combustível florestal morto (%)

Alguns modelos foram desenvolvidos para estimar a altura de crestamento, variável muito útil quando se deseja avaliar os níveis de danos sofridos por um povoamento florestal em decorrência de um incêndio. Estes modelos são obtidos em função da intensidade do fogo, do comprimento das chamas, da velocidade do vento e variam de acordo com as espécies e as características dos povoamentos florestais (Tabela 3).

TABELA 3 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA DE CRESTAMENTO EM DIVERSOS TIPOS DE POVOAMENTOS

AUTOR, ANO, LOCAL E TIPO DE VEGETAÇÃO	MODELO	VARIÁVEIS E FATORES DO COMPORTAMENTO DO FOGO
McARTHUR (1962) Austrália Povoamentos de eucalipto	$S_h = 5,232F_h^{0,756}$	S_h = altura de crestamento (m) F_h = comprimento da chama (m)
VAN WAGNER (1972) Canadá Povoamentos de pinus	$h_s = \frac{3,94I^{7/6}}{(0,107I + U^3)^{1/2}(60 - T)}$	h_s = altura de crestamento (m) I = intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) U = velocidade do vento (m s^{-1}) T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
FINNEY e MARTIN (1993) EUA Povoamentos de <i>Sequoia sempervirens</i>	$S_h = -0,664 + 14,7F_L$	S_h = altura de crestamento (m) F_L = comprimento da chama (m)

A altura de carbonização da casca tem sido utilizada para realização de estimativas da probabilidade de sobrevivência das árvores em incêndios e queimas controladas, com base nos modelos apresentados pela Tabela 4.

TABELA 4 – MODELOS DE PROBABILIDADE DE SOBREVIVÊNCIA DAS ÁRVORES AO FOGO

AUTOR, ANO, LOCAL E TIPO DE VEGETAÇÃO	MODELO	VARIÁVEIS E FATORES DO COMPORTAMENTO DO FOGO
BROWN e DEBYLE (1987) Canadá Povoamentos de <i>Populus tremuloides</i>	$P_m = \frac{1}{(1 + EXP^{(0,182D - 0,104A - 3,53)})}$	P_m = probabilidade de mortalidade D = dap médio das árvores (cm) A = altura de carbonização da casca (cm)
FINNEY e MARTIN (1992) EUA Povoamentos de <i>Sequoia sempervirens</i>	$P = EXP\left(-\left(\frac{DBH}{(0,338S_h + 0,185F_c)}\right)^{2,149}\right)$	P = probabilidade de mortalidade DBH = dap médio das árvores (cm) S_h = altura de crestamento (m) F_c = consumo do material combustível (Mg ha^{-1})

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

As principais vantagens da realização de experimentos com fogo em laboratório são muitas, dentre elas: 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. Neste contexto, a condução de dois experimentos de avaliação do comportamento do fogo foi realizada de acordo com as seguintes finalidades específicas: a) avaliar a influência da relação entre carga de material combustível e inclinação do terreno sobre a variável velocidade de propagação do fogo e b) estabelecer modelos de comportamento do fogo tendo por base queimas realizadas em superfície plana, com carga e espessura da manta do material combustível pré-determinadas.

Para isto foram utilizadas as dependências e estrutura de dois laboratórios: o Laboratório de Incêndios Florestais do Curso de Engenharia Florestal, localizado no Campus III da Universidade Federal do Paraná – UFPR, no município de Curitiba-PR, que atendeu ao primeiro experimento (item “a” acima) e o Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios (LPCI – Rio Sagrado), localizado nas dependências da empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda., localizado no município de Quatro Barras-PR, que atendeu ao segundo experimento (item “b” acima).

Em geral, experimentos de laboratório apresentam vantagens significativas sobre quaisquer outras situações onde a medição ou estimativa das variáveis componentes do comportamento do fogo se fazem necessárias. Com exceção da velocidade de propagação e das variáveis altura e comprimento das chamas, os componentes tempo de residência, taxa de consumo (ou material combustível

consumido) e intensidade da frente de fogo são variáveis de difícil estimativa (ou medição) em situações reais de campo. Somam-se a este conjunto as condições climáticas, expressadas fortemente pelo vento, umidade relativa do ar e temperatura além das características gerais da área, representadas tanto pela topografia quanto pelas características do material combustível florestal existente sobre a superfície que, unidos, determinam um nível de perigo e ocorrência de incêndio.

3.1.1 Características dos Laboratórios

3.1.1.1 Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná

Este laboratório possui uma câmara de combustão (Figura 9) com uma plataforma de queima de 1,20 x 0,70 metros, dotada de escalas verticais que permitem a inclinação desta superfície, conferindo desta forma cinco níveis diferentes de simulação entre declive e aclive.

A plataforma possui pinos laterais espaçados de 10,0 em 10,0cm que servem de referência para o monitoramento da velocidade da frente de fogo. Apresenta ainda um isolamento do seu perímetro feito em vidro, que restringe a interferência de correntes de ar oriundas das queimas, além de apresentar uma régua vertical com linhas paralelas que conferem precisão na leitura das alturas das chamas.

A dispersão da fumaça gerada dentro do ambiente é auxiliada por um exaustor conectado a uma coifa localizada sobre toda a extensão da câmara de combustão.

FIGURA 9 – CÂMARA DE COMBUSTÃO DO LABORATÓRIO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS DA UFPR



FONTE: O Autor

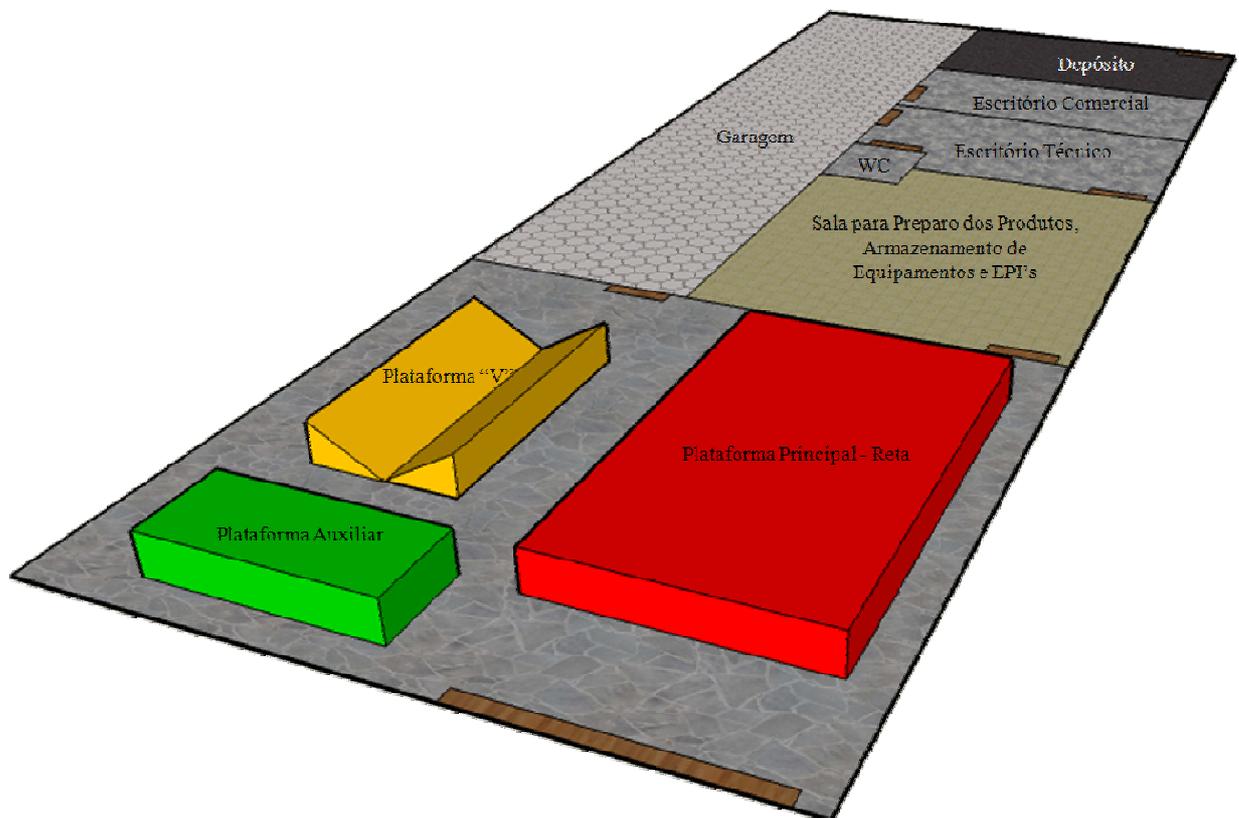
3.1.1.2 Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado)

Este laboratório (Figura 10) foi estabelecido dentro de uma estrutura pré-fabricada com 80,0m² e 8,0m de altura (“pé-direito”), sendo equipado por três plataformas de combustão, a saber: plataforma auxiliar, plataforma “V” e plataforma principal. A plataforma auxiliar consiste em uma base plana de queima com dimensões de 3,0 x 1,0 metros, com pinos laterais espaçados de 20,0 em 20,0cm (Figura 11). A plataforma “V” (Figura 12) é uma estrutura metálica formada por duas plataformas laterais com dimensões de 2,50 x 1,0 metros, conectadas entre si em ângulo de 90°, simulando uma formação de vale com aclives de 100% de inclinação (45°). Esta plataforma auxilia nos estudos sobre o comportamento explosivo do fogo em ambientes de vale, conforme citados por VIEGAS (2007). A plataforma principal (Figura 13) é uma estrutura plana, nas dimensões de 5,0 x 3,0m, revestida com tijolos refratários, e sobre a qual são posicionadas régua horizontais com pinos espaçados entre si em 20,0cm, para permitir monitoramento da velocidade de propagação, além

de uma régua vertical composta por duas bases móveis localizadas nos extremos da plataforma, com marcações espaçadas em 10,0cm, cuja função é permitir leituras mais precisas da altura das chamas durante os experimentos de queima.

Durante as queimas, portas e janelas permanecem fechadas, evitando a interferência de vento. Ao final, as mesmas são abertas para permitir a dissipação da fumaça gerada. Quando o ambiente se encontra livre de fumaça, o mesmo é fechado para início da próxima queima.

FIGURA 10 – CROQUI DO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS (LPCI-RIO SAGRADO)



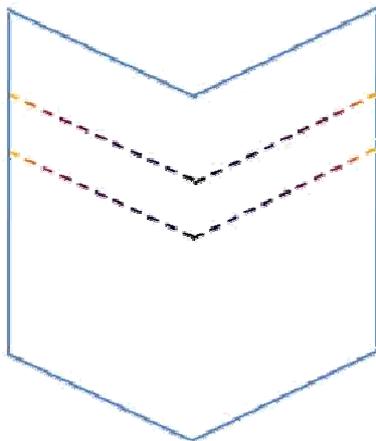
CRÉDITO: Felipe Beutling

FIGURA 11 – PLATAFORMA AUXILIAR



CRÉDITO: Key Imaguire

FIGURA 12 – PLATAFORMA “V”



CRÉDITO: Key Imaguire

FIGURA 13 – PLATAFORMA PRINCIPAL



FONTE: O Autor

3.1.2 Procedimentos Metodológicos

3.1.2.1 Procedimentos Metodológicos Adotados no Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná

3.1.2.1.1 *Materiais utilizados*

Os materiais necessários para o desenvolvimento dos trabalhos em laboratório foram:

- a) duas estufas FANEM modelos 315 SE e 515 para secagem do material combustível;
- a) uma balança marca OHAUS com capacidade de 2610 g e precisão de 0,1 g para pesagem das sub-amostras de material combustível após período de secagem;
- b) uma estação meteorológica portátil (*Weather Meter Az 8910*) para leitura da temperatura e umidade relativa do ar;
- c) computador;
- d) *software Excel* para armazenamento dos dados;
- e) *software Statgraphics 4.1* para desenvolvimento das análises estatísticas.

3.1.2.1.2 *Coleta e preparo do material combustível*

Foram coletadas acículas provenientes de um povoamento de *Pinus elliottii* Engelm. com idade estimada em 10 anos, localizado no Campus III – Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná. O material coletado foi submetido a secagem em estufas durante um período de 48 horas à temperatura constante de 75 °C. Foram utilizados ao todo 15,0 kg de acículas (peso da matéria seca) na condução do experimento, distribuídas em 2 classes de carga (w_n), sendo elas: carga 1 (w_1) = 0,2kg m⁻² e carga 2 (w_2) = 0,4kg m⁻². A montagem da “cama” de combustível foi realizada

sobre uma superfície de 1 m², na qual cada carga foi distribuída homogeneamente, com variação apenas da espessura da manta, de forma a manter a densidade do material combustível constante em todas as queimas.

3.1.2.1.3 *Queimas e monitoramento do fogo*

Durante a realização das queimas, foram realizadas as leituras de velocidade de propagação do fogo, obtidas com auxílio de cronômetro a partir de 9 intervalos iguais de 10cm. No início e final de cada queima foram coletadas informações de temperatura e umidade relativa do ar.

3.1.2.1.4 *Processamento dos dados e análise estatística*

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o *software Statgraphics plus 4.1*. Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando detectada diferença entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao teste de comparação de médias de *Student, Newman e Keuls (SNK)*.

O Quadro 2 apresenta o delineamento estatístico do experimento, onde cada carga w_1 e w_2 foi submetida a queimas com 5 repetições em cada uma das 5 inclinações (d_n) de terreno que foram simuladas, totalizando 50 queimas.

QUADRO 2 – DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

CARGA (w_n)	DENSIDADE (kg m^{-3})	ESPESSURA DA MANTA (m)	INCLINAÇÃO (graus)	Nº DE REPETIÇÕES
w_1	6,66	0,03	0	5
w_1	6,66	0,03	5	5
w_1	6,66	0,03	10	5
w_1	6,66	0,03	15	5
w_1	6,66	0,03	20	5
w_2	6,66	0,06	0	5
w_2	6,66	0,06	5	5
w_2	6,66	0,06	10	5
w_2	6,66	0,06	15	5
w_2	6,66	0,06	20	5

3.1.2.2 Procedimentos Metodológicos Adotados no Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado)

No Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios (LPCI - Rio Sagrado), as queimas foram realizadas na plataforma principal de combustão, cuja área é de 15,0m² (3,0 x 5,0m), com superfície plana, na qual foram realizadas subdivisões em 5 parcelas com dimensões de 3,0m de comprimento por 0,75m de largura (Figura 14).

FIGURA 14 – PLATAFORMA DE COMBUSTÃO



FONTE: O Autor

3.1.2.2.1 *Coleta e preparo do material combustível*

Devido a questões logísticas favoráveis (facilidade de manipulação e de obtenção de grandes quantidades), optou-se pela utilização do “feno de tifton” (*Cynodon* sp.) como material combustível padrão (em substituição às acículas de pinus), previamente seco em estufa industrial (75°C, durante 48 horas) e posteriormente armazenado à temperatura ambiente em área de estocagem, condição que manteve o teor de umidade deste material combustível entre 7 e 15%.

Respeitando-se as condições de proporcionalidade, foram utilizados $1,0\text{kg m}^{-2}$ de material combustível, mantendo-se a espessura da manta em 9,0cm e obtendo uma densidade de carga de $11,11\text{ kg m}^{-3}$. A determinação para o valor da espessura da manta decorreu do fato de que, quando da distribuição do feno sobre as parcelas, era esta a medida mais facilmente obtida em termos de “arranjo” do material combustível, não havendo necessidade de compactação ou “aeração” do mesmo, bastando pequenos ajustes manuais.

3.1.2.2.2 *Queimas e monitoramento do fogo*

Durante cada uma das repetições realizadas (queimas), a medição da variável “velocidade do fogo” foi obtida com auxílio de cronômetro e de “réguas” metálicas horizontais contendo 9 intervalos de 20,0cm, posicionadas ao longo das parcelas. Da mesma forma, a variável “altura das chamas” foi medida com auxílio de um gabarito vertical contendo marcações em intervalos de 10,0cm, sendo obtida uma leitura para cada um dos intervalos de 20,0cm.

3.1.2.2.3 *Processamento dos dados e análise estatística*

Durante a realização de cada queima foi realizado o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar dentro do laboratório em intervalos de 1 minuto com auxílio de uma estação meteorológica digital portátil.

Ao todo foram realizadas 188 repetições no período de setembro de 2007 a março de 2008, sendo necessária a utilização de aproximadamente 460,0kg de feno.

Os dados foram armazenados e processados com auxílio dos softwares “*Excel 2003*” e “*Statgraphics plus 4.1*”. Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando detectada diferença entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao teste de comparação de médias de *Student, Newman e Keuls* (SNK).

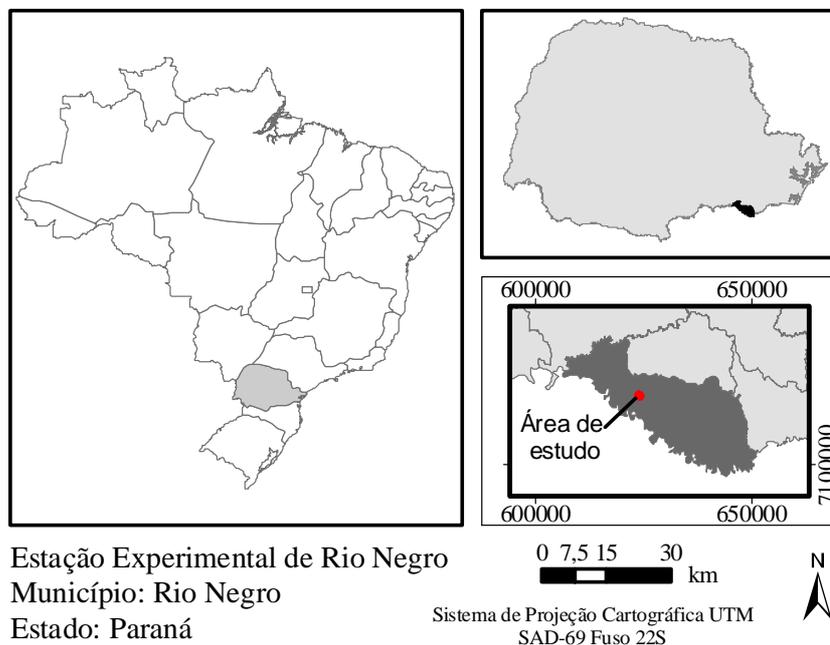
3.2 AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL E QUEIMAS EM POVOAMENTOS DE PINUS

3.2.1 Caracterização da Área de Estudo

3.2.1.1 Localização

O trabalho foi realizado em plantios de *Pinus elliottii* (Engelm.) localizados na Fazenda Experimental de Rio Negro (Figura 15), no município de mesmo nome e pertencente à Universidade Federal do Paraná, distante 105 km da capital Curitiba. A área de estudo situa-se nas proximidades das coordenadas de 26°03'43" de latitude sul e 49°45'31" de longitude oeste, com altitude média de 800,0 metros.

