



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## **CONCENTRAÇÕES DAS ESPÉCIES QUÍMICAS LIBERADAS DURANTE A COMBUSTÃO DE BIOMASSA**

**RELATÓRIO FINAL DO PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Vinicius Pereira da Silva (FARO- ROSEIRA, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [vinicius.pereira@faroroseira.edu.br](mailto:vinicius.pereira@faroroseira.edu.br)

Dr. Turibio Gomes Soares Neto (LCP/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [turibio@lcp.inpe.br](mailto:turibio@lcp.inpe.br)

Julho 2016

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro com a bolsa de Iniciação Científica.

Ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - LCP pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao orientador Dr. Turibio Gomes Soares Neto pelo conhecimento passado, e pela orientação e dedicação na realização deste trabalho.

Ao Dr. Ely Vieira Cortes, e Carlos Alberto do Santos pela ajuda nos experimentos de queima com analisadores específicos.

## RESUMO

Esse trabalho teve início em Agosto de 2015. O objetivo foi determinar os fatores de emissão das principais espécies químicas liberadas durante a combustão de biomassa, em experimentos realizados em laboratório. A biomassa utilizada nos experimentos foi da espécie *Pinus elliotti*. Procurou-se simular a queima, utilizando-se um sistema montado dentro de um contêiner. O sistema contém uma bandeja para a queima da biomassa sobre uma balança, e sobre esta bandeja existe uma coifa acoplada a uma chaminé, para a condução dos gases para o exterior do contêiner. Na chaminé foi instalado um exaustor para os gases de combustão e sensores para detectar a vazão, temperatura e pressão. As amostras vão para os analisadores de gases onde foram determinadas as suas concentrações. Com as amostras coletadas no experimento, puderam-se determinar as concentrações dos gases da combustão. A partir desses valores podem-se determinar os fatores de emissão dos principais gases, CO<sub>2</sub> – 1182 (g/kg); CO - 25,8 (g/kg); NO – 0,82 (g/kg) e UHC – 5,20 (g/kg). Foram realizadas 8 testes, dentre eles 4 testes com vazão do ar de nível baixo (550 m<sup>3</sup>/h), com diâmetro do tronco menor ou igual a 2,5 cm e sem inclinação da bandeja. E nos outros 4 testes com vazão do ar nível alto (800 m<sup>3</sup>/h), com diâmetro do tronco maior que 2,5 cm e com inclinação da bandeja há 10°. O intuito foi verificar qual variável (diâmetro do tronco, inclinação da bandeja e vazão do ar) mais interferiu na emissão de gases. Realizou-se um estudo estatístico no qual se observou qual fator ou fatores que mais interferiu na emissão de gases poluentes, principalmente do CO<sub>2</sub>, que colabora para o aumento do efeito estufa.