FIGURA 15 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM RELAÇÃO AO BRASIL, AO ESTADO DO PARANÁ E AO MUNICÍPIO DE RIO NEGRO



CRÉDITO: Lorena Stolle

3.2.1.2 Clima

De acordo com Köppen, o clima é caracterizado predominantemente como sendo do tipo Cfb, clima mesotérmico com temperatura média anual do mês mais frio abaixo de 18°C, e clima subtropical úmido sem estação seca com verões brandos, apresentando no mês mais quente média inferior a 22°C (IAPAR, 1994). A precipitação média anual varia de 1.250mm a 1.500mm, sendo os meses de abril, maio e junho os mais chuvosos (IBGE,1990).

3.2.2 Características dos Povoamentos Seleccionados na Fazenda Experimental

O estudo foi conduzido em povoamentos de pinus com 25 anos, plantados em espaçamento de 3,0 m x 2,0m, sem práticas de podas e desbastes. Tanto para a amostragem de material combustível quanto para a realização das queimas controladas, as áreas foram seleccionadas tendo por base a obrigatoriedade de possuírem relevo plano, sendo subdividas em blocos (“A”, “B”, “C” e “D”) localizados no interior de três talhões. O Quadro 3 apresenta as características e os dados inventariados de cada um dos blocos.

QUADRO 3 – DETALHAMENTO DOS BLOCOS (SUB-ÁREAS) SELECIONADOS PARA ESTUDO

IDADE (ANOS)	BLOCOS	DIMENSÕES (m)	ÁREA (m ²)	DADOS INVENTARIADOS		
				Nº árvores por hectare	Área basal (m ² ha ⁻¹)	DAP médio (cm)
25	A	37,0 x 56,0	2.072,0	1.050,0	74,3	29,0
	B	21,0 x 56,0	1.176,0	1.850,0	90,6	23,7
	C	31,0 x 100,0	3.100,0	1.050,0	77,8	29,82
	D	34,0 x 29,0	986,0	900,0	68,3	30,93

3.2.3 Procedimentos Metodológicos para Amostragem de Material Combustível em Povoamentos de Pinus

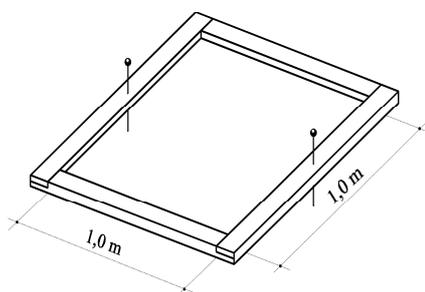
3.2.3.1 Materiais utilizados

3.2.3.1.1 *Em campo*

Os materiais necessários para o desenvolvimento dos trabalhos de campo foram:

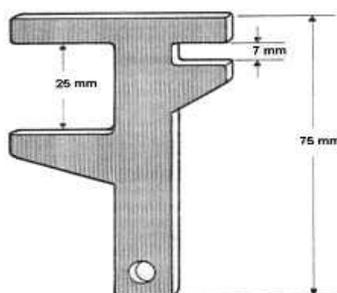
- b) um gabarito de 1,0m x 1,0m (1,0 m²), utilizado para delimitar a área das parcelas amostrais (Figura 16);
- c) um calibrador de diâmetro, utilizado para classificar os combustíveis florestais nas suas respectivas classes de diâmetro (Figura 17);
- d) duas balanças com capacidade de 2,5 e 5,0 kg, com precisão de 20,0 e 50,0g respectivamente, para pesagem do material recolhido nas parcelas em campo;
- e) uma régua de alumínio, para medição da espessura da manta de combustível (liteira);
- f) um visor de Bitterlich, para medição da área basal;
- g) facões, serrotes de poda e canivetes;
- h) pranchetas, canetas, sacos plásticos para armazenar as amostras e etiquetas adesivas;
- i) trenas de 10,0m e de 30,0m;
- j) estacas em madeira para delimitação da área das parcelas;
- k) uma filmadora e uma máquina fotográfica;
- l) uma estação meteorológica portátil (*Weather Meter Az 8910*);
- m) formulários de campo.

FIGURA 16 – GABARITO UTILIZADO PARA DELIMITAR A ÁREA DAS PARCELAS AMOSTRAIS



FONTE: SOUZA (2000)

FIGURA 17 – CALIBRADOR DE DIÂMETRO UTILIZADO PARA SEPARAR AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL



FONTE: BROWN (1974) - ADAPTADO

3.2.3.1.2 *Em laboratório*

Os materiais necessários para o desenvolvimento dos trabalhos em laboratório foram:

- f) duas estufas FANEM modelos 315 SE e 515 para secagem do material combustível;
- g) uma balança marca OHAUS com capacidade de 2610 g e precisão de 0,1 g para pesagem das sub-amostras de material combustível após período de secagem;
- h) computador;
- i) *software Excel* para armazenamento dos dados obtidos em campo;

- j) *software Statgraphics 4.1* para desenvolvimento das análises estatísticas.

3.2.3.2 Procedimentos executados para amostragem de material combustível florestal

3.2.3.2.1 *Em campo*

A amostragem e a coleta do material combustível foram realizadas no período de Março a Julho de 2007, obedecendo as seguintes etapas:

- a) localização das parcelas dentro de cada bloco pré-estabelecido e determinação da área basal com auxílio do visor de Bitterlich, tendo como critério uma leitura para cada parcela estabelecida;
- b) coleta, seleção e pesagem do material combustível nas classes de diâmetros encontradas;
- c) armazenamento e transporte das sub-amostras selecionadas para o Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, para realização das análises.

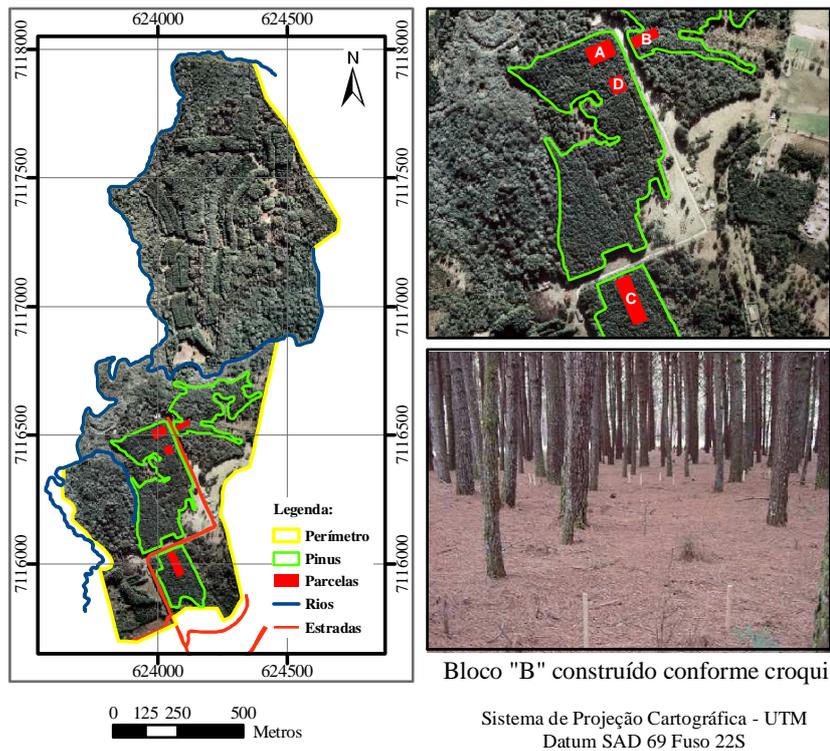
Cada etapa possui uma seqüência de trabalho específica, descrita a seguir.

A. Distribuição das parcelas amostrais na área de estudo

Com objetivo de minimizar a influência do relevo sobre as variáveis do comportamento do fogo durante a realização das queimas das parcelas, houve a necessidade de definir primeiramente os locais adequados para o experimento. Desta forma, vários talhões foram avaliados e, partindo do princípio de que as áreas do experimento deveriam possuir relevo plano, quatro blocos foram formados em 3 talhões diferentes, ficando assim estabelecidos: Blocos “A” e “D” no talhão “I”, Bloco “B” no talhão “II” e Bloco “C” no talhão “III”. A Figura 18 apresenta a localização

dos blocos na Fazenda Experimental juntamente com a fotografia do Bloco “B”, já estabelecido.

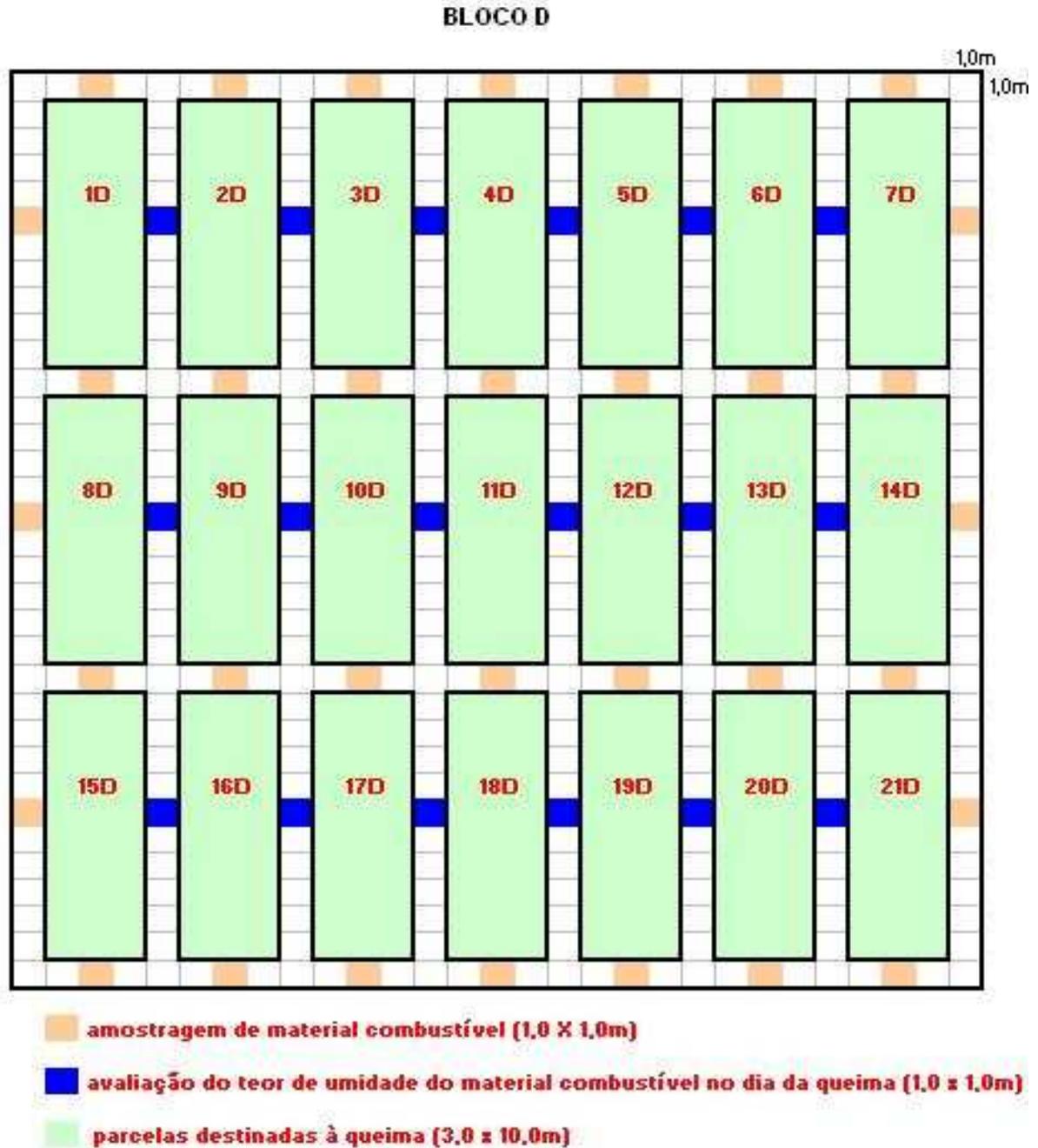
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DOS BLOCOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO E FOTOGRAFIA DO BLOCO “B” CONSTRUÍDO CONFORME CROQUI



CRÉDITO: Lorena Stolle

Definidas as dimensões dos blocos, procedeu-se à construção de um croqui representativo de cada bloco (Figura 19), na qual estão representadas as áreas das parcelas para amostragem do material combustível, parcelas para amostragem do conteúdo de umidade dos combustíveis no dia da queima e parcelas destinadas à queima, que foram posteriormente estabelecidos em campo.

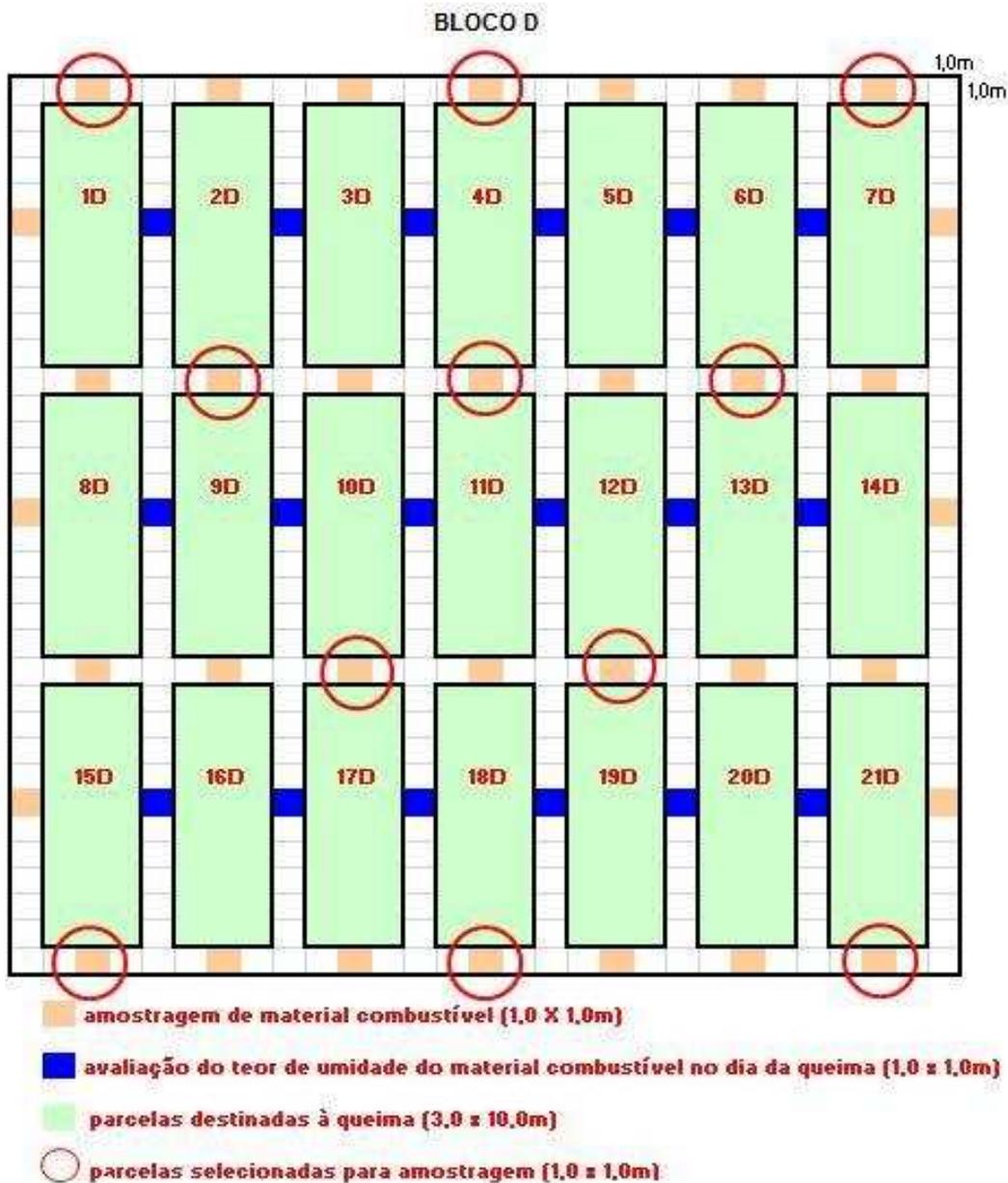
FIGURA 19 – CROQUI DOS BLOCOS COM A LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL, AMOSTRAGEM DO TEOR DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL NO DIA DA QUEIMA E PARCELAS DESTINADAS À QUEIMA



A distribuição das parcelas para amostragem do material combustível foi realizada de forma sistemática sobre cada bloco. Com auxílio do croqui, as parcelas foram definidas partindo-se da extremidade superior da área para a inferior, em

diagonal e, quando necessário, estabelecendo parcelas de forma que a área fosse homogeneamente amostrada (Figura 20).

FIGURA 20 – CROQUI DO BLOCO “D” COM A LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS SELECIONADAS PARA AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL



De acordo com a metodologia de amostragem mencionada, o Quadro 4 apresenta os dados desta etapa do estudo.

QUADRO 4 – NÚMERO DE PARCELAS COLETADAS POR BLOCO PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FLORESTAL

BLOCO	ÁREA TOTAL (m ²)	NÚMERO DE PARCELAS COLETADAS	SOMA DAS ÁREAS DAS PARCELAS COLETADAS (m ²)	INTENSIDADE AMOSTRAL (%)
A	2.072,0	16	16,0	0,77
B	1.176,0	10	10,0	0,85
C	3.100,0	26	26,0	0,84
D	986,0	11	11,0	1,12

B. Coleta de material combustível

A coleta do material combustível nas parcelas foi realizada com auxílio do gabarito de 1 m². Tanto o formato quadrado das parcelas quanto a metodologia de classificação do material combustível nas classes de diâmetro foram adotadas com base nas pesquisas de SOARES (1979; 1982), BATISTA (1984; 1995), SCHNEIDER e BELL (1985) e de RIBEIRO (1997).

As parcelas para amostragem de material combustível são “destrutivas”, pois todo seu conteúdo é retirado de forma a permitir a classificação dos materiais encontrados em classes de diâmetro. Estes materiais são divididos em “material combustível verde (vivo)” e “material combustível seco (morto)”. No caso deste estudo, não houve presença significativa dos combustíveis vivos, motivo pelo qual estes não foram amostrados. A sub-divisão da classe de combustível seco (morto) foi realizada da seguinte maneira:

- a. miscelânea: composto por material fino, de diâmetro inferior a 0,7 cm, como folhas, cascas, musgos, gramíneas, pequenos galhos e acículas (associadas à micorrizas) em estado de decomposição que formavam uma massa uniforme cujos elementos já não permitiam uma identificação e classificação seguras;
- b. S1: material lenhoso cujo diâmetro era inferior ou igual a 0,7 cm;
- c. S2: material lenhoso cujo diâmetro encontrava-se entre 0,71 e 2,5 cm;
- d. S3: material lenhoso cujo diâmetro encontrava-se entre 2,51 e 7,6 cm;
- e. S4: material lenhoso cujo diâmetro era superior a 7,6 cm;

- f. Acículas, subdivididas em:
- a) Classe L: acículas de deposição recente (1ª camada superficial). Geralmente apresentam coloração dourada e são “maleáveis” (não quebradiças);
 - b) Classe F: acículas de deposição mais antiga à classe “L” (2ª camada superficial), cuja coloração torna-se acinzentada à medida que avança em profundidade. É quebradiça e apresenta maior teor de umidade, facilmente perceptível ao tato, principalmente após períodos de chuva. É importante citar que tanto na classe “L” quanto na “F”, as acículas mantêm seu comprimento original – ou seja, ainda não se encontram seccionadas pela ação do tempo;
 - c) Classe H: acículas de deposição antiga (3ª camada superficial), mais próxima ao solo propriamente dito. Sua coloração varia do cinza escuro a tons próximos do preto. Já se encontram seccionadas, possuem elevado teor de umidade e são quebradiças ao toque devido ao estado de decomposição;
- g. cones: órgão reprodutor feminino da espécie.

Após a localização da parcela e o estabelecimento do gabarito de 1 m², procedeu-se da seguinte maneira:

- a. com a área limitada através de corte do material combustível no perímetro do gabarito (isolamento) foi feita primeiramente a medição da espessura da liteira³ (conforme recomendado por BROWN *et al*, 1982), cujo valor médio foi obtido à partir de 4 medições feitas no meio de cada uma das laterais da parcela;
- b. todo o material seco (morto) foi recolhido e dividido de acordo com a classificação adotada. Separados nas respectivas classes de diâmetro, cada material foi pesado (peso úmido total) e teve selecionada uma

³ Material depositado sobre o piso florestal.

sub-amostra⁴ representativa, que novamente foi pesada (peso úmido da amostra). Em seguida, esta recebia uma identificação e era acondicionada em saco plástico para transporte.

Em relação à classificação das acículas nas camadas “L”, “F” e “H”, alguns aspectos necessitam ser considerados: a determinação da classe “H” é de fácil realização; entretanto, o mesmo não ocorre para a determinação das classes “L” e “F”. Por se tratarem de camadas de deposição influenciadas pela queda recente das acículas e pela umidade que exerce influência sobre o estado de decomposição, a transição entre estas duas classes é difusa e a determinação satisfatória entre elas somente pode ser executada após períodos de chuva, quando as mesmas apresentam as características anteriormente citadas. Após períodos de estiagem, as classes “F” e “H” assemelham-se bastante (principalmente pela classe “H” se apresentar seca), tornando difícil a diferenciação entre as mesmas. Assim, para a apresentação dos valores de carga por classe de material combustível, as classes “L” e “F” foram somadas. A Figura 21 apresenta as fotos com a identificação das acículas nas camadas “L”, “F” e “H” descritas neste estudo.

⁴ As sub-amostras foram obtidas mediante a homogeneização do total de material obtido em cada uma das classes de material combustível, e possuíam peso úmido mínimo de 100 g.

FIGURA 21 – CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL “ACÍCULAS”		CLASSIFICAÇÃO
		“L”
		“F”
		“H”
		Miscelânea
		Solo exposto após coleta do material combustível

3.2.3.2.2 *Em laboratório*

O trabalho realizado em laboratório foi conduzido na seguinte sequência:

- a. secagem em estufa, por um período de 48 horas à temperatura constante de 75°C das sub-amostras representativas das parcelas em campo;
- b. determinação do peso de matéria seca das sub-amostras;
- c. determinação do teor de umidade⁵ das sub-amostras;
- d. determinação dos valores médios, para cada bloco, das seguintes variáveis: espessura da liteira, área basal e densidade do material combustível;
- e. determinação da carga de material combustível total e da carga de material combustível por classe de diâmetro em cada um dos blocos (com base no peso seco da matéria);
- f. extrapolação dos resultados obtidos para hectare;
- g. desenvolvimento de cálculos estatísticos. Para esta etapa, cada bloco foi considerado um tratamento, de forma que os mesmos foram identificados da seguinte maneira: Bloco “A” – Tratamento 1; Bloco “B” – Tratamento 2; Bloco “C” – Tratamento 3 e Bloco “D” – Tratamento 4. Para realização dos testes de comparação de médias, foi utilizado o Teste SNK⁶ – Student, Newman e Keuls. Tendo como base os resultados obtidos para cada uma das variáveis levantadas em campo (características do povoamento e do material combustível), foram testados diversos modelos (linear simples e múltiplo, polinomial, exponencial, logaritmo e potencial) com auxílio do *software Statgraphics 4.1*, visando obter modelos para estimativa da carga de material combustível com base em variáveis de fácil

⁵ Com base no peso da matéria seca, segundo a fórmula: $U\% = \frac{PU - PS}{PS} \times 100$, onde U% corresponde ao teor de umidade do material combustível, PU ao peso úmido e PS ao peso seco.

⁶ A metodologia de cálculo para o teste de comparação de médias SNK pode ser encontrada em SOARES, R. V. **Biometria**: Delineamento de experimentos. Curitiba: FUPEF. 1982. p. 22-23.

obtenção, sendo que os modelos escolhidos foram aqueles que se apresentaram altamente significativos ao nível de 95,0% pelo Teste F, além do resultado expresso por R^2 (coeficiente de determinação). Análises gráficas também foram realizadas.

3.2.4 Procedimentos Metodológicos para Condução de Queima das Parcelas de Campo

3.2.4.1 Materiais utilizados em campo

Os materiais necessários para a realização dos trabalhos de queima em campo foram:

- a. um gabarito de 0,20m x 0,20m (0,04 m²), utilizado para: 1) delimitar a área das parcelas para coleta do material combustível destinado à determinação do conteúdo de umidade do mesmo no dia da queima; e 2) pesagem do material combustível remanescente após a passagem do fogo para posterior determinação do material combustível consumido;
- b. duas balanças com capacidade de 2,5 e 5,0 kg, com precisão de 20,0 e 50,0g respectivamente, para pesagem do material combustível;
- c. uma régua de alumínio, para medição da espessura da manta de combustível (liteira);
- d. facões, serrotes de poda e canivetes;
- e. pranchetas, canetas, sacos plásticos para armazenar as amostras e etiquetas adesivas;
- f. cronômetros;
- g. trenas de 10,0m e de 30,0m;
- h. régua vertical em madeira com intervalos em centímetros e 6,0m de altura para auxílio na leitura da altura das chamas;
- i. abafador e mochilas costais;
- j. filmadora e máquina fotográfica;

- k. estação meteorológica portátil (*Weather Meter Az 8910*);
- l. álcool, isqueiro e fósforos;
- m. formulários de campo.

3.2.4.2 Procedimentos executados em campo

As parcelas destinadas aos ensaios de queima possuíam 30,0m² (10,0m de comprimento por 3,0m de largura).

As queimas das parcelas foram realizadas no mês de Maio de 2008, ocasião em que a condição de 16 dias seguidos sem chuva foi atingida⁷. As seguintes etapas ocorreram sequencialmente:

- a) localização das parcelas de queima dentro de cada bloco;
- b) coleta e pesagem do material combustível sem distinção entre as classes de diâmetro existentes (peso úmido total da amostra) com auxílio do gabarito de 0,20 x 0,20 metros. Armazenamento, identificação e posterior transporte das amostras obtidas no dia da queima para o Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná, para determinação do conteúdo de umidade dos mesmos no dia da queima;
- c) Determinação da espessura média da manta antes da queima, com base em 4 leituras realizadas nas laterais do gabarito de 0,20 x 0,20 metros, e utilizando os mesmos locais de coleta do material combustível descritos acima;
- d) Estabelecimento, com auxílio das trenas e de estacas de madeira, dos intervalos espaçados de 1,0 em 1,0 metro, para leitura da velocidade da frente de fogo durante as queimas;

⁷ As precipitações ocorridas no local de estudo, associada ao forte orvalho diário e o surgimento do sol somente após as 10 horas da manhã contribuía para manter elevado o teor de umidade dos combustíveis no interior dos talhões selecionados, impedindo as queimas. Verificou-se que o material combustível levava em média cerca de 15 dias para permitir a ocorrência e propagação do fogo. Ainda assim, as queimas produzidas apresentavam baixa intensidade.

- e) Acendimento da linha de fogo, com auxílio de álcool anidro (utilizado para criar o acendimento uniforme de uma linha de fogo);
- f) Monitoramento dos seguintes parâmetros do fogo: velocidade de propagação da frente e altura das chamas (leitura das alturas mínimas e alturas máximas);
- g) Durante a ocorrência das queimas, foram realizadas leituras de umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade média do vento no local com auxílio de uma estação meteorológica portátil. O critério adotado foi uma leitura para cada 2,0 metros de avanço linear da frente de fogo, totalizando 5 leituras por parcela;
- h) Ao final das queimas, os seguintes trabalhos foram conduzidos:
 - i. com auxílio do gabarito de 0,20 x 0,20 metros, foram realizadas três coletas do material combustível residual, exatamente nas distâncias de 2,50; 5,0 e 7,50 metros da parcela, afastados da lateral da mesma em 1,50 metros;
 - ii. determinação da espessura média da manta depois da queima, com base em 4 leituras realizadas nas laterais do gabarito de 0,20 x 0,20 metros;

3.2.4.3 Processamento dos dados e análise estatística

Os dados obtidos das queimas sob povoamentos de pinus foram analisados utilizando o *software Statgraphics plus 4.1*. Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando detectada diferença entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao teste de comparação de médias de *Student, Newman e Keuls* (SNK).

3.3 EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO

Os estudos de avaliação do comportamento do fogo constituem hoje uma ferramenta mais que necessária para auxiliar nas atividades de predição e combate aos incêndios florestais. Entretanto, o fogo é um fenômeno complexo que envolve tanto reações químicas quanto físicas e seu tratamento no todo dificulta as pretensões de previsão. Por outro lado, mantendo-se constante as variáveis participantes da referida reação de combustão, e fazendo variar apenas um componente de interesse, cria-se a possibilidade de identificar a influência e a importância de cada um dos elementos integrantes de um incêndio. Esta metodologia, porém, está longe do ideal, uma vez que seus resultados são obtidos em queimas experimentais laboratoriais, restritas a uma série de pormenores que impossibilitam uma proximidade significativa com a realidade expressada pelos grandes incêndios.

Se por um lado experimentos laboratoriais possuem limitações quanto ao nível de intensidade de fogo que pode ser produzido, impossibilitando a análise do comportamento do fogo em condições que se assemelhariam à realidade, experimentos em condições naturais, mesmo que controladas no que diz respeito a tamanho de parcela e tipo de vegetação, encontram-se sujeitos a uma série de fatores variáveis não passíveis de controle, como carga, conteúdo de umidade e arranjo do combustível florestal além, é claro, dos fatores climáticos.

Objetivando amenizar esta situação em relação ao pré-conhecimento detalhado de um número maior de fatores em queimas experimentais, foi realizado um estudo de avaliação do comportamento do fogo tendo por base parcelas estabelecidas artificialmente em áreas de campo.

Este estudo apresenta a viabilidade de se executar experimentos de avaliação do comportamento do fogo em campo com o controle de variáveis que em muito se assemelham aos obtidos apenas em condições de laboratório.

Para tanto, variáveis como tipo (ou natureza) do combustível florestal, carga, espessura da manta, estado fisiológico e espaçamento devem ser previamente definidos.

Também as dimensões das parcelas e seu posicionamento em relação à direção predominante do vento, o arranjo geral dos combustíveis e os resultados do comportamento do fogo que se pretende avaliar devem constar no planejamento.

A possibilidade de fazer a frente de fogo subir às copas e alterar com isso o tipo de “incêndio”, ou fazê-lo simplesmente se propagar superficialmente, de maneira mais lenta ou mais rápida, são algumas das possibilidades que esta metodologia proporciona.

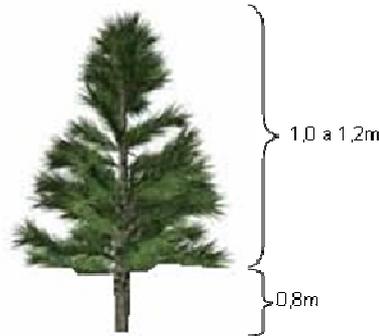
O mais importante é que estas variáveis (dimensão das parcelas; carga e tipo de combustível; espessura da manta; espécie, altura, diâmetro e espaçamento das árvores) podem ser alteradas de acordo com diferentes objetivos de queima, visando a obtenção de diferentes níveis de intensidade do fogo e alterações nas demais variáveis relacionadas (velocidade da frente, altura das chamas, entre outras).

Com base no conhecimento pré-determinado de todas as variáveis supracitadas, os fatores não passíveis de controle durante os experimentos de queima das parcelas resumem-se aos climáticos, na qual direção e velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar refletem as condições predominantes do dia escolhido para queima. Entretanto, estes mesmos fatores podem ser monitorados com auxílio de uma estação meteorológica portátil ou mesmo previstos (mediante acompanhamento climático). O resultado final é uma série de dados e informações do comportamento do fogo oriundos da interação entre condições conhecidas e variação climática.

A avaliação do comportamento do fogo neste estudo dimensionou as parcelas em 2,0m de largura por 6,0m de comprimento. Foram utilizados 2,0 kg m² de material combustível composto exclusivamente por acículas de pinus homogeneamente distribuídas sobre a área da parcela, com espessura da manta fixada em 16,0 cm. A espécie florestal escolhida também foi o pinus. As árvores de pinus foram fixadas nas estacas previamente “instaladas” no espaçamento de 1,0 x 1,0m, observando-se altura

entre 1,80 a 2,0m e com a distância entre a base da copa e a superfície do solo estabelecida em 0,80m (Figura 22).

FIGURA 22 – DIMENSÃO DAS ÁRVORES

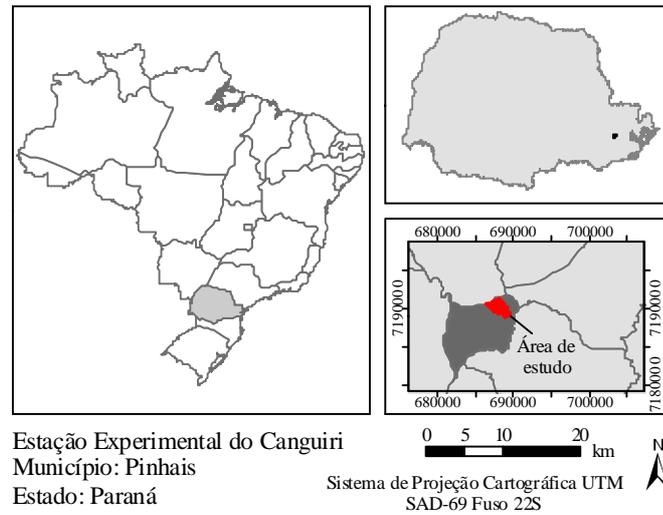


3.3.1 Caracterização da Área

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná, localizada no município de Pinhais, estado do Paraná, região sul do Brasil (Figura 23). A área total da fazenda soma 427,97 hectares, destinados à pesquisa nas áreas de agricultura, pecuária e silvicultura.

O clima da região é classificado segundo Köppen como do tipo Cfb, clima mesotérmico com temperatura média anual do mês mais frio abaixo de 18°C, e clima subtropical úmido sem estação seca com verões brandos, apresentando no mês mais quente média inferior a 22°C (IAPAR, 1994).

FIGURA 23 – LOCALIZAÇÃO DA FAZENDA EXPERIMENTAL DO CANGUIRI



CRÉDITO: Lorena Stolle

A construção e instalação das parcelas artificiais foi realizada em uma área de 100,0 x 35,0 m, apresentando relevo plano a levemente inclinado (Figura 24).

FIGURA 24 – ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O Autor

3.3.2 Materiais e Equipamentos Utilizados

Os equipamentos que se fizeram necessários para a condução deste experimento foram:

- a) uma balança com capacidade para 5,0 kg, utilizada para pesagem das acículas utilizadas como material combustível;
- b) réguas para medição da espessura da manta durante a montagem das “camas” de combustível superficial;
- c) 4 termopares e um datalogger, para medição da temperatura das chamas durante a queima das parcelas;
- d) notebook para armazenamento de dados coletados pelo datalogger em tempo real;
- e) gerador 220V a gasolina para alimentação dos equipamentos eletrônicos;
- f) motosserra para corte das árvores de pinus nas dimensões pré-determinadas;
- g) marreta de 6 kg para posicionamento das estacas de apoio para as árvores de pinus;
- h) trenas para auxílio na determinação dos espaçamentos pré-determinados entre as árvores de pinus;
- i) uma régua vertical em madeira com intervalos em centímetros e 6,0m de comprimento para auxílio na leitura da altura das chamas;
- j) estacas em madeira para auxiliar a tomada de tempo do avanço da frente de fogo;
- k) pranchetas, calculadoras, canetas e cronômetros;
- l) estação meteorológica portátil digital para monitoramento das condições de temperatura e umidade relativa do ar em intervalos de 1 minuto durante a realização das queimas;
- m) pinga-fogo para acendimento da linha de fogo nas parcelas.

3.3.3 Procedimentos de Construção das Parcelas

Os trabalhos para montagem das parcelas foram realizados em três etapas distintas sendo elas “seleção de materiais”, “dimensionamento e montagem das parcelas” e “dia da queima”, descritas a seguir:

a. Seleção dos materiais:

- i. corte⁸ de árvores de pinus nas dimensões apropriadas (máximo de 2,0 m de altura, sem classificação de DAP);
- ii. coleta de material combustível superficial, composto exclusivamente por acículas de pinus obtidos nos talhões de pinus localizados na própria Fazenda;
- iii. aquisição de madeira de eucalipto de reflorestamento para confecção de estacas.

b. Dimensionamento e montagem das parcelas:

- i. determinação do tamanho da parcela (largura x comprimento);
- ii. determinação da direção da parcela em relação à direção predominante dos ventos locais (com base na observação das condições predominantes locais);
- iii. posicionamento das estacas de eucalipto (em espaçamento de 1,0 x 1,0 m);
- iv. corte e ajuste das árvores de pinus (altura máxima variando entre 1,80 a 2,0 m e altura da base da copa em relação ao solo de 0,80 m);
- v. instalação das árvores de pinus nas estacas, com auxílio de arames e/ou pregos;

⁸ As árvores foram obtidas de margens de rodovias e debaixo de áreas de linhas de energia.

- c. Dia de queima:
- i. pesagem e distribuição do material combustível superficial sobre a área da parcela (carga de $2,0 \text{ kg m}^{-2}$ e espessura da manta de $16,0 \text{ cm}$) - Figuras 25 e 26;
 - ii. posicionamento dos termopares.