## ABSTRACT

This work began in August 2015. The objective was to determine the emission factors of the main chemical species released during the combustion of biomass, in experiments performed in the laboratory. The biomass used in the experiments was the species *Pinus elliottii*. He tried to simulate firing, using a system fitted inside a container. The system contains a tray for the burning of biomass on a balance, and on this tray there is a hood attached to a chimney, to conduct the gas to the outside of the container. In the fireplace is installed to an exhaust flue gases and sensors to detect the flow rate, temperature and pressure. The samples go to the gas analyzers which were determined their concentrations. The samples collected in the experiment, they were able to determine the concentrations of combustion gases. From these values can be determined the emission factors of the main gases, CO<sub>2</sub> - 1182 (g / kg); CO - 25.8 (g / kg); NO - 0.82 (g / kg) and UHC - 5.20 (g / kg). They were performed 8 tests, including tests with 4 flow of the low level of air (550 m<sup>3</sup> / h), with a diameter of less trunk or equal to 2.5 cm and without tilting the tray. And in the other 4 trials with high air flow level (800 m<sup>3</sup> / h) with diameter greater than 2.5 cm trunk tilt and pan for 10 °. The aim was to determine which variable (trunk diameter, pan tilt and air flow) more interfere with the emission of gases. We conducted a statistical study that observed what factor or factors that interfere with the emission of greenhouse gases, especially CO<sub>2</sub>, which contributes to the greenhouse effect.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pag.</u>
<b>Figura 1</b> - visão geral do equipamento experimenta de queima. ....	5
<b>Figura 2</b> - Balança e prato para testes de biomassa, e boca da chaminé. ....	5
<b>Figura 3</b> - Analisadores dos gases CO <sub>2</sub> , CO, NO e UHC. ....	6
<b>Figura 4</b> - Esquema da disposição dos componentes do sistema de amostragem de gases na mesa de comando. ....	6
<b>Figura 5</b> - Estrutura de troncos com diâmetro menor ou igual a 2,5 cm. ....	7
<b>Figura 6</b> - Estrutura de troncos com diâmetro maiorque 2,5 cm. ....	7
<b>Figura 7</b> - Processo de queima da biomassa. ....	8
<b>Figura 8</b> - Fanem Modelo 315SE ....	9
<b>Figura 9</b> - Dados obtidos através dos analisadores específicos durantes o experimento. ....	11
<b>Figura 10</b> - Dados obtidos através dos analisadores específicos durantes o experimento. ....	12
<b>Figura 11</b> – Gráfico demonstrativo da influência da variável A na emissão de CO <sub>2</sub> . ....	15
<b>Figura 12</b> - Gráfico demonstrativo da influência da variável B na emissão de CO <sub>2</sub> . ....	16
<b>Figura 13</b> - Gráfico demonstrativo da influência da variável B na emissão de CO <sub>2</sub> . ....	16

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pag.</u>
<b>Tabela 1</b> - Fatores de emissão das espécies químicas liberadas pela queima de biomassa <i>pinus elliotti</i> . .....	10
<b>Tabela 2</b> - Fatores de emissão das espécies químicas liberadas pela queima de biomassa <i>pinus elliotti</i> . .....	10
<b>Tabela 3</b> - Dados obtidos através dos analisadores específicos.....	11
<b>Tabela 4</b> - Dados obtidos através dos analisadores específicos.....	12
<b>Tabela 5</b> - Fatorial 2 <sup>3</sup> . Representa as condições do experimento. ....	13
<b>Tabela 6</b> - Comparação da variável A dos níveis alto e baixo.....	13
<b>Tabela 7</b> - Comparação da variável B dos níveis alto e baixo.....	14
<b>Tabela 8</b> - Comparação da variável C dos níveis alto e baixo.....	14

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

LCP	Laboratório Associado de Combustão e Propulsão.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
UHC	Hidrocarbonetos Não Queimados.
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão.
CHN	Carbono Hidrogênio e Nitrogênio.
FE	Fator de Emissão.



## LISTA DE SÍMBOLOS

ppmv	Parte por milhão volume.
pg	$10^{15}$ gramas.
m <sup>2</sup>	Metro quadrado.
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado.
V <sub>total - chaminé</sub>	Vazão total na chaminé.
V <sub>x</sub>	Volume do gás X.
M <sub>x</sub>	Massa molar do gás X.
g	Gramas.
kg	Kilogramas.
atm	Atmosfera.
	Miligrama.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Estudos e Objetivos</b> .....	3
<b>2. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS</b> .....	3
<b>2.1 Revisão Bibliográfica</b> .....	3
<b>3. TECNICAS EXPERIMENTAIS</b> .....	4
<b>3.1 Ensaio de combustão em laboratório</b> .....	4
<b>3.2 Analisadores Específicos</b> .....	5
<b>3.3 Sistema de coleta de gases</b> .....	6
<b>3.4 Amostragem da Parte experimental em Laboratório</b> .....	7
<b>3.5 Cálculo do Fator de Emissão</b> .....	8
<b>3.8 Teor de umidade</b> .....	8
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	9
<b>4.1 Fatores de Emissão</b> .....	10
<b>4.2 Estudo Estatístico</b> .....	13
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	17
<b>6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17

# 1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho de iniciação científica foi determinar a quantidade de emissão das principais espécies químicas liberadas durante a queima de biomassa, em experimentos realizados em laboratório. Particularmente neste trabalho procurou-se simular a queimada de *Pinus elliotti*, utilizando-se um equipamento de queima montado dentro de um contêiner.

Os estudos tiveram base nas referências de Lobert et al. (1990,1991) e entre outras referências, para obter um melhor entendimento sobre o assunto que foi proposto no trabalho de iniciação científica. Os experimentos foram realizados nas dependências do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) do INPE, em Cachoeira Paulista.

A queima de biomassa é uma das mais importantes fontes de poluição atmosférica do planeta (CRUTZEN et al., 1979, CRUTZEN e ANDREAE, 1990). Esta queima global de biomassa tem um importante papel no balanço de muitas espécies químicas na atmosfera. Estimativas sugerem que de 3 a 5 pg ( $10^{15}$  g) de carbono são queimados globalmente como biomassa anualmente (CRUTZEN e ANDREAE, 1990; SEILER e CRUTZEN, 1980), sendo uma quantidade comparável em magnitude ao carbono queimado como combustível fóssil.

A biomassa é queimada para aquecimento, cozimento e na agricultura. A queima de vegetação controlada e incêndios florestais atingem a milhões de hectares anualmente, onde o fogo consome cerca de 6 pg de biomassa (REINHARDT e WARD, 1995). Nos Estados Unidos cerca de seis milhões de hectares são queimados anualmente (WARD et al., 1993). Acredita-se que essa quantidade de biomassa queimada represente apenas cerca de 2 a 3% da biomassa queimada globalmente (HAO e LIU, 1994). No Brasil, são queimados anualmente 1,7 milhões de hectares de florestas primárias (ANDREAE e Merlet, 2001). Segundo projeto Prodes do INPE, o desmatamento da Amazônia reduziu para 583.100 hectares no ano de 2015.

O fogo é amplamente utilizado em escala global para: a) desflorestamento; b) rotação de culturas; c) limpeza de galhos, ervas daninhas, e resíduos acumulados em áreas de pastagens e áreas onde foi efetuada uma colheita; d) regeneração de nutrientes em áreas

colhidas e de pastagens; e) controle de combustível acumulado em florestas; f) produção de carvão para indústria e uso doméstico; g) produção de energia para cozimento e aquecimento (ANDREAE, 1991).

A queima de biomassa emite uma mistura complexa de gases e particulados na atmosfera. Muitos desses compostos podem ser tóxicos e/ou cancerígenos, especialmente, se o nível de exposição das pessoas for muito elevado (WARD e HAO, 1992a; WARD et al., 1993). Alguns hidrocarbonetos de baixo peso molecular (CH<sub>4</sub>) contribuem para o aumento do conhecido efeito estufa (CRUTZEN e ANDREAE, 1990). Pode-se destacar que outros gases CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>3</sub>Cl também emitidos contribuem para o agravamento do problema do efeito estufa (RAMANATHAN et al., 1985), sendo estimado que os gases provenientes das queimadas de biomassa contribuem com cerca de 20% para o aquecimento do planeta (WARD et al., 1994). Segundo trabalho mais recente de Soares Neto et al. (2009), a taxa de emissão de 531 Mt/ano de CO<sub>2</sub> devido ao desmatamento e queima desta floresta, representa 1.06% das emissões globais dos gases de efeito estufa, reportado por Barker et al. (2007).

A composição desses gases provenientes da queima de biomassa é dependente do tipo de combustível e das características do fogo. Estas características incluem parâmetros como composição do combustível e teor de umidade, carga de combustível e intensidade de chama, meteorologia (condições de ventos) e tipo de combustão, ou seja, na forma de uma chama e/ou na forma de um carvão incandescente queimando (GRIFFITH et al., 1991). Todos estes fatores determinam a eficiência global de queima, a qual é definida como a fração de CO<sub>2</sub> emitido em relação ao carbono total existente na biomassa, sendo a unidade indicando a completa conversão de todo o carbono para CO<sub>2</sub>. Entretanto, em queimas de biomassa em sistemas abertos, nunca é alcançada eficiência de 100%. Assim, muitos compostos derivados desta combustão ineficiente podem ser encontrados em quantidades significantes.