FIGURA 25 – PESAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL SUPERFICIAL



FONTE: O Autor

FIGURA 26 – POSICIONAMENTO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL NA PARCELA



FONTE: O Autor

3.3.4 Queimas e Monitoramento do Fogo nas Parcelas Artificiais

Para avaliação desta metodologia, descrição e comparação do comportamento do fogo, as queimas foram conduzidas em parcelas de 2,0 x 6,0m, simulando uma floresta plantada de pinus no espaçamento 1,0 x 1,0 m, com carga de material combustível superficial de 20,0 Mg ha⁻¹ (Figura 27).

Todas as queimas foram realizadas no intervalo de abril a agosto de 2007.

FIGURA 27 – PARCELAS MONTADAS EM CAMPO



FONTE: O Autor

Os procedimentos de campo para realização das queimas foram criteriosamente executados na seguinte seqüência:

- a. observação da direção predominante do vento, momentos antes do início da queima (a favor ou contra o vento);
- b. determinação da realização do fogo a favor ou contra o vento;
- c. horário para realização das queimas entre 11 e 16 horas;
- d. ignição do grupo gerador;
- e. ativação do datalogger e conexão dos termopares;
- f. ativação do notebook e teste dos termopares;
- g. “*ignição*” da linha de fogo;
- h. monitoramento e anotação minuto a minuto dos dados de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade instantânea do vento;
- i. cronometragem do avanço da frente de fogo para cada intervalo de 1 metro;
- j. estimativa das alturas das chamas em cada intervalo de 1 metro;
- k. após fim da queima, foram coletadas com auxílio do gabarito de 1,0 m² o material combustível remanescente (cinzas).

Alguns aspectos precisaram ser definidos com antecedência: nível de desidratação desejável das árvores (tendo como base a data de extração e fixação nas parcelas, além da coloração da folhagem) e a previsão climática do dia escolhido para queimar (preferencialmente em dias com alta temperatura e baixa umidade relativa do ar).

Conforme mencionado anteriormente, esta metodologia pode ser adequada de acordo com o objetivo da pesquisa. A Figura 28 apresenta algumas variações nas parcelas, realizadas em caráter experimental e demonstrativo.

FIGURA 28 – EXEMPLOS DE ALTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS NAS PARCELAS

Parcela com dimensões de 2,0 x 6,0 m



Parcela com dimensões de 5,0 x 8,0 m



Queimas com árvores recém instaladas
(verdes)
Carga de 2,0 kg/m²
Fogo superficial a favor do vento



Queimas com árvores instaladas há 1 mês (secas)
Carga de 2,0 kg/m²
Fogo de copa em dia de vento fraco



Queima de parcela com dimensões de 10,0 x 8,0 m (árvores instaladas há 1 mês – secas)
Carga de 3,0 kg/m²
Fogo de copa a favor do vento



3.3.5 Processamento dos Dados e Análise Estatística

A análise estatística dos dados de comportamento do fogo obtido das queimas nas parcelas artificiais foi realizada utilizando o *software Statgraphics plus 4.1*. Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando detectada diferença entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao teste de comparação de médias de *Student, Newman e Keuls (SNK)*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

4.1.1 Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná

Inicialmente fez-se necessário verificar a consistência da montagem e condução deste experimento, realizada mediante a análise de variância dos valores de velocidade de propagação do fogo resultantes de cada queima (repetições) realizada nos respectivos graus de inclinação, na qual ficou comprovada a não existência de diferenças significativas entre as médias das repetições. Desta forma, procedeu-se à avaliação do comportamento do fogo com base em valores confiáveis.

4.1.1.1 Condições ambientais durante as queimas

Temperatura do ar e umidade relativa do ar foram monitoradas durante as queimas dentro do laboratório. A Tabela 5 apresenta os valores médios destas variáveis nas queimas com $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ e $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ de carga, respectivamente. Convém mencionar que as queimas foram realizadas durante vários dias e em diferentes horários.

TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA DO AR E UMIDADE RELATIVA DO AR NOS ENSAIOS DE QUEIMAS EM LABORATÓRIO

Carga	Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa do ar (%)	
	0,2 kg m ⁻²	0,4 kg m ⁻²	0,2 kg m ⁻²	0,4 kg m ⁻²
Mínimo	27,7	29,67	44,6	45,75
Média	28,54	31,25	49,5	53,31
Máxima	29,12	33,88	54,2	56,8

4.1.1.2 Avaliação da influência da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo em queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$

Os valores médios da velocidade de propagação do fogo obtidos das queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ estão apresentados no Quadro 5.

QUADRO 5 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) NOS DIFERENTES NÍVEIS DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE, EM QUEIMAS COM $0,2 \text{ kg m}^{-2}$

INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE (graus)	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m s^{-1})
Plano (0°)	0,00503836
Aclive com 5°	0,00478574
Aclive com 10°	0,00597506
Aclive com 15°	0,00882968
Aclive com 20°	0,0139211

Os valores médios de velocidade de propagação obtidos durante as queimas foram submetidos a análise de variância (Tabela 6).

TABELA 6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) EM QUEIMAS COM $0,2 \text{ Kg m}^{-2}$

Fonte	SQ	GL	QM	F
Entre grupos	0,00263389	4	0,000658473	209,30*
Dentro dos grupos	0,000692149	220	$3,1461 \text{ e}^{-6}$	
Total	0,00332604	224		

* Significativo ao nível de 95%

Tendo sido detectada diferença estatística entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao cálculo de comparação de médias, cujo resultado encontra-se na Tabela 7.

TABELA 7 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) EM QUEIMAS COM $0,2 \text{ kg m}^{-2}$

Método: 95,0 percent Student-Newman-Keuls

Inclinação	nº de observações	Média	Grupos homogêneos
5°	45	0,00478574	a
Plano	45	0,00503836	a
10°	45	0,00597506	b
15°	45	0,00882968	c
20°	45	0,0139211	d

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

De acordo com o resultado expresso pela Tabela 7, na inclinação de 5° não foi verificada uma diferença de velocidade de propagação do fogo em relação ao valor registrado para superfície plana. A velocidade de propagação no aclave com 5° se apresentou inclusive ligeiramente inferior à média registrada para superfície plana, que teoricamente deveria apresentar a menor velocidade dentre todos os níveis de inclinação. Entretanto, nas demais inclinações verificaram-se velocidades de propagação do fogo distintas para cada nível de inclinação, confirmando a hipótese de que a declividade constitui um dos elementos que interferem no comportamento do fogo. Em relação ao valor médio da velocidade de propagação do fogo encontrada para a superfície plana e para o aclave com 5° de inclinação, observou-se um aumento de velocidade da ordem de 1,21 vezes para o aclave com 10°, 1,79 vezes para o aclave com 15° e 2,83 vezes para o aclave com 20°.

4.1.1.3 Avaliação da influência da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo em queimas com carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$

Os valores médios da velocidade de propagação do fogo obtidos das queimas com carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ estão apresentados no Quadro 6.

QUADRO 6 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) NOS DIFERENTES NÍVEIS DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE, EM QUEIMAS COM $0,4\text{kg m}^{-2}$

INCLINAÇÃO DO TERRENO (graus)	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m s^{-1})
Plano (0°)	0,00579103
Aclive com 5°	0,00647513
Aclive com 10°	0,00897455
Aclive com 15°	0,0129253
Aclive com 20°	0,01915

Os valores médios de velocidade de propagação obtidos durante as queimas foram submetidos a análise de variância (Tabela 8).

TABELA 8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) EM QUEIMAS COM $0,4\text{ kg m}^{-2}$

Fonte	SQ	GL	QM	F
Entre grupos	0,00536757	4	0,00134189	181,79*
Dentro dos grupos	0,00158701	215	$7,3814 \text{ e}^{-6}$	
Total	0,00695458	219		

* Significativo ao nível de 95%

Tendo sido detectada diferença estatística entre pelo menos um par de médias, procedeu-se ao cálculo de comparação de médias, cujo resultado encontra-se na Tabela 9.

TABELA 9 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1}) EM QUEIMAS COM $0,4\text{ kg m}^{-2}$

Método: 95,0 percent Student-Newman-Keuls

Carga/Inclinação	nº de observações	Média	Grupos homogêneos
0,4 Plano	45	0,00579103	a
0,4 5°	40	0,00647513	a
0,4 10°	45	0,00897455	b
0,4 15°	45	0,0129253	c
0,4 20°	45	0,01915	d

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

De acordo com o resultado expresso na Tabela 9 foi verificado que, igualmente ao resultado obtido nas queimas com carga de $0,2\text{kg m}^{-2}$, a velocidade de propagação no aclive com 5° não foi afetada pelo nível de inclinação e, apesar deste valor se apresentar ligeiramente superior à média registrada para superfície plana,

ambas foram consideradas estatisticamente iguais pelo Teste SNK. Entretanto, nas demais inclinações observaram-se velocidades de propagação distintas entre si, na medida em que se aumentava o nível de inclinação da superfície. Em relação ao valor médio da velocidade de propagação do fogo estabelecida para a superfície plana e com 5° de inclinação, observou-se um aumento de velocidade da ordem de 1,46 vezes na superfície com aclive de 10°, 2,11 vezes na superfície com aclive de 15° e 3,12 vezes para a superfície com aclive de 20°.

Chandler *et al* (1983) citando McArthur (1962) mencionou que a velocidade de propagação dobra a cada 10° de aumento na declividade do terreno. Entretanto, Chandler *et al* (1983) mencionou que a velocidade de propagação dobra a cada 15° de aumento na declividade do terreno.

4.1.1.4 Avaliação da influência da carga e da declividade sobre a velocidade de propagação do fogo

Com o objetivo de determinar qual dos dois fatores – carga ou grau de inclinação – exerce maior influência na determinação da velocidade de propagação do fogo foi realizado um novo teste estatístico, no qual foram considerados todos os valores de velocidade do fogo obtidos nas queimas com 0,2 kg m⁻² e com 0,4 kg m⁻² de carga. A Tabela 10 apresenta o resultado da análise de variância, na qual foi constatada diferença entre pelo menos um par de médias.

TABELA 10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s⁻¹)

Fonte	SQ	GL	QM	F
Entre grupos	0,00903514	9	0,0010039	191,60*
Dentro dos grupos	0,00227916	435	5,2394 e ⁻⁶	
Total	0,0113143	444		

* Significativo ao nível de 95%

A Tabela 11 apresenta o resultado do teste de comparação de médias.

TABELA 11 – TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS PARA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m s^{-1})

Método: 95,0 percent Student-Newman-Keuls

Carga/Inclinação	nº de observações	Média	Grupos homogêneos
0,2 5°	45	0,00478574	a
0,2 Plano	45	0,00503836	a
0,4 Plano	45	0,00579103	ab
0,2 10°	45	0,00597506	ab
0,4 5°	40	0,00647513	b
0,2 15°	45	0,00882968	c
0,4 10°	45	0,00897455	c
0,4 15°	45	0,0129253	d
0,2 20°	45	0,0139211	e
0,4 20°	45	0,01915	f

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

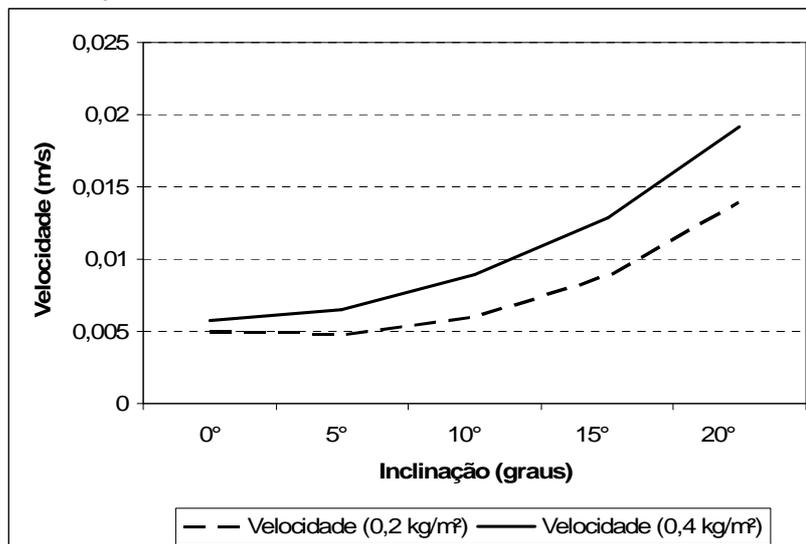
Os resultados do teste de comparação de médias demonstraram que tanto o grau de inclinação quanto a carga do material combustível exercem influências sobre a velocidade de propagação do fogo. Entretanto, com base nos resultados expressos pela Tabela 11, observou-se que a velocidade de propagação do fogo para carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ submetida a 0° , 5° e 10° de inclinação obteve média estatisticamente igual ao da velocidade de propagação decorrente da carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ em superfície plana (0° de inclinação). Da mesma forma foram constatadas velocidades de propagação semelhantes quando oriundas das queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ a 10° e $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ a 0° e 5° , razão pela qual até este nível de inclinação, o fator com maior influência sobre a velocidade de propagação do fogo foi a carga do material combustível existente sobre a superfície.

Para as velocidades oriundas da queima com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ a 15° e $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ a 10° , tanto o grau de inclinação quanto a carga do material combustível se equivaleram quanto à influência sobre a velocidade de propagação. A partir deste ponto a declividade passou a ser o fator de maior peso na determinação da velocidade de propagação do fogo, conforme a tendência demonstrada pelos resultados, onde a velocidade de propagação da queima de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ a 15° de inclinação foi menor que a velocidade de propagação da queima de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ a 20° e este por sua vez menor que de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ a 20° .

4.1.1.4.1 Velocidade de propagação

Os valores médios de velocidade do fogo (m s^{-1}) para as queimas com 0,2 e 0,4 kg m^{-2} foram baixos, variando do mínimo de 0,0049 m s^{-1} obtido nas queimas com carga de 0,2 kg m^{-2} e simulação de relevo plano (0°) a 5° de inclinação ao máximo de 0,01915 m s^{-1} nas queimas conduzidas com carga de 0,4 kg m^{-2} e simulação de relevo a 20° de inclinação. A Figura 29 ilustra os valores obtidos dos ensaios.

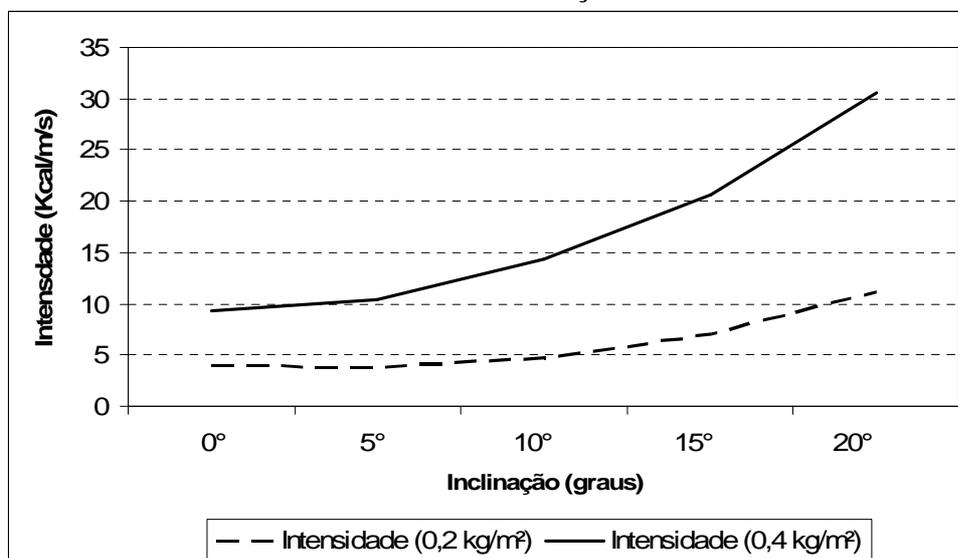
FIGURA 29 – VELOCIDADE DO FOGO (m s^{-1}) EM ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA DE 0,2 E 0,4 kg m^{-2} E SIMULAÇÃO DE RELEVO COM 0, 5, 10, 15 E 20° DE INCLINAÇÃO



4.1.1.4.2 Intensidade do fogo

Os valores médios de intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) para as queimas com 0,2 e 0,4 kg m^{-2} foram baixos, variando do mínimo de 3,93 $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$ obtido nas queimas com carga de 0,2 kg m^{-2} e simulação de relevo plano (0°) a 5° de inclinação ao máximo de 30,64 $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$ nas queimas conduzidas com carga de 0,4 kg m^{-2} e simulação de relevo a 20° de inclinação. A Figura 30 ilustra os valores obtidos dos ensaios.

FIGURA 30 – INTENSIDADE DO FOGO ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) EM ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA DE 0,2 E 0,4 kg m^{-2} E SIMULAÇÃO DE RELEVO COM 0, 5, 10, 15 E 20° DE INCLINAÇÃO



4.1.1.4.3 Equações matemáticas

A condução dos ensaios acima permitiu a geração de modelos de predição da velocidade do fogo com base na inclinação do terreno. Ambos foram gerados considerando os valores de carga inicialmente predeterminados. Desta forma, os seguintes modelos foram ajustados (Quadro 7 e Quadro 8).

QUADRO 7 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA CONHECIDA (0,2 kg m^{-2}) E DIFERENTES INCLINAÇÕES DE TERRENO “ d ” (graus)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a + bx$	$r_{0,2} = 0,00334806 + 0,000436193d$	0,641948	59,837
2	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$r_{0,2} = 0,00511284 - 0,00026972 d + 0,0000352957 d^2$	0,789144	45,919

A equação “2” (Quadro 7) apresentou o melhor ajuste para estimativa da velocidade do fogo nos ensaios com 0,2 kg m^{-2} .

QUADRO 8 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS COM CARGA CONHECIDA ($0,4 \text{ kg m}^{-2}$) E DIFERENTES INCLINAÇÕES DE TERRENO “ d ” (graus)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a + bx$	$r_{0,4} = 0,00406964 + 0,00066136d$	0,69813	28,778
2	$y = a + b\sqrt{x}$	$r_{0,4} = 0,00356718 + 0,00260519\sqrt{d}$	0,53336	35,781
3	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$r_{0,4} = 0,00581917 - 0,0000528598 d + 0,0000358139 d^2$	0,76943	25,150

A equação “3” (Quadro 8) apresentou o melhor ajuste para estimativa da velocidade do fogo nos ensaios com $0,4 \text{ kg m}^{-2}$.

4.1.2 Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda (LPCI Rio Sagrado)

Os ensaios de queima realizados neste laboratório foram conduzidos sem variação de carga do material combustível (pré-estabelecida em $1,0 \text{ kg m}^{-2}$), sem variação na espessura da manta (pré-estabelecida em $9,0 \text{ cm}$) e sem variação significativa no conteúdo de umidade do combustível (que variou entre 7 e 15%). O objetivo foi determinar um padrão para comportamento do fogo influenciado única e exclusivamente pela variação da umidade relativa do ar e temperatura do ar dentro do ambiente do laboratório.