Metano, CO e outros hidrocarbonetos são principalmente emitidos durante a combustão incompleta da biomassa durante a fase de queima na forma de incandescência (“smoldering”), enquanto a maior parte de CO<sub>2</sub> é emitido durante a fase de queima na forma de chama (“flame”) (LOBERT et al., 1991; WARD and HARDY, 1991).

Cerca de mais de trinta e três produtos foram identificados e quantificados, resultantes da queima de madeira pelo processo de incandescência (MCKENZIE et al., 1994). Os autores acreditam que os produtos condensáveis são produzidos a partir da pirólise de

lignina e polissacarídeos, sendo que os principais produtos emitidos em ordem decrescente de concentração são: água, ácido acético, metanol, acetato de vinila, 1-hidroxila-2-propanona, aldeído pirúvico, etc. Entre os produtos não condensáveis pode-se destacar CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, sendo também produzidos traços de etino e outros HC de maior peso molecular que não foram identificados.

### **1.1 Estudos e Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo detectar as concentrações e as emissões das principais espécies químicas liberada no processo de combustão da biomassa de espécie *Pinus elliotti*. Através da simulação de queimada em floresta realizada em laboratório. E realizar um estudo estatístico para identificar qual variável mais influenciou no experimento.

## **2. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS**

A seguir serão citados alguns artigos que auxiliaram na familiarização com o assunto de queima de biomassa onde se procurou citar as partes mais importantes. Foram consultados artigos que permitiram a aprendizagem de conceitos básicos técnico-científicos assim como resumos e relatórios anteriores de bolsistas.

### **2.1 Revisão Bibliográfica**

Lobert et al. (1990) queimaram biomassa em laboratório para avaliar os compostos de nitrogênio emitidos na queima de vegetação seca. Descobriram que a emissão de NO<sub>x</sub>, HCN e CH<sub>3</sub>CN são suficientes para contribuir significativamente para o balanço atmosférico dos compostos. Além disso, possivelmente metade do nitrogênio na biomassa pode ser convertida para nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>). Nas queimas realizadas produziu-se principalmente CO<sub>2</sub>, 10% CO e aproximadamente 2% de CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos.

Utilizaram um mecanismo de escala pequena de queima construído para simular fogo aberto. Determinaram CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarbonetos não metanos (NMHC) e CH<sub>4</sub> assim como a maioria das importantes espécies de compostos de nitrogênio: NO<sub>x</sub> (NO e NO<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), alguns compostos de cianeto tal como HCN e CH<sub>3</sub>CN, e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Observaram também diferentes estágios da queima separadamente. Dividiu-se a queima em uma fase de chama emitindo compostos oxidados tal como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e

$N_2O$ , e um de incandescência, queima incompleta, com menos substâncias oxidadas tal como CO, hidrocarbonetos, amoníaco e nitritos. Observaram que aproximadamente 90% do nitrogênio na biomassa e 95% do carbono foram volatilizados durante a queima, com média de perda de peso de 75% na fase chama e 25% no estágio de incandescência. Os combustíveis mais importantes na emissão de conteúdos originais de nitrogênio foram:  $NO_x$  (13%), amoníaco (4%), HCN (2,4%) e  $CH_3CN$  (1%). Menores contribuições foram feitas por  $N_2O$ , outros óxidos nitrosos (principalmente  $HNO_3$ ). Notaram que as emissões de  $NO_x$  na queima de biomassa tropical é responsável por aproximadamente 20% do balanço global enquanto emissões de amoníaco representa aproximadamente 10% da fonte global.

Soares Neto et al. (2009) fizeram experimento no arco de desflorestamento, próximo à cidade de Alta Floresta, no estado do Mato Grosso, Brasil. A média do conteúdo de carbono de biomassa seca usada foi de 48% e a média estimada de conteúdo úmido de biomassa foi de 42% em base úmida. O teste com a biomassa em campo foi estimado 528 toneladas por ha e a soma de carbono no chão antes da queima foi 147 toneladas por ha. Obtiveram uma eficiência de combustão para o experimento de 23,9%. Mediram-se:  $CO_2$ , CO,  $CH_4$ ,  $C_2$  e  $C_3$  (hidrocarbonetos), e particulados. As concentrações de emissões de  $CH_4$  e  $C_2 - C_3$  (hidrocarbonetos) foram correlacionados linearmente com aquelas de CO. As eficiências de combustão para as fases de chama, transição e incandescência foram 0,949; 0,889 e 0,844 respectivamente. Obtiveram os Fatores de Emissão médios de  $CO_2$ , CO,  $CH_4$ , NMHC e  $PM_{2,5}$ , respectivamente, 1599; 111,3; 9,2; 5,57 e 4,84 gramas por kg de biomassa seca queimada. Um hectare de floresta queimada liberou 117.000 kg de  $CO_2$ , 8.100 kg de CO, 675 kg de  $CH_4$ , 407 kg de NMHC e 354 kg de particulados.

### **3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1 Ensaio de combustão em laboratório**

O experimento de queima de biomassa foi realizado em um contêiner contendo uma bandeja de queima de  $1\text{ m}^2$ , como mostrado nas Figuras 1 e 2 abaixo.

Na chaminé foi instalado um exaustor axial, com controle de rotação, para exaustão dos gases de combustão e sensores para quantificar a vazão na chaminé. Uma bomba de diafragma succiona amostras dos gases através de sondas instaladas no interior da

chaminé e os conduz por uma tubulação onde existem filtros para retenção de particulados e banhos térmicos para retenção de umidade e alcatrão presentes na amostra.



**Figura 1 - visão geral do equipamento experimental de queima.**



**Figura 2 - Balança e prato para testes de biomassa, e boca da chaminé.**

### **3.2 Analisadores Específicos**

Após o início do processo de combustão, as amostras fluem para os analisadores específicos onde são determinadas as concentrações dos gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  e hidrocarbonetos não queimados (UHC). Os analisadores estão ilustrados na figura 3.

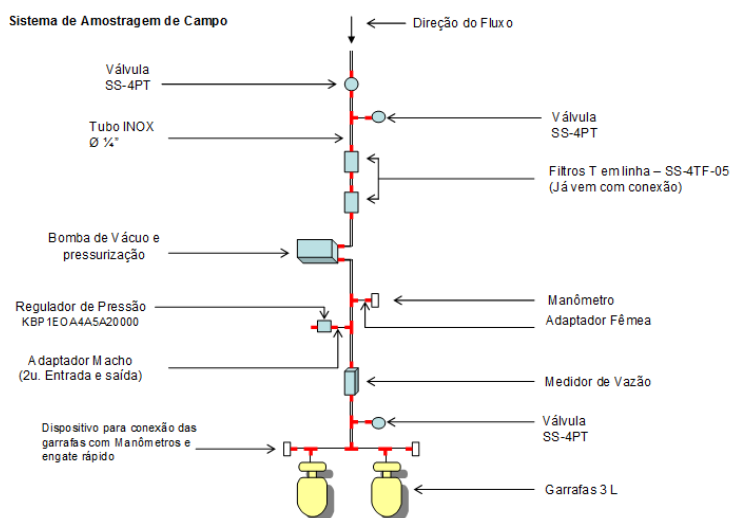
Todas as variáveis medidas são transmitidas em tempo real para um sistema de aquisição de dados onde são registradas continuamente durante todo o ensaio. O software usado para esta aquisição é o LabView.



**Figura 3 - Analisadores dos gases CO<sub>2</sub>, CO, NO e UHC.**

### 3.3 Sistema de coleta de gases

Os componentes do sistema de amostragem de gases na mesa de comando são detalhados na Figura 4.



**Figura 4 - Esquema da disposição dos componentes do sistema de amostragem de gases na mesa de comando.**

O sistema de coleta é constituído por dois filtros, uma válvula de pressão (*back pressure*), um controlador de vazão e dois engates rápidos para o encaixe das garrafas (canisters), que são mantidas inicialmente limpas e sob vácuo, usadas para armazenamento das amostras nas diferentes fases de combustão. É importante ressaltar que neste experimento não foi usado as garrafas para a coleta dos gases, foi utilizado apenas os analisadores específicos, onde tinha o encaixe das garrafas foi isolado para não interferir nos resultados dos experimentos. Esse sistema permite uma amostragem



constante de amostra, a uma determinada vazão e pressão, reguladas simultaneamente pelo controlador de vazão e pela válvula de pressão.