4.1.2.1 Condições ambientais durante as queimas

As condições ambientais apresentadas dentro do laboratório durante os 188 ensaios realizados estão apresentadas no Quadro 9.

QUADRO 9 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS

	Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa do Ar (%)
Mínima	15,05	34,9
Média	26,0	58,95
Máxima	32,85	82,05

De acordo com o Quadro 9, verificou-se que os experimentos foram realizados dentro de amplitudes importantes de temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente 17,8 °C e 47,15%.

4.1.2.2 Avaliação do comportamento do fogo

4.1.2.2.1 *Velocidade de propagação e altura das chamas*

O Quadro 10 apresenta os valores mínimo, médio e máximo da velocidade de propagação e altura das chamas obtidas durante os experimentos.

QUADRO 10 – VALORES MÉDIOS DE VELOCIDADE DO FOGO ($m s^{-1}$) E ALTURA DAS CHAMAS (m) DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS – LPCI RIO SAGRADO

	Velocidade de propagação ($m s^{-1}$)	Altura das chamas (m)
Mínima	0,0016667	0,28
Média	0,0075769	0,72
Máxima	0,02	1,10

4.1.2.2.2 *Intensidade do fogo*

O Quadro 11 apresenta os valores mínimo, médio e máximo da intensidade do fogo obtidas durante os experimentos.

QUADRO 11 – VALORES MÉDIOS DE INTENSIDADE DO FOGO ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) DURANTE OS ENSAIOS DE QUEIMA NO LABORATÓRIO DE PESQUISA E CONTROLE DE INCÊNDIOS – LPCI RIO SAGRADO

	Intensidade do fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
Mínima	13,72
Média	30,06
Máxima	46,40

4.1.2.2.3 Relações entre parâmetros do fogo e ambiente - Correlações

As análises estatísticas realizadas com base nos dados deste experimento evidenciaram uma influência muito pequena da temperatura e da umidade relativa do ar (dentro do ambiente) sobre as variáveis do comportamento do fogo (velocidade e altura das chamas), conforme pode ser observado na Tabela 12.

TABELA 12 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR E AS VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO E ALTURA DAS CHAMAS

		Altura chamas (m)	Temperatura (°C)	UR (%)	Vel. propagação (m/s)
Altura chamas (m)	r		0,0114	-0,3863	0,8905
	n		188	188	188
	p		0,8768	0,0000	0,0000
Temperatura (°C)	r	0,0114		-0,5353	0,0220
	n	188		188	188
	p	0,8768		0,0000	0,7643
UR (%)	r	-0,3862	-0,5353		-0,4914
	n	188	188		188
	p	0,0000	0,0000		0,0000
Vel. propagação (m/s)	r	0,8905	0,0220	-0,4914	
	n	188	188	188	
	p	0,0000	0,7643	0,0000	

Nota: r : coeficiente de correlação; n : número de parcelas/observações; p : probabilidade.

Conforme os dados apresentados pela Tabela 12, foram observados que os coeficientes de correlação que forneceram resultados significativos ocorreram entre as seguintes variáveis do comportamento do fogo e umidade relativa do ar:

- a) velocidade de propagação (m s^{-1}) x umidade relativa do ar (%) : - 0,4914;

b) altura das chamas (m) x umidade relativa do ar (%) : - 0,3863.

A temperatura do ar apresentou correlação somente com a umidade relativa do ar, o que já era esperado. Ainda assim, o coeficiente de correlação, de - 0,5353, foi baixo.

Devido aos baixos valores de correlação encontrados entre as variáveis climáticas “umidade relativa média do ar” e “temperatura média do ar” com as variáveis do comportamento do fogo (altura de chamas, intensidade e velocidade do fogo), não foi possível ajustar modelos de predição do comportamento do fogo em função somente de variáveis ambientais. Por outro lado, a variável “altura das chamas” (*hc*) apresentou potencial na geração dos modelos de predição da intensidade do fogo (*I*) e velocidade de propagação do fogo (*r*).

Considerando os valores de intensidade do fogo calculados pela fórmula de Byram, a Tabela 13 apresenta o resultado da análise de correlação gerada.

TABELA 13 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR E AS VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO

		Altura chamas (m)	Intensidade (kcal m ⁻¹ s ⁻¹)	Temperatura (°C)	UR (%)	Vel. propagação (m/s)
Altura chamas (m)	r		0,9048	0,0114	-0,3862	0,8905
	n		188	188	188	188
	p		0,0000	0,8768	0,0000	0,0000
Intensidade (kcal m ⁻¹ s ⁻¹)	r	0,9048		0,0205	-0,4796	0,9899
	n	188		188	188	188
	p	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000
Temperatura (°C)	r	0,0114	0,0205		-0,5353	0,0220
	n	188	188		188	188
	p	0,8768	0,7801		0,0000	0,7643
UR (%)	r	-0,3862	-0,4796	-0,5353		-0,4914
	n	188	188	188		188
	p	0,0000	0,0000	0,7643		0,0000
Vel. propag. (m/s)	r	0,8905	0,9899	0,0220	-0,4914	
	n	188	188	188	188	
	p	0,0000	0,0000	0,7643	0,0000	

Nota: r : coeficiente de correlação; n : número de parcelas/observações; p : probabilidade.

De acordo com a Tabela 13, as seguintes correlações foram consideradas importantes para a geração de modelos matemáticos:

- a) altura das chamas (m) x velocidade de propagação (m s^{-1}): 0,8905;
- b) altura das chamas (m) x intensidade da frente de fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$): 0,9048;
- c) intensidade da frente de fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) x umidade relativa do ar (%): - 0,4796;
- d) intensidade da frente de fogo ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) x velocidade de propagação (m s^{-1}): 0,9899;
- e) umidade relativa do ar (%) x velocidade de propagação (m s^{-1}): - 0,4914.

4.1.2.2.4 Equações matemáticas

A exploração dos resultados dentro da amplitude de variação dos dados gerados possibilitou o ajuste de vários modelos matemáticos.

Os Quadros 12 e 13 apresentam os modelos ajustados para predição da velocidade de propagação do fogo.

QUADRO 12 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a + bx$	$r = -0,00159415 + 0,0128025hc$	0,791824	12,471
2	$Y = a + \frac{b}{x}$	$r = 0,0138272 - \frac{0,00426487}{hc}$	0,663531	15,855
3	$y = a + b \ln(x)$	$r = 0,0103336 + 0,00774614 \ln(hc)$	0,743447	13,845
4	$y = a + b\sqrt{x}$	$r = -0,00937725 + 0,0201386\sqrt{hc}$	0,771855	13,056
5	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$r = 0,00286971 - 0,00153305hc + 0,0108964hc^2$	0,806301	12,030

De acordo com o Quadro 12, a equação “5” apresentou o melhor ajuste para estimativa da velocidade do fogo com base na altura de chamas.

QUADRO 13 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO “ r ” (m s^{-1}) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m), TEMPERATURA DO AR “ T ” ($^{\circ}\text{C}$) E UMIDADE RELATIVA DO AR “ UR ” (%)

Modelo	Modelo Ajustado	R ²	Syx(%)
1	$r = 0,00131575 + 0,0118399hc - 0,0000377575UR$	0,816547	11,707
2	$r = -0,00176014 + 0,0128006hc + 0,00000643708T$	0,790841	12,501
3	$r = 0,00424664 - 0,0000540512UR + 0,011444hc - 0,0000649655T$	0,825318	11,424

De acordo com o Quadro 13, a equação “3” apresentou o melhor ajuste para estimativa da velocidade do fogo com base na altura de chamas. Entretanto, a facilidade de utilização da equação “1” (que dispensa uma variável) em relação à pequena diferença entre níveis de confiabilidade e erro, sugerem seu uso.

Os Quadros 14 e 15 apresentam os modelos ajustados para predição intensidade do fogo.

QUADRO 14 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE INTENSIDADE DO FOGO “ I ” ($\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “ hc ” (m)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a + bx$	$I = -6,17609 + 50,9804hc$	0,817672	11,421
2	$y = \exp(a + bx)$	$I = \exp(2,01271 + 1,89883hc)$	0,827194	0,412
3	$y = \frac{1}{(a + bx)}$	$I = \frac{1}{(0,0896662 - 0,0750509hc)}$	0,797418	0,018
4	$y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{x}\right)}$	$I = \frac{1}{\left(-0,00272626 + \frac{0,0263435}{hc}\right)}$	0,742484	0,020
5	$y = a + b \ln(x)$	$I = 41,3256 + 30,8585 \ln(hc)$	0,768374	12,873
6	$y = ax^b$	$I = 44,1399hc^{1,16412}$	0,797555	0,446
7	$y = a + b\sqrt{x}$	$I = -37,1842 + 80,2115\sqrt{hc}$	0,797423	12,038
8	$y = (a + bx)^2$	$I = (1,95788 + 4,88388hc)^2$	0,827433	1,058
9	$y = \exp\left(a + \frac{b}{x}\right)$	$I = \exp\left(4,32513 - \frac{0,649529}{hc}\right)$	0,731212	0,514
10	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$I = 11,1062 - 4,52141hc + 42,1866hc^2$	0,831914	10,966

De acordo com o Quadro 14, a equação “2” apresentou o melhor ajuste para estimativa da intensidade do fogo com base na altura de chamas.

QUADRO 15 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE INTENSIDADE DO FOGO “*I*” (kcal m⁻¹ s⁻¹) COM BASE NA ALTURA DE CHAMAS “*hc*” (m), TEMPERATURA DO AR “*T*” (°C) E UMIDADE RELATIVA DO AR “*UR*” (%)

Modelo	Modelo Ajustado	R ²	S _{yx}
1	$I = 3,88372 + 47,6523hc - 0,130531UR$	0,836801	10,805
2	$I = 14,056 + 46,2786hc - 0,225477T - 0,187082UR$	0,843575	10,579

De acordo com o Quadro 15, a equação “2” apresentou o melhor ajuste para estimativa da intensidade do fogo, tendo por base a altura de chamas, temperatura e umidade relativa do ar. Entretanto, a facilidade de utilização da equação “1” (que dispensa uma variável) em relação à pequena diferença entre níveis de confiabilidade e erro, sugerem seu uso.

4.2 QUEIMAS SOB POVOAMENTOS DE PINUS

Para avaliação e modelagem do comportamento fogo, o material combustível possui grande importância. Desta forma, inicialmente se fez necessário a amostragem do mesmo.

4.2.1 Material Combustível

4.2.1.1 Carga total do material combustível florestal

O Quadro 16 apresenta os valores obtidos para a variável que expressa a massa total de combustível amostrada nos blocos. O bloco “C” apresentou menor carga, seguido pelos blocos “B” e “A”, estatisticamente idênticos. O bloco “D”, além de ter apresentado maior espessura de manta e maior densidade de carga, apresentou também maior carga de material combustível dentre os blocos estudados.

QUADRO 16 – CARGA TOTAL DE MATERIAL COMBUSTÍVEL (Mg ha⁻¹) DO POVOAMENTO DE *Pinus elliottii* COM 25 ANOS

BLOCO	CARGA (Mg ha ⁻¹)
A	35,62 b
B	33,85 b
C	22,10 a
D	49,79 c

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

Embora de composição fundamentalmente diferente, RIBEIRO e SOARES (1998), em um estudo sobre caracterização de material combustível superficial de um povoamento de *Eucalyptus viminalis* com 10 anos de idade, realizado no município de Três Barras - SC, encontraram valores médios de carga de 27 t.ha⁻¹. SOARES (1979), em pesquisa desenvolvida no município de Sacramento - MG, registrou valores de carga para material combustível de *Pinus oocarpa*, com idade entre 4,5 e 7,5 anos, de 1,2 a 17,3 Mg ha⁻¹, e para *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* com idades entre 5 e 7,5, de 2,3 a 13,8 Mg ha⁻¹. BATISTA (1995), determinou em um povoamento de *Pinus taeda* com 12 anos de idade, sem desbaste, localizado no município de Sengés - PR, carga de 12,53 Mg ha⁻¹. No município de Telêmaco Borba - PR, VALERI e REISSMANN (1989), também trabalhando em povoamentos de *Pinus taeda*, determinaram cargas de 7,7; 19,7 e 24,3 Mg ha⁻¹ para as idades de 7, 10 e 14 anos, respectivamente.

4.2.1.2 Carga do material combustível florestal por classes de diâmetro

Esta análise proporcionou a identificação dos valores médios de carga obtidos para cada uma das classes de diâmetro do material combustível encontrada nos blocos de pinus estudados, permitindo a identificação das classes que exerceram maior influência sobre a carga total (Quadro 17).

QUADRO 17 – VALORES MÉDIOS DE CARGA (kg m⁻²) DAS CLASSES DE DIÂMETRO DO POVOAMENTO DE *Pinus elliottii* COM 25 ANOS

BLOCO	Miscelânea	S1	S2	S3	S4	ACÍCULAS		CONES
						L e F	H	
A	1,49 b	0,17 a	0,36 b	0,10 a	-	0,33 a	0,65 c	0,46 b
B	2,01 c	0,13 a	0,25 ab	0,11 a	0,01 a	0,36 a	0,46 ab	0,05 a
C	0,95 a	0,12 a	0,17 a	0,04 a	0,16 a	0,38 a	0,36 a	0,02 a
D	2,32 c	0,13 a	0,37 b	0,25 b	0,18 a	0,67 b	0,55 b	0,52 b

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

BATISTA (1995), avaliando um povoamento de *Pinus taeda* de 12 anos de idade sem desbaste, encontrou valor médio de 0,04 kg m⁻² para materiais secos com diâmetro entre 0 a 0,7 cm. Para materiais secos com diâmetros entre 0,7 a 2,5 cm, o mesmo autor encontrou valor médio de 0,11 kg m⁻².

KOEHLER (1989) obteve para povoamentos de *Pinus taeda* com 15 anos de idade, valores de carga de acículas variando entre 0,49 a 0,66 kg m⁻². RIBEIRO (1997), trabalhando com povoamentos de *Eucalyptus viminalis* encontrou para a classe C-1MD (“material orgânico em decomposição, menor que 0,6 cm de espessura ou diâmetro, de forma não definida, que se encontra em contato com o solo mineral”), valores médios de 1,32 kg m⁻². Em comparação, a classe “miscelânea” deste estudo obteve valores médios de 1,69 kg m⁻².

4.2.1.3 Proporção representativa das classes do material combustível florestal

O Quadro 18 apresenta os valores percentuais de carga obtidos em cada uma das classes de diâmetro do material combustível florestal.

QUADRO 18 – VALORES PERCENTUAIS MÉDIOS DE CARGA (kg m⁻²) DE ACORDO COM AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

BLOCO	Miscelânea	S1	S2	S3	S4	ACÍCULAS		CONES
						L e F	H	
A	41,85	4,78	10,11	2,81	0,00	9,27	18,26	12,92
B	59,47	3,85	7,40	3,25	0,30	10,65	13,61	1,48
C	43,18	5,45	7,73	1,82	7,27	17,27	16,36	0,91
D	46,49	2,61	7,41	5,01	3,61	13,43	11,02	10,42
MÉDIA	47,75	4,17	8,16	3,22	2,79	12,66	14,81	6,43

Conforme os dados dispostos no Quadro 18, foi verificado que a classe de diâmetro que apresentou maior contribuição para a variável carga total de material combustível foi “miscelânea”. Também com base em valores médios, observou-se que a ordem de contribuição de cada uma das classes para a carga total foi:

1. Miscelânea (47,75%);
2. Acículas “H” (14,81%);
3. Acículas “L” e “F” (12,66%);
4. “S2” (8,16%);
5. “Cones” (6,43);
6. “S1” (4,17%);
7. “S3” (3,22%);
8. “S4” (2,79%).

RIBEIRO e SOARES (1998) em pesquisa desenvolvida em um povoamento de *Eucalyptus viminalis* com 13 anos registraram valores médios de 49,18% para materiais finos em decomposição. No presente estudo, a classe “miscelânea” registrou valores de 47,75%.

4.2.1.4 Espessura da manta

Em cada bloco, a espessura média da camada depositada sobre a superfície da floresta, desde o solo propriamente dito até a deposição recente das acículas da classe “L”, foi obtida a partir de 4 medições, feitas em cada uma das laterais do gabarito de 1,0 m², quando dos procedimentos de coleta de material combustível. O Quadro 20 apresenta os valores medidos.

QUADRO 19 – ESPESSURA DA LITEIRA (cm)

BLOCO	ESPESSURA MÉDIA DA LITEIRA (cm)
A	10,24 c
B	9,04 b
C	7,13 a
D	11,30 c

Nota: Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

Os blocos “A” e “D” apresentaram espessuras médias da manta estatisticamente idênticas, sendo também os blocos com maior deposição de material combustível. O bloco “C” apresentou a menor espessura dentre os blocos avaliados, sendo seguido pelo bloco “B”, com espessura ligeiramente superior e estatisticamente diferente dos demais.

4.2.1.5 Densidade de carga do material combustível florestal

A densidade de carga é uma variável que expressa a massa do material combustível que ocupa determinado volume. Na prática, indica o nível de compactação na qual se encontra o material combustível depositado sobre o solo propriamente dito. O Quadro 19 apresenta os valores de densidade de carga obtidos em cada um dos blocos estudados.

QUADRO 20 – DENSIDADE DE CARGA DO MATERIAL COMBUSTÍVEL TOTAL (kg m^{-3})

BLOCO	DENSIDADE DE CARGA (kg m^{-3})
A	34,60 a
B	37,30 a
C	30,91 a
D	44,35 b

Médias seguidas por letras diferentes indicam as diferenças estatísticas existentes entre blocos, como resultado do Teste de Comparação de Médias SNK (95,0%).

De acordo com os resultados apresentados pelo Quadro 19, verificou-se que dentre os blocos selecionados para estudo, apenas o material combustível do bloco “D” apresentou-se mais compactado que os demais.

4.2.1.6 Correlações

Apesar dos talhões de pinus estudados apresentarem mesma espécie e idade, o estudo realizado permitiu o estabelecimento de correlações intrínsecas entre as variáveis deles extraídos. Assim, conforme disposto no Quadro 21, verificaram-se correlações significativas, principalmente sob a visão de utilização dos resultados para determinação de modelos de predição de carga com base em variáveis de fácil obtenção e leitura.

QUADRO 21 – CORRELAÇÕES SIGNIFICATIVAS ENTRE VARIÁVEIS DOS POVOAMENTOS ESTUDADOS

VARIÁVEIS ($r > 0,5$)	CORRELAÇÃO
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x espessura média da manta (cm)	0,7916
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de acículas “F” (kg m^{-2})	0,7382
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de acículas “LF” (kg m^{-2})	0,5282
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de “cones” (kg m^{-2})	0,6846
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de “miscelânea” (kg m^{-2})	0,8585
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de “S2” (kg m^{-2})	0,6837
Carga total de material combustível (Mg ha^{-1}) x carga total de “S3” (kg m^{-2})	0,6758

Dentre os resultados apresentados no Quadro 21, a correlação estabelecida entre a variável “Carga total de material combustível (Mg ha^{-1})” e “espessura média da manta (cm)” denotou potencial para modelagem, pois a variável de maior interesse nos estudos de risco de incêndio e estimativas da intensidade do fogo “carga total” pode ser estimada com base na leitura da espessura da manta, uma variável de fácil obtenção.

A correlação estabelecida entre “Carga total de material combustível (Mg ha^{-1})” e “Carga total de miscelânea (Kg m^{-2})” também apresentou potencial para construção de modelos, no entanto esta não é uma variável de fácil obtenção.

Outras correlações estabelecidas permitiram inferir sobre a dinâmica dos povoamentos de pinus estudados, conforme apresentado pelo Quadro 22.

QUADRO 22 – OUTRAS CORRELAÇÕES SIGNIFICATIVAS ESTABELECIDAS ENTRE AS VARIÁVEIS DOS POVOAMENTOS ESTUDADOS

VARIÁVEIS ($r > 0,5$)	CORRELAÇÃO
Espessura média da manta (cm) x carga total de acículas “F”(kg m ²)	0,7671
Espessura média da manta (cm) x carga total de “cones”(kg m ²)	0,5686
Espessura média da manta (cm) x carga total de “miscelânea”(kg m ²)	0,7574
Espessura média da manta (cm) x carga total de “S2”(kg m ²)	0,5635
Espessura média da manta (cm) x teor de umidade de acículas “F” (%)	0,6400
Carga total de material combustível (Mg ha ⁻¹) x teor de umidade de acículas “F” (%)	0,6566

A correlação entre “Espessura média da manta (cm)” e “carga total de acículas “F”(kg m²)” torna-se importante quando se considera que a estimativa de carga desta classe de material combustível, que é a de maior consumo durante a ocorrência de incêndios superficiais em povoamentos de pinus, pode ser obtida com base na espessura da manta, uma variável de fácil obtenção.

4.2.2 Descrição das Queimas

A condução dos experimentos de queima sob os povoamentos de pinus na Fazenda Experimental de Rio Negro foi realizada no mês de maio de 2008, mais precisamente nos dias 22 e 23.

Ao todo, 23 parcelas foram queimadas, sendo que em cada uma delas as seguintes variáveis foram obtidas, monitoradas ou coletadas:

- 1) Tempo de avanço da frente de fogo, posteriormente convertido em velocidade de propagação média da frente;
- 2) Estimativa da altura média mínima e altura média máxima das chamas;
- 3) Medição da espessura da manta antes da queima e após a queima;
- 4) Coleta de amostras de material combustível antes da queima, para posterior determinação do conteúdo de umidade do mesmo no dia da queima;
- 5) Monitoramento e medição da temperatura do ar e umidade relativa do ar.

No dia 22 de Maio de 2008 foram queimadas 8 parcelas e no dia 23 de Maio 15 parcelas. As condições climáticas médias registradas no período foram:

	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)
Dia 22	22,46	67,38
Dia 23	22,17	65,09

No dia 22, as queimas foram realizadas no intervalo entre 11:36 horas (início da 1ª queima do dia) e 17:18 horas (fim da última queima). No dia 23, o intervalo foi de 11:30 horas às 17:07 horas, sendo que neste dia várias parcelas vizinhas foram incendiadas e monitoradas ao mesmo tempo.

No interior dos povoamentos a presença do vento não foi relevante sobre o comportamento do fogo. Não foram registrados valores no dia 22 (velocidade zero) e no dia 23 a variação foi de 0,0 a 0,59 m s⁻¹, classificado como “calmo” a “muito fraco” pela Escala de Beaufort.

As queimas do dia 22 apresentaram alguns problemas durante sua ocorrência. Na maioria das parcelas, a frente não completou o avanço dos 10,0 metros lineares, extinguindo-se antes. A parcela 2 foi excluída das análises devido ao fato da frente de fogo ter se apagado por duas vezes, sendo necessário o re-acendimento da linha. Neste dia, somente as queimas das parcelas 6, 7 e 8 ocorreram sem quaisquer problemas.

No dia 23, todas as queimas ocorreram normalmente. A linha de fogo para cada parcela foi iniciada uma única vez e a frente de fogo avançou por toda a extensão de cada uma das parcelas.

As Figuras 31 e 32 apresentam um esquema gráfico das condições climáticas (temperatura e umidade relativa do ar médias) vigentes durante a realização das queimas no dia 22 e 23, levando em consideração a hora média (em função da hora de início e fim das queimas), durante a condução dos experimentos. O objetivo destes gráficos é ilustrativo, para demonstrar a tendência de aumento e redução da temperatura e da umidade relativa do ar ao longo do dia, em função do período de ocorrência das queimas – entre 11 e 14 horas, entre 14 e 16 horas e entre 16 e 18 horas.

FIGURA 31 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA (T) E UMIDADE RELATIVA DO AR (UR) DURANTE A CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DO DIA 22 EM FUNÇÃO DA HORA DE INÍCIO E FIM DE CADA QUEIMA

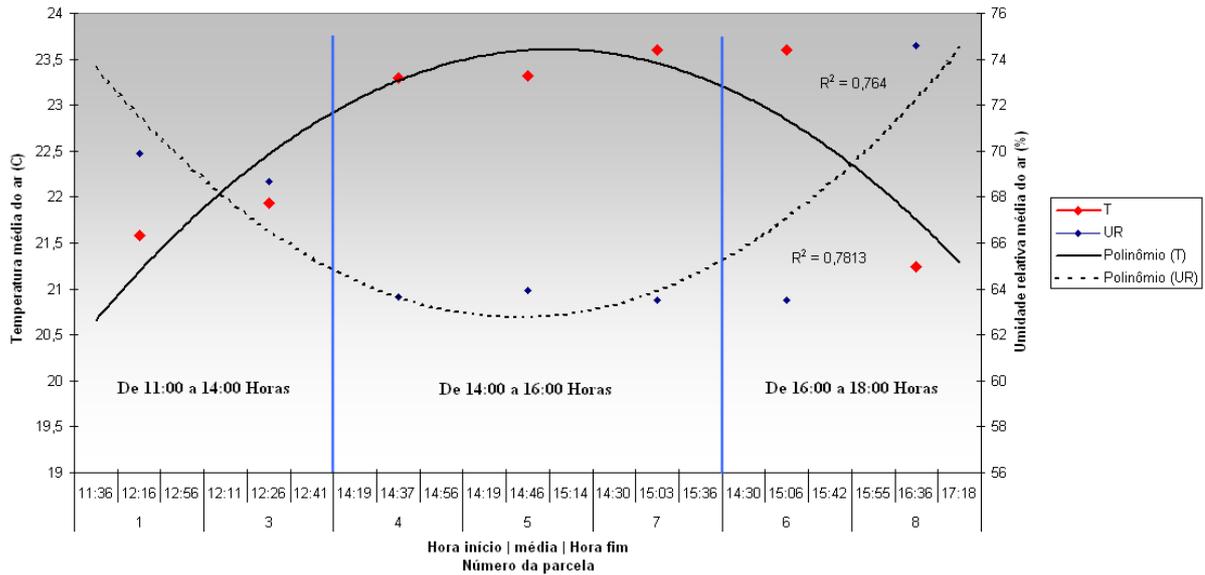
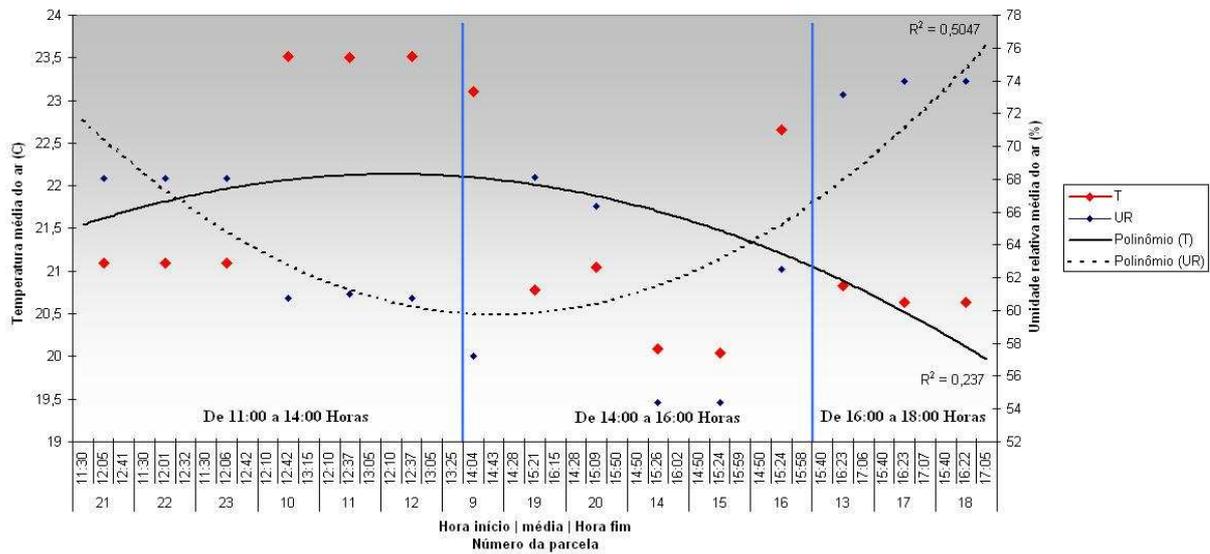


FIGURA 32 – VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA (T) E UMIDADE RELATIVA DO AR (UR) DURANTE A CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DO DIA 23 EM FUNÇÃO DA HORA DE INÍCIO E FIM DE CADA QUEIMA



Apesar da Figura 32 não ser convencional, a tendência de aumento da temperatura do ar e de redução da umidade relativa do ar até o horário das 14 horas é visível.

4.2.2.1 Comportamento do fogo

A descrição do comportamento do fogo foi realizada com base nos resultados das queimas das 23 parcelas.

4.2.2.1.1 *Velocidade de propagação média*

Avaliando as velocidades médias desenvolvidas pelas frentes de fogo, verificou-se que nas queimas do dia 22, a velocidade média mínima foi de 0,00146389 m s⁻¹ e a velocidade média máxima foi de 0,0034245 m s⁻¹, com a média do dia de 0,00251811 m s⁻¹. Para as queimas do dia 23, os valores foram de 0,0018619 m s⁻¹ e 0,0035423 m s⁻¹, com média do dia de 0,00268697 m s⁻¹. Ainda assim, de acordo com a escala de velocidade de propagação do fogo proposta por BOTELHO e VENTURA (1990), os valores de velocidade obtidos foram classificados como “lentos”, pois são inferiores a 1,98 m min⁻¹.

4.2.2.1.2 *Altura média das chamas*

Avaliando os valores médios de altura das chamas, verificou-se que nas queimas do dia 22, a altura média mínima foi de 0,09m e a altura média máxima foi de 0,30m. Para as queimas do dia 23, os valores foram de 0,23m e 0,41m, respectivamente para altura média mínima e altura média máxima de chamas.

4.2.2.1.3 *Intensidade média do fogo*

A intensidade média obtida nas queimas realizadas sob o povoamento de pinus foi de 29,42 kcal m⁻¹ s⁻¹, variando do mínimo de 18,6 ao máximo de 42,37 kcal m⁻¹ s⁻¹. A Tabela 14 apresenta os resultados de intensidade do fogo em cada uma das parcelas queimadas.

TABELA 14 – INTENSIDADE DO FOGO ESTIMADA COM BASE NO MODELO DE BYRAM PARA CADA UMA DAS PARCELAS QUEIMADAS

Parcela de Queima	Intensidade (kcal m ⁻¹ s ⁻¹)
1	18,60
3	42,37
4	29,01
5	27,08
6	29,70
7	32,26
8	25,75
9	27,52
10	33,03
11	38,66
12	38,66
13	24,03
14	29,81
15	30,89
16	31,49
17	23,42
18	25,25
19	19,99
20	26,00
21	29,83
22	34,44
23	29,48

4.2.2.2 Equações matemáticas

Para facilitar a compreensão dos estudos, foi organizada uma matriz composta de variáveis ambientais (combustível e condições meteorológicas) e variáveis do comportamento do fogo, apresentadas na Tabela 15.

TABELA 15 – VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO, OBTIDAS DURANTE A REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS E UTILIZADAS PARA COMPOR A MATRIZ DE DADOS DO EXPERIMENTO

Variável	Descrição	Unidade
<i>Eaq</i>	Espessura da manta de combustível antes da queima da parcela (média de 3 parcelas)	cm
<i>Edq</i>	Espessura da manta de combustível depois da queima da parcela (média de 3 parcelas)	cm
<i>Hc</i>	Altura das chamas durante a queima (média de 10 observações por parcela)	cm
<i>Hr</i>	Hora de início da queima	Hora
<i>Waq</i>	Peso do material combustível antes da queima (média de 3 parcelas)	kg m ⁻²
<i>Wdq</i>	Peso do material combustível depois da queima (média de 3 parcelas)	kg m ⁻²
<i>Wcons</i>	Material combustível consumido pelo fogo	kg m ⁻²
Período	Período do dia em que foi realizada a queima	1 a 4 ⁽¹⁾
<i>PQ</i>	Profundidade de queima	cm
<i>T</i>	Temperatura do ar no início da queima da parcela	°C
<i>UR</i>	Umidade relativa do ar no início da queima da parcela	%
<i>R</i>	Velocidade de propagação do fogo (média de 10 observações por parcela)	m min ⁻¹
<i>Vv</i>	Velocidade do vento no início da queima da parcela	m s ⁻¹
<i>Dv</i>	Direção do vento no início da queima da parcela	Graus
<i>I</i>	Intensidade do fogo (média de 10 observações por parcela)	Kcal m ⁻¹ s ⁻¹

⁽¹⁾ O dia foi dividido em 4 períodos: 1 (antes das 10 horas da manhã), 2 (10 às 12 horas), 3 (12 às 14 horas) e 4 (14 às 16 horas).

Para determinação de modelos de predição do comportamento do fogo nas queimas sob povoamentos de pinus foi necessário utilizar dados de apenas 13 das 23 queimas realizadas, devido à inconsistência de algumas observações, problemas técnicos durante a realização das queimas (mudança na direção do vento, por exemplo) e descontinuidade da linha de fogo (Tabela 16). Por causa da grande variabilidade do comportamento do fogo em função da direção do vento, para esta avaliação só foram utilizados dados das parcelas em que a linha de fogo avançava na direção do vento, restringindo este estudo ao comportamento do fogo em queimas a favor do vento.

TABELA 16 – SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO DURANTE AS QUEIMAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS EM UM PLANTIO DE *Pinus elliottii* NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO –PR

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Valor mínimo	Valor máximo
<i>eaq</i>	13	11,01	1,7011	8,02	13,0
<i>edq</i>	13	8,00	2,0521	5,33	9,67
<i>hc</i>	13	0,196	0,0611	0,1	0,33
Hr	13	13,3	1,5221	11,5	14,83
<i>waq</i>	13	5,282	0,9061	3,14	6,69
<i>wdq</i>	13	4,401	0,9717	3,21	6,22
<i>wcons</i>	13	1,641	1,328	0,081	5,08
Período	13	2,77	1,423	1	4
<i>PQ</i>	13	3,0	0,8634	1,0	4,17
<i>T</i>	13	21,82	1,364	20,0	23,6
<i>UR</i>	13	63,75	5,2157	54,4	70,0
<i>r</i>	13	0,139	0,0276	0,086	0,180
<i>Vv</i>	13	0,25	0,31	0,0	1,1
<i>I</i>	13	63,791	63,7508	2,5324	236,321

Observou-se que as condições meteorológicas se mantiveram relativamente homogêneas durante os dias de queima, com temperaturas médias variando entre 20 e 23 °C, umidade relativa entre 50 e 70 % e vento calmo (até 1,1 m.s⁻¹). Embora tenha sido selecionada uma área com características ambientais aparentemente homogêneas, houve variação nas características do material combustível (peso e espessura da manta) entre as parcelas. Os valores médios encontrados, no entanto, são similares aos encontrados em outras pesquisas dessa natureza no sul do Brasil (BATISTA, 1995; KOEHLER, 1989).

As variáveis do comportamento do fogo também apresentaram variação expressiva, característica da combustão em ambiente florestal, como se pode verificar em diversos experimentos de queima em que se fizeram medições dos parâmetros do fogo (RIBEIRO e SOARES, 1999; SANTONI et al., 2006; VEGA et al. 2006).

Na tabela 17 estão apresentadas as correlações obtidas entre todas as variáveis estudadas.

Na tabela 18 estão apresentados os modelos de regressão para estimativa das variáveis do comportamento do fogo em função das variáveis ambientais e características dos combustíveis.

TABELA 17 – CORRELAÇÕES (PEARSON) ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E VARIÁVEIS DO COMPORTAMENTO DO FOGO DURANTE A REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS SOB OS PLANTIOS DE *Pinus elliotii* EM RIO NEGRO-PR

	<i>eaq</i>	<i>edq</i>	<i>Hc</i>	Hr	<i>waq</i>	<i>wcons</i>	<i>wdq</i>	Período	<i>PQ</i>	<i>T</i>	<i>UR</i>	<i>r</i>	<i>Vv</i>
<i>edq</i>	0,8618**												
<i>hc</i>	0,4252	0,6277*											
Hr	0,5599*	0,4996	-0,0494										
<i>waq</i>	0,2873	0,1068	-0,2555	0,3463									
<i>wcons</i>	-0,1146	-0,0703	0,6738*	-0,5507*	-0,3628								
<i>wdq</i>	0,6298*	0,5916*	0,3192	0,4485	0,4237	-0,0684							
Período	0,5869*	0,5197	-0,0110	0,9918**	0,2882	-0,4989	0,4935						
<i>PQ</i>	0,5404	0,0389	-0,2035	0,2742	0,3950	-0,1092	0,2593	0,2956					
<i>T</i>	0,1076	0,1917	0,4444	-0,0596	-0,3474	0,4215	0,1414	0,0201	-0,1061				
<i>UR</i>	-0,5795*	-0,7845**	-0,6873*	-0,5428	-0,1083	-0,0427	-0,5144	-0,5315	0,1596	0,0505			
<i>r</i>	0,4156	0,6471*	0,8620**	-0,1623	-0,4499	0,5258	0,0976	-0,1174	-0,2548	0,4712	-0,4574		
<i>Vv</i>	-0,0905	-0,0678	0,0824	-0,6287*	-0,4039	0,2085	-0,2669	-0,6065*	-0,0659	-0,1497	0,3583	0,3455	
<i>I</i>	0,0447	0,1068	0,7774**	-0,4756	-0,3628	0,9764**	0,0264	-0,4125	-0,0892	0,4717	-0,1487	0,6735*	0,2698

** Correlação significativa ao nível de 99 % de probabilidade.

* Correlação significativa ao nível de 95 % de probabilidade.

TABELA 18 – MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO FOGO EM QUEIMAS CONTROLADAS SOB PLANTIOS DE *Pinus elliotii*, NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE RIO NEGRO-PR

		R² ajustado	S_{vx}	F
Altura das chamas				
1	$hc = 0,338628 + 0,00570537waq + 0,0205005wcons + 0,0167875T - 0,00928126UR + 0,0493633Vv$	0,966334	0,0112244	69,89**
2	$hc = 0,398185 + 0,0200958wcons + 0,0153596T - 0,00920763UR + 0,0434501Vv$	0,963562	0,0116773	80,33**
3	$hc = 0,41209 + 0,02489wcons + 0,0112004T - 0,00786175UR$	0,885749	0,0206776	32,01**
4	$hc = 0,635419 + 0,0297738wcons - 0,00765657UR$	0,835936	0,0247786	31,57**
Velocidade de propagação do fogo				
5	$r = 0,164336 - 0,00739535wdq + 0,0132841T - 0,00470706UR + 0,0467416Vv$	0,876613	0,00972863	22,31**
6	$r = 0,104716 + 0,0124587T - 0,00400681UR + 0,0478819Vv$	0,827309	0,0115094	20,16**
Intensidade do fogo				
7	$I = 822,92 - 20,6402eaq + 1070,72hc - 78,5972Hr + 74,0037Período + 32,7532PQ$	0,906970	19,4445	24,40**
8	$I = -375,134 - 19,7783eaq + 1388,14hc + 30,1247PQ + 4,61088UR$	0,880881	22,0027	23,18**
9	$I = 10,1062 - 30,3176eaq + 1296,18hc + 44,3797PQ$	0,877203	25,7958	21,43**
10	$I = -718,028 + 1275,87hc + 8,33757UR$	0,852354	26,8341	28,86**

Dos resultados da tabela 17, é importante destacar as correlações da variável meteorológica “*UR*” com as demais variáveis. Observa-se que essa variável apresentou correlações significativas com a maioria das variáveis analisadas.

Dentre as variáveis que descrevem o material combustível destacam-se as variáveis “*eaq*” e “*edq*” que apresentaram correlações significativas com as demais variáveis ambientais e do comportamento do fogo.

As maiores correlações entre as variáveis do comportamento do fogo ocorreram para “*hc*” X “*r*” ($r = 0,862$), seguida da correlação entre “*I*” X “*hc*” ($r = 0,7774$). A variável “*I*” também apresentou alta correlação com as variáveis “*wcons*” e “*r*”. No entanto, isto foi devido a variável “*I*” ter sido calculada a partir destas duas variáveis pela fórmula de Byram ($I = H r wcons$).

Observando a Tabela 18, verifica-se que as variáveis mais importantes para estimativa da altura das chamas foram o consumo do material combustível (*wcons*), a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Para a estimativa da velocidade de propagação do fogo, as variáveis mais importantes foram a umidade relativa, a temperatura do ar e a velocidade do vento. Para estimativa da intensidade do fogo, as variáveis independentes mais importantes foram a altura das chamas e a espessura da manta após a queima.

Na prática, os modelos “6” e “10” são passíveis de utilização, pois necessitam de variáveis de fácil obtenção (altura de chamas, temperatura e umidade relativa do ar).

Uma das variáveis ambientais de grande importância na avaliação do comportamento do fogo é a topografia do terreno, particularmente a inclinação, que não foi avaliada neste trabalho, pois o mesmo foi realizado em terreno plano. No entanto, a contribuição desta variável é fundamental na elaboração de modelos de previsão do comportamento do fogo e deve ser computada sempre que for possível.

Confrontando os resultados de comportamento do fogo obtidos neste estudo com pesquisas similares realizadas em outras regiões, pode-se constatar que há concordância em diversos aspectos, embora os ambientes e o tipo de vegetação sejam diferentes. Um dos resultados mais relevantes dessa pesquisa para a estimativa do

comportamento do fogo foi a alta correlação obtida entre a altura das chamas e as variáveis ambientais e as características dos combustíveis. De acordo com BYRAM (1959), a intensidade do fogo pode ser estimada através do comprimento das chamas. Diversas pesquisas têm evidenciado que a dimensão da chama que apresenta melhor associação com as demais variáveis do comportamento do fogo é o comprimento (MENDES-LOPES, VENTURA e AMARAL, 2003; BATISTA, LIMA e SOARES, 1993). Porém nesse experimento optou-se por medir a altura ao invés do comprimento das chamas, devido a maior facilidade de obtenção da altura das chamas em ambiente aberto.

A velocidade de propagação do fogo é um dos parâmetros mais difíceis de ser estimado, devido a diversidade de fatores ambientais associados à propagação do fogo.

Diversas pesquisas têm sido realizadas visando encontrar um modelo ideal para descrever a taxa de propagação do fogo em combustíveis florestais. Até este momento, o modelo genérico mais aceito é o proposto por ROTHERMEL (1972). No entanto, esse modelo é difícil de ser empregado devido ao grande número de variáveis utilizadas e à dificuldade de obtenção destas em incêndios e queimas experimentais. Por isso, modelos empíricos de estimativa da velocidade propagação do fogo têm sido desenvolvidos em várias regiões do mundo, embora sejam de uso limitado a condições específicas, tanto de ambiente como de características do fogo. A estimativa da velocidade de propagação do fogo (" r "), a partir das variáveis meteorológicas " T ", " UR " e " V_v ", apresentou um desempenho semelhante ao observado por BILGILI e SALAM (2003), VEGA *et al* (2006) e DAVIES *et al* (2006) em experimentos de queima sob povoamentos florestais. É importante ressaltar que a velocidade do vento é a variável obrigatoriamente incluída na maioria dos modelos empíricos de estimativa de velocidade de propagação do fogo.

A intensidade do fogo é a variável mais importante do comportamento do fogo. É a variável que descreve a magnitude da combustão em termos de energia libertada. Por isso também é o parâmetro mais empregado para comparar queimas e incêndios florestais, bem como é usada como parâmetro para avaliar os efeitos do fogo sobre o ambiente. Os modelos para estimativa da intensidade do fogo apresentados na

Tabela 18 mostram a forte associação entre a intensidade e altura das chamas, comprovando o fato observado por vários autores (DAVIS, 1959; BATISTA, LIMA e SOARES, 1993; MENDES-LOPES *et al*, 2003) de que é possível obter uma boa estimativa da intensidade do fogo através das dimensões das chamas.

4.3 EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO

De um total de 30 queimas experimentais realizadas em caráter de teste, aperfeiçoamento e demonstração da metodologia proposta, 23 foram monitoradas e tiveram dados de comportamento do fogo coletados. Destas, 22 queimas foram conduzidas com a mesma configuração de dimensão da parcela (2,0 x 6,0 metros), carga (2,0 kg m⁻²), espaçamento entre árvores de pinus (1,0 x 1,0 metro), altura das árvores de pinus (entre 1,80 a 2,0 metros) e tipo e arranjo do material combustível superficial (acículas de pinus com espessura da manta estabelecida em 16 cm).

Apenas uma queima foi realizada (e monitorada) com a dimensão da parcela estabelecida em 5,0 x 8,0 metros mantendo, no entanto, todas as demais características iguais.

A condução destas queimas foi realizada mediante diferentes condições climáticas, a favor e contra o vento, para demonstrar a “resposta” das parcelas em relação ao comportamento do fogo associado às condições climáticas vigentes.

O Quadro 23 apresenta os dados de cada uma das queimas realizadas, com os valores médios das variáveis climáticas e do comportamento do fogo.

QUADRO 23 – DADOS CLIMÁTICOS E DO COMPORTAMENTO DO FOGO MEDIDAS DURANTE AS QUEIMAS NAS PARCELAS ARTIFICIAIS DE CAMPO

Parcela	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Direção da queima em relação ao vento	Velocidade média do Vento (m s ⁻¹)	Velocidade de propagação média (m min ⁻¹)	Altura média das chamas (m)	Intensidade do fogo (kcal m ⁻¹ s ⁻¹) ⁽²⁾	Material combustível consumido (%)
1	23,80	66,00	Favor	0,45	0,9163	1,00	145,3931	Nd
2	23,80	66,00	Favor	0,60	1,0572	0,78	167,7441	Nd
3	23,97	68,13	Favor	1,84	1,6385	0,70	259,1773	87,39
4	25,39	63,83	Contra	1,18	0,5677	0,88	90,0727	87,82
5	22,90	75,29	Favor	1,73	1,4459	0,84	229,4135	77,31
6	20,94	83,33	Contra	1,55	0,5649	0,80	89,6254	79,41
7	28,81	52,42	Contra	0,72	0,5692	0,98	90,3121	93,70
8	29,29	52,21	Contra	0,88	0,5520	0,99	87,5910	95,38
9	28,90	57,46	Contra	0,52	1,0625	1,16	168,5835	95,80
10	24,31	70,71	Contra	0,67	0,3730	1,23	59,1852	Nd
13	19,75	35,90	Contra	Nd	0,1903	0,75	30,1923	Nd
14	18,50	49,50	-	0,00	0,3402	1,21	54,9842	Nd
15	Nd	Nd	Favor	Nd	2,4434	4,75	387,6783	Nd
16	Nd	Nd	Favor	Nd	2,2587	4,00	358,3818	Nd
17	Nd	Nd	Favor	Nd	2,5029	3,88	397,1266	Nd
18	Nd	Nd	Favor	Nd	2,0862	4,13	331,0033	Nd
19	Nd	Nd	Favor	Nd	3,0241	4,63	479,8207	Nd
20	Nd	Nd	Favor	Nd	2,7397	4,50	434,6930	Nd
21	Nd	Nd	Favor	Nd	2,3879	4,75	378,8783	Nd
22	Nd	Nd	Favor	Nd	3,6695	5,63	582,2222	Nd
23	Nd	Nd	Favor	Nd	2,7617	5,00	438,1933	Nd
24	Nd	Nd	Favor	Nd	3,3750	5,50	535,5000	Nd
12 ⁽¹⁾	23,11	55,77	Contra	Nd	0,3516	1,03	55,7841	Nd

(1) – Parcela com dimensões de 5,0 x 8,0 metros

(2) – Intensidade calculada através do modelo de Byram (1959)

Nd – Dados não disponíveis

O conteúdo de umidade das acículas de pinus utilizadas como material combustível superficial apresentou variação de 27,55 a 33,24%, determinado com base em amostras coletadas no dia da queima.

4.3.1 Descrição do Comportamento do Fogo nas Queimas das Parcelas Artificiais

Para a análise do comportamento do fogo nas parcelas artificiais⁹, os dados das parcelas foram agrupados de acordo com as queimas realizadas a favor e contra o vento, cujos valores obtidos para as variáveis do comportamento do fogo foram distintos e significativos. O Quadro 24 apresenta os valores mínimos, médios e máximos das variáveis do fogo, obtidos nas queimas das parcelas artificiais de campo.

QUADRO 24 – RESULTADOS DAS QUEIMAS REALIZADAS A FAVOR E CONTRA O VENTO EM PARCELAS ARTIFICIAIS DE CAMPO

QUEIMA CONTRA O VENTO		QUEIMA A FAVOR DO VENTO	
Intensidade do fogo (kcal m⁻¹ s⁻¹)			
Mínimo	30,1923	Mínimo	145,3931
Média	83,8183	Média	366,0875
Máximo	168,5835	Máximo	582,2222
Velocidade de propagação do fogo (m min⁻¹)			
Mínimo	0,1903	Mínimo	0,9163
Média	0,5542	Média	2,3076
Máximo	1,0625	Máximo	3,6695
Altura média das chamas (m)			
Mínimo	0,75	Mínimo	0,70
Média	0,97	Média	3,58
Máximo	1,16	Máximo	5,63

De acordo com os valores médios expressos no Quadro 24, foi verificado que as queimas a favor do vento produziram uma intensidade média do fogo aproximadamente 4,37 vezes maior que a intensidade produzida pelas queimas conduzidas contra o vento. Em geral, em um incêndio comum a intensidade do fogo pode variar de 400 a 800 kcal m⁻¹ s⁻¹, superando as 800 kcal m⁻¹ s⁻¹ nos incêndios de grandes proporções.

A velocidade do fogo variou de 0,19 m min⁻¹ nas queimas conduzidas contra o vento a 3,66 m min⁻¹ nas queimas conduzidas a favor do vento, ou seja, foi aproximadamente 4,16 vezes maior nas queimas a favor do vento. A Tabela 19, adaptada de BOTELHO e VENTURA (1990), apresenta uma classificação da velocidade de propagação do fogo, na qual verifica-se que as queimas a favor do vento

⁹ As análises excluem a parcela número 12, por esta apresentar dimensões diferentes das demais.

nas parcelas artificiais produziram velocidades classificadas como “média”, enquanto as queimas contra o vento produziram velocidades classificadas como “lenta”.

TABELA 19 – CLASSIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO(m min ⁻¹)	CLASSIFICAÇÃO
< 1,98	Lenta
1,98 – 9,96	Média
9,96 – 69,96	Alta
> 69,96	Extrema

Em relação à altura das chamas, que variou de 0,75 m nas queimas conduzidas contra o vento a 5,63 m nas queimas conduzidas a favor do vento, foi verificado que as queimas a favor do vento produziram chamas 3,69 vezes maiores que a altura média das chamas nas queimas contra o vento. Na prática, ao considerar as técnicas de combate aos incêndios, a altura limite das chamas que permitem o combate direto é de aproximadamente 1,20 metros (ROUSSOPOULOS e JOHNSON, 1973). Ou seja, as parcelas artificiais proporcionaram a simulação de duas condições distintas do comportamento do fogo para condições de combate: a primeira (das queimas contra o vento) que permite a proximidade do combatente florestal e, por sua vez, do pesquisador interessado em determinada análise ou estudo e a segunda (das queimas a favor do vento), onde esta proximidade fica impossibilitada, sendo necessário manter distância segura das parcelas e por fim obter leituras desta condição de propagação do fogo.

Com base no exposto, um dos objetivos principais desta metodologia – a obtenção de índices ou valores das variáveis do comportamento do fogo próximos aos incêndios reais – foi alcançado. Os “incêndios” em parcelas artificiais montadas em campo apresentam potencial para a obtenção de dados sobre comportamento do fogo nestas condições.

4.3.2 Equações matemáticas e modelagem do comportamento do fogo nas queimas das parcelas artificiais

A realização das queimas nas parcelas artificiais proporcionou uma série de equações matemáticas descritivas do comportamento do fogo. Fazendo-se uma avaliação generalizada dos dados, foram obtidas as seguintes relações relevantes entre variáveis e fatores do comportamento do fogo:

- a) Estimativa da intensidade do fogo com base na altura média das chamas;
- b) Estimativa da intensidade do fogo com base na umidade relativa média do ar;
- c) Estimativa da intensidade do fogo com base na velocidade média do vento;
- d) Estimativa da velocidade de propagação do fogo com base na altura média das chamas;
- e) Estimativa da velocidade de propagação do fogo com base na umidade relativa média do ar;
- e) Estimativa da velocidade de propagação do fogo com base na velocidade média do vento.

Os Quadros 25, 26, 27, 28, 29 e 30 apresentam os modelos obtidos.

QUADRO 25 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal $m^{-1} s^{-1}$)” COM BASE NA ALTURA MÉDIA DAS CHAMAS - hc (m)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a + \frac{b}{x}$	$I = 481,411 - \frac{301,405}{hc}$	0,703114	34,263
2	$y = a + b \ln(x)$	$I = 149,729 + 182,047 \ln(hc)$	0,801337	28,028
3	$y = \exp\left(a + \frac{b}{x}\right)$	$I = \exp\left(6,27284 - \frac{1,34534}{hc}\right)$	0,589354	0,195
4	$y = ax^b$	$I = 121,353hc^{0,803225}$	0,656192	0,179
5	$y = a + b\sqrt{x}$	$I = -112,196 + 252,288\sqrt{hc}$	0,835151	25,532
6	$y = (a + bx)^2$	$I = (8,60203 + 2,58032hc)^2$	0,79997	0,923
7	$y = a + bx$	$I = 53,1262 + 81,3139hc$	0,858682	23,639
8	$y = \exp(a + bx)$	$I = \exp(4,38775 + 0,353132hc)$	0,680191	0,172
9	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$I = 117,02 + 2,69055 hc + 13,5249 hc^2$	0,867816	22,862

Apesar de não apresentar o maior valor de R^2 , o modelo “6” foi selecionado devido ao seu baixo erro padrão (%), o que o torna mais preciso. Dois modelos puderam ser ajustados para predição da intensidade do fogo utilizando variáveis ambientais – umidade relativa (Quadro 26) e velocidade do vento (Quadro 27).

QUADRO 26 – MODELO DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal $m^{-1} s^{-1}$)” COM BASE NA UMIDADE RELATIVA DO AR - UR (%)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R^2	Syx (%)
1	$y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{x}\right)}$	$I = \frac{1}{\left(-0,0139187 + \frac{1,49738}{UR}\right)}$	0,566074	0,002

QUADRO 27 – MODELO DE ESTIMATIVA DE “INTENSIDADE DO FOGO - I (Kcal $m^{-1} s^{-1}$)” COM BASE NA VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO - V_v ($m s^{-1}$)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R^2	Syx (%)
1	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$I = 396,313 - 635,778V_v + 303,636V_v^2$	0,709	13,249

O Quadro 28 apresenta os modelos gerados para estimativa da velocidade de propagação do fogo com base na altura média das chamas, na qual o modelo “7” apresentou melhor ajuste.

QUADRO 28 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min⁻¹)” COM BASE NA ALTURA MÉDIA DAS CHAMAS - hc (m)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = \exp\left(a + \frac{b}{x}\right)$	$r = \exp\left(1,20584 - \frac{1,34485}{hc}\right)$	0,588828	30,981
2	$y = ax^b$	$r = 0,76506hc^{0,803006}$	0,655741	28,348
3	$y = a + \frac{b}{x}$	$r = 3,03381 - \frac{1,89883}{hc}$	0,70251	34,293
4	$y = \exp(a+bx)$	$r = \exp(-0,67869 + 0,353053hc)$	0,679798	27,340
5	$y = a + b\ln(x)$	$r = 0,944157 + 1,147\ln(hc)$	0,800835	28,059
6	$y = a + b\sqrt{x}$	$r = -0,706214 + 1,58962\sqrt{hc}$	0,83469	25,563
7	$y = (a+bx)^2$	$r = (0,683131 + 0,204798hc)^2$	0,799514	11,634
8	$y = a + bx$	$r = 0,335416 + 0,512357hc$	0,858254	23,671
9	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$r = 0,738658 + 0,0161529hc + 0,0853575hc^2$	0,867411	22,894

As variáveis climáticas “umidade relativa do ar” e “velocidade média do vento” também apresentaram potencial para estimativa da velocidade do fogo. Foi observado, conforme disposto nos Quadros 29 e 30, que a velocidade do vento apresentou melhor potencial de ajuste que a umidade relativa.

QUADRO 29 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min⁻¹)” COM BASE NA UMIDADE RELATIVA DO AR - UR (%)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{x}\right)}$	$r = \frac{1}{\left(-2,20866 + \frac{237,587}{UR}\right)}$	0,566007	50,297

QUADRO 30 – MODELOS DE ESTIMATIVA DE “VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO - r (m min⁻¹)” COM BASE NA VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO - V_v (m s⁻¹)

Modelo	Modelo Genérico	Modelo Ajustado	R ²	Syx (%)
1	$y = a \pm bx \pm cx^2$	$r = 2,50121 - 4,01551V_v + 1,91813V_v^2$	0,710139	13,253

4.3.3 Considerações em Relação à Metodologia Utilizada

Algumas questões de ordem prática ficaram evidenciadas durante a realização deste experimento, podendo ser apresentadas da seguinte maneira:

1) Vantagens da metodologia:

- a. necessidade de uma área de pequena dimensão, permitindo a realização de inúmeras repetições mediante a re-utilização das parcelas (re-montagem das mesmas);
- b. condução de experimentos cujo fator de variação é climático (vento, temperatura e umidade relativa do ar);
- c. pleno conhecimento do arranjo e da carga de material combustível, com possibilidades de alteração destas variáveis no sentido de favorecer uma maior ou menor intensidade do fogo, velocidade de propagação e altura de chamas, além de proporcionar ou não o desenvolvimento do fogo para a copa das árvores.

2) Dificuldades da metodologia:

- a. obtenção do volume de material combustível que compõe as parcelas, retirada de povoamentos de pinus;
- b. mão de obra e tempo despendido para a construção das parcelas.

O potencial de respostas do comportamento do fogo em relação a esta metodologia está diretamente condicionado ao gerenciamento e cuidado na montagem de cada parcela. Quanto maior o cuidado, menor serão as variações dos resultados e melhores serão os dados produzidos.

5 CONCLUSÕES

5.1 DOS EXPERIMENTOS EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

5.1.1 Realizados no Laboratório de Incêndios Florestais da Universidade Federal do Paraná

1) Não houve diferença significativa na velocidade do fogo para as queimas conduzidas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ e $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ em superfície plana e com 5° de inclinação;

2) A velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ foi 20,66% maior que a velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ na declividade de 10° .

3) A velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ foi 17,88% maior que a velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ na declividade de 15° .

4) A velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ foi 10,24% maior que a velocidade de propagação do fogo produzida nas queimas com carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ na declividade de 20° .

5) Para ambas as cargas, a velocidade de propagação do fogo praticamente triplicou quando a declividade passou de uma superfície plana para a declividade de 20° .

6) Até a inclinação de 10° , a carga de material combustível foi o fator determinante da velocidade de propagação do fogo sobre a superfície do terreno;

7) Entre 10 e 15° de inclinação não foi detectada distinção entre carga ou inclinação como fator determinante da velocidade de propagação da frente de fogo;

8) A partir de 15° a inclinação foi o fator determinante da velocidade de propagação sobre a superfície do terreno;

9) Nas queimas com $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ de carga de material combustível, o melhor modelo para estimativa da velocidade do fogo em função da declividade foi:

$$r_{0,2} = 0,00511284 - 0,00026972 d + 0,0000352957 d^2 \quad (R^2 = 0,7891);$$

10) Nas queimas com $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ de carga de material combustível, o melhor modelo para estimativa da velocidade do fogo em função da declividade foi:

$$r_{0,4} = 0,00581917 - 0,0000528598 d + 0,0000358139 d^2 \quad (R^2 = 0,7694).$$

5.1.2 Realizados no Laboratório de Pesquisa e Controle de Incêndios (LPCI) da Empresa Rio Sagrado Industrial Química Ltda

1) O melhor modelo para estimativa da velocidade de propagação do fogo em função da altura de chamas foi:

$$r = 0,00286971 - 0,00153305hc + 0,0108964hc^2 \quad (R^2 = 0,8063);$$

2) O melhor modelo para estimativa da intensidade do fogo em função da altura de chamas foi:

$$I = \exp(2,01271 + 1,89883hc) \quad (R^2 = 0,8272);$$

3) O melhor modelo para estimativa da velocidade do fogo em função de altura das chamas, umidade relativa do ar e temperatura do ar foi:

$$r = 0,00424664 - 0,0000540512UR + 0,011444hc - 0,0000649655T \quad (R^2 = 0,8253);$$

4) O melhor modelo para estimativa da intensidade do fogo com base na altura das chamas, umidade relativa do ar e temperatura do ar foi:

$$I = 14,056 + 46,2786hc - 0,225477T - 0,187082UR \quad (R^2 = 0,8436).$$

5.2 DAS QUEIMAS SOB POVOAMENTOS DE PINUS

5.2.1 Em Relação à Amostragem do Material Combustível Florestal

1) A carga total média dos povoamentos de pinus estudados foi de $32,23 \text{ Mg ha}^{-1}$;

2)A classe de diâmetro “miscelânea” foi responsável por 47,75% da carga total média de material combustível;

3) A variável espessura média da manta (cm) foi a que apresentou melhor correlação com a variável dependente carga total de combustível florestal (Mg ha^{-1}), com r de 0,7916;

5.2.2 Em Relação aos Dados de Comportamento do Fogo

1)O melhor modelo para estimativa da velocidade de propagação foi:

$$r = 0,104716 + 0,0124587T - 0,00400681UR + 0,0478819Vv \text{ com } R^2 \text{ de } 0,827309$$

2)O melhor modelo para estimativa da intensidade do fogo foi:

$$I = -718,028 + 1275,87hc + 8,33757UR \text{ com } R^2 \text{ de } 0,852354$$

5.3 DOS EXPERIMENTOS DE QUEIMAS EM PARCELAS ARTIFICIAIS EM AMBIENTE ABERTO

1)A metodologia proposta gerou valores das variáveis do comportamento do fogo próximos aos estimados em incêndios reais, de maneira que os “incêndios” em parcelas artificiais padronizadas montadas em campo apresentam potencial para o monitoramento e obtenção de dados sobre comportamento do fogo nestas condições.

2)O melhor modelo obtido para estimativa da intensidade do fogo com base na altura média das chamas foi:

$$I = (8,60203 + 2,58032hc)^2 \text{ com } R^2 \text{ de } 0,7999;$$

3)O melhor modelo obtido para determinação da intensidade do fogo com base na umidade relativa do ar foi:

$$I = \frac{1}{\left(-0,0139187 + \frac{1,49738}{UR}\right)} \text{ com } R^2 \text{ de } 0,5661;$$

4)O melhor modelo obtido para determinação da intensidade do fogo com base na velocidade média do vento foi:

$$I = 396,313 - 635,778V_v + 303,636V_v^2 \text{ com } R^2 \text{ de } 0,709;$$

5)O melhor modelo obtido para estimativa da velocidade do fogo com base na altura média das chamas foi:

$$r = (0,683131 + 0,204798hc)^2 \text{ com } R^2 \text{ de } 0,7995;$$

6)O melhor modelo obtido para estimativa da velocidade do fogo com base na umidade relativa do ar foi:

$$r = \frac{1}{\left(-2,20866 + \frac{237,587}{UR}\right)} \text{ com } R^2 \text{ de } 0,5661;$$

7)O melhor modelo obtido para estimativa da velocidade do fogo com base na velocidade média do vento foi:

$$r = 2,50121 - 4,01551V_v + 1,91813V_v^2 \text{ com } R^2 \text{ de } 0,7101.$$

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, H.E. **Aids to determining fuel models for estimating fire behavior**. Washington: USDA Forest Service, 1982. p. 1-22 (General Technical Report INT-122).
- BATISTA, A. C. **Modelagem do comportamento do fogo em plantio de *Pinus taeda***. Paper obtido no Laboratório de Incêndios Florestais da UFPR, Curitiba, [200-].
- BATISTA, A. C. **Avaliação da queima controlada em povoamentos de *Pinus taeda* L. no Norte do Paraná**. Curitiba, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 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: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba; CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS-SBEF, 1993. p. 169-171.
- BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: UFRPE, 1990. 115 p.
- BATISTA, A. C. **Determinação de umidade do material combustível sob povoamento de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- BEUTLING, A. Avaliação da velocidade do fogo em laboratório. In: IV SIMPOSIO SUL-AMERICANO SOBRE PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS E 8º REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA FUPEF/SIF/IPEF SOBRE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 2007, Viçosa. **Anais...** Viçosa: 2007 p. 316-325.
- BEUTLING, A. **Caracterização para modelagem de material combustível superficial em reflorestamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. Curitiba, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- BIDWELL, T.G.; ENGLE, D.M. Behaviour of headfires and backfires on tallgrass prairie. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FIRE AND ENVIRONMENT: Ecological and cultural perspectives, 1990, Knoxville. **Proceedings...** Ahseville: USDA Forest Service, 1991, p.344-350. (General Technical Report SE-69).
- BILGILI, E.; SAGLAM, B. Fire behavior in maquis fuels in Turkey. **Forest Ecology and Management**, v. 184, p. 201–207, 2003.

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

BOTELHO, H. S. *et al.* **Caracterização de combustíveis Florestais**: sua utilização na previsão do fogo. [Lisboa]: Junta Nacional de Investigação Científica – JNICT. 1989, 11 p. Não publicado.

BROWN, A.A.; DAVIS, K.P. **Forest fire**: control and use. 2.ed. New York: McGraw Hill Book, 1973. 686p.

BROWN, J. K. **Handbook for inventorying downed woody material**. Utah: USDA Forest Service, 1974. 24p. (General Technical Report INT-16).

BROWN, J. K.; OBERHEU, R. D.; JOHNSTON, C. M. **Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West**. Odgen, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. 48p. (General Technical Report INT-129).

BURGAN, R. E.; ROTHERMEL, R.C. **BEHAVE**: fire behavior prediction and fuel modeling system – fuel subsystem. Odgen, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1984. 126p. (General Technical Report INT-167).

BYRAM, G.M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K.P. **Forest Fire**: Control and use. New York: Mc Graw Hill, 1959. p. 77-84.

CIANCIULLI, P. L. **Incêndios florestais**: prevenção e combate. São Paulo: Nobel, 1981. 169p.

CHANDLER, C. *et al.* **Fire in forestry**. Washington, D.C: 1983. v.1: Forest fire behavior and effects.

COUTO, E.A.; CANDIDO, J.F. **Incêndios Florestais**. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1980. 101p.

DAVIES G.M.; LEGG C.J.; SMITH A.; MACDONALD A. Developing shrub fire behaviour models in an oceanic climate: Burning in the British Uplands. In: VIEGAS, D. X., editor. **Proceedings of the 5th International Conference on Forest Fire Research**, Figueira da Foz, Portugal: University of Coimbra; p. S107, 2006.

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

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

FERRER, E, P. **Contribució A L'estudi Dels Efectes Dels Retardants En L'extinció D'incêndis Forestals**. Memoria de Tesi Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004. 304p.

FINNEY, M.A; MARTIN, R.E. Modeling effects os prescribed fire on young-growth coast redwood trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, p. 1125-1135, 1992.

IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná 1994**. Londrina, 1994. 49 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

JULIO, G. Comportamiento del fuego: modelos de simulacion y su uso en actividades de combate. In: REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA FUPEF/SIF/IPEF, 4., 1996, Curitiba; CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 2., 1996, **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1996, p. 1117-129.

GAYLOR. H. P. **Wildfires: prevention and control**. Bowie: Prentice-Hall, 1974. 319p.

GOLDAMMER, J. G. **Incêndios florestais: prevenção, controle e uso do fogo**. Curitiba: [s.n.], 1982. 93p.

GREENOUGH, J.A.. **Fuel characteristic classification system design**. Corvallis, Corvallis Forestry Sciences Lab, 2001. 48p. Arquivo PDF. Acrobat Reader (4.x).1.3.

KOEHLER, C. W. **Variação estacional da deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa - PR**. Curitiba, 1989. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias , Universidade Federal do Paraná.

McARTHUR, A.G.; CHENNEY, N.P. The characterization of fires in relation to ecological studies. **Australian Forest Research**, Melbourne, v. 2, n. 3, p. 36-45, 1966.

McARTHUR, A.G. **Control burning in eucalypt forest**. Canberra: Forestry and Timber Bureau, 1962. 33 p. (Leaflet, n. 80)

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

REGO, F.C.; BOTELHO, H. S. **A técnica do fogo controlado**. [S.L.: s.n.], 1990.124p.

RIBEIRO, G. A.; SOARES, R. V. Estudo do comportamento da queima controlada em um povoamento de *Eucalyptus viminalis*. **Revista Árvore**, v. 23, n. 1, p. 57-64, 1999.

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*. **Cerne**. Lavras, v. 4, n. 1, p. 58-72, 1998.

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**. Curitiba, 1997. 145 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ROTHERMEL, R.C. **How to predict the spread and the intensity of forest and range fires**. Odgen: U.S. Forest Service, 1983. 161 p. (Research Paper INT – 143).

ROTHERMEL, R.C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. Odgen: U.S. Forest Service, 1972. 41 p. (Research Paper INT – 115).

ROUSSOPOULOS, P.J; JOHNSON, J. **Help in making fuel management decisions**. Washington, DC: U.S. Forest Service, 1975. 16 p. (Research Paper INT – 112).

SANTONI, P. A.; SIMEONI, A.; ROSSI, J. L.; BOSSEUR, F.; MORANDINI, F.; SILVANI, X.; BALBI, J. H.; CANCELLIERI, D.; ROSSI, L. Instrumentation of wildland fire: Characterization of a fire spreading through a Mediterranean shrub. **Fire Safety Journal**, v. 41, p 171–184, 2006.

SCHNEIDER, B.H.; BELL, D.T. A simple, effective technique for rapid measurement of fuels in low shrub communities. **Australian Forest Research**, East Melbourne, v. 15, n. 1, p. 79-84, 1985.

SOARES, R. V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF. 1985. 213p.

SOARES, R. V. **Biometria: delineamento de experimentos**. Curitiba: FUPEF, 1982. 98 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. **Determinação de um índice de perigo de incêndio para a região centro-paranaense, Brasil**. 72 p. Tese (Mestrado) – CTEI-IICA, Turrialba, 1972.

SOARES, R. V.; BATISTA, A.C. **Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo** Curitiba: 2007. 250 p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A.C. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: UFPR, 2004. 195 p.

SOUZA, L. J. B. **Secagem de material combustível em plantações de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden**. Curitiba, 2000. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

TORRES, F.T.P.; PIERRE, J.U.; RIBEIRO, G.A. Clima e incêndios florestais na cidade de Juiz de Fora (MG). In: IV SIMPOSIO SUL-AMERICANO SOBRE PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS E 8º REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA FUPEF/SIF/IPEF SOBRE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 2007, Viçosa. **Anais...** Viçosa: 2007 p. 357-371.

TRABAUD, L. Etude du comportement du feu dans la Garrigue de Chêne kermes des températures et des vitesses de propagation. **Annales des sciences forestieres**, Versailles, v 36, n. 1, p. 13-38, 1979.

VALERI, S. V.; REISSMANN, C. B. Composição da manta florestal sob povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Telêmaco Borba – PR. **Floresta**. Curitiba, v. 19, n. 1-2, 1989.

VAN WAGNER, C.E. Height of crown scorch in forest fires. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 3, n. 3, p. 373-378, 1973.

VEGA, J. A.; FERNANDES, P.; CUIÑAS, P.; FONTÚRBEL, M. T.; PÉREZ, J. R.; LOUREIRO, C. Fire spread analysis of early summer field experiments in shrubland fuel types of northwestern Iberia. In: VIEGAS, D. X., editor. **Proceedings of the 5th International Conference on Forest Fire Research**, Figueira da Foz, Portugal: University of Coimbra; p. S191, 2006.

VÉLEZ, Ricardo (Coord.). **La Defensa contra Incêndios Forestales: Fundamentos y Experiencias**. España. 2000. paginação irregular.

VESPER – ESTUDO ORIENTADO. Disponível em:
<http://www.escolavesper.com.br/triangulodofogo/conhecendoofogo.htm> Acesso em: 06 dez. 2004.

VIEGAS, D.X. Modelos de comportamento do fogo. In: IV SIMPOSIO SUL-AMERICANO SOBRE PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS E 8° REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA FUPEF/SIF/IPEF SOBRE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 2007, Viçosa. **Anais...** Viçosa: 2007 p. 97-132.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire.** Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 346p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALBINI, F. A. **Estimating wildfires behavior and effects**. Ogden: USDA Forest Service, 1976. 92p. (General Technical Report INT – 30).

ANDERSON, H. E. **Aids to determining fuel models for estimating fire behavior**. Ogden: USDA Forest Service, 1982. 22p. (General Technical Report INT – 122).

ANDERSON, H.E; BROWN, J.K. **Fuel characteristics and fire behaviour considerations in the wildlands**. In: Protecting people and homes from wildfires in the Interior West. Proceedings of the Symposium and Workshop, Missoula, Intermountain Research Station. USDA Forest Service, 1988. p. 124-130 (General Technical Report INT-251).

BROWN, J. K. **Fuel and vegetation inventory procedures – white cap study**, [S.l.: s.n.], 1971. (mimeografado).

CARLTON, D. W.; PICKFORD, S. G. Fuelbed changes with aging of slash from ponderosa pine thinnings. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 80, n. 2, p. 105-108, 1982.

FREESE, F. **Elementary statistical methods for foresters**. Washington D.C: U.S Department of Agriculture Forest Service, 1967, 87 p.

Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2001. 96p. (Redação e Editoração; 8).

Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2000. 50p. (Gráficos; 10).

KOEHLER, H. S. **Estatística experimental**. Curitiba: [s.n.], 1999. 124 p.

NETTO, S. P.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: [s.n.], v.1, 1997. 316 p.

SILVA, I. P.; SILVA, J. A. A. **Métodos estatísticos aplicados à pesquisa científica: uma abordagem para profissionais da pesquisa agropecuária**. Recife: UFRPE, 1999. 309 p.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw – Hill Book Co., 1960. 481p.

STSC. **Statgraphics**: statistical graphics system by statistical graphics corporation. U.S.A, 1986/87. paginação irregular.

Universidade Federal do Paraná. Sistema de Bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2000. 44p. (Teses, dissertações, monografias e trabalhos acadêmicos; 2).

Universidade Federal do Paraná. Sistema de Bibliotecas. Sistema de Bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2001. 72p. (Referências; 6).

Universidade Federal do Paraná. Sistema de Bibliotecas. Sistema de Bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2000. 42p. (Citações e notas de rodapé; 7).

Universidade Federal do Paraná. Sistema de Bibliotecas. Sistema de Bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2000. 54p. (Tabelas; 9).