### 3.4 Amostragem da Parte experimental em Laboratório

Antes de realizar o experimento foi realizada a montagem da estrutura da biomassa em laboratório de uma forma fácil e prática para simular a queimada em campo. Podemos ver na figura 5 e 6 a estrutura montada em cima da bandeja.



Figura 5 - Estrutura de troncos com diâmetro menor ou igual a 2,5 cm.



Figura 6 - Estrutura de troncos com diâmetro maior que 2,5 cm.

Nas figura 7 observar-se o processo de queima da biomassa *pinus elliotti*.



**Figura 7 - Processo de queima da biomassa.**

### 3.5 Cálculo do Fator de Emissão

Fator de Emissão é um parâmetro amplamente utilizado no ramo de pesquisa de combustão de biomassa e representa a quantidade de massa emitida de um gás quando é consumido um quilograma de biomassa seco na combustão. O Fator de Emissão de uma espécie X, ou  $FE_X$ , é calculado através da Equação 1 ilustrada a seguir:

$$FE_X = \frac{V_{Total - \text{chaminé}}}{m_{(\text{combustível base seca})}} \frac{[\text{X}] \cdot M_X}{V_{X(1 \text{ mol a } 1 \text{ atm e } 0^\circ \text{C})}} \left[ \frac{g_X}{kg_{\text{combustível}}} \right] \quad (1)$$

O Fator de Emissão é calculado para um determinado período de tempo em que a combustão ocorre. Na equação, o termo  $[\text{X}]$  representa a concentração média do gás X durante o período de tempo estudado. Para os nossos cálculos, essa concentração média foi determinada pela concentração média registrada nos experimentos subtraída pelo valor de background determinado para cada experimento.

### 3.8 Teor de umidade

As amostras foram introduzidas em um forno Fanem Modelo 315SE (figura 8) a  $80^\circ \text{C}$  até que a massa ficasse constante, obtendo-se a massa seca.



**Figura 8 - Fanem Modelo 315SE**

O teor de umidade foi obtido pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem, através da equação 2:

$$\omega_{bu} = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$m_1$  = massa da amostra de biomassa natural (g)

$m_2$  = massa de amostra de biomassa seca (g)

O teor de umidade foi calculado para dois dias, portando pegou-se amostra de galhos e liteira no dia 02/05/2016 e outra duas amostras no dia 03/05/2016. Feito os cálculos chegou-se nos seguintes resultados:

- Dia 02/05/2016 - Umidade dos Galhos = 10,49% e Umidade da liteira = 7,90%
- Dia 03/05/2016 – Umidade dos galhos = 11% e Umidade da liteira = 9,49%

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para determinar a concentração das espécies químicas através dos analisador específico foi utilizado o software LabView, onde era gerado dados essenciais para os cálculos do fator de emissões de todos os testes, tais dados como:

- Tempo inicial e final do experimento;
- Massa inicial e final do experimento;

- Concentração de CO<sub>2</sub>, CO, NO e UHC; e
- Vazão total na chaminé.

#### 4.1 Fatores de Emissão

Foram realizados 8 experimentos com amostras constituídas de aproximadamente 90% de galhos e 10% de liteira.

Os valores de concentração média (ppm) de CO<sub>2</sub>, CO, NO e UHC foram obtidos através de analisadores específicos. Na tabela 1 temos os dados referentes análises de todos testes e na tabela 2 a média do fator de emissão do experimento.

**Tabela 1 - Fatores de emissão das espécies químicas liberadas pela queima de biomassa *pinus elliotti*.**

	CO <sub>2</sub> (g/kg)	CO (g/kg)	NO (g/kg)	UHC (g/kg)
Teste 1	808,93	16,45	0,47	1,88
Teste 2	1172,45	28,14	0,59	5,6
Teste 3	1268,57	15,67	0,75	3,29
Teste 4	1327,85	22	0,55	2,8
Teste 5	988,68	19,38	0,88	3,99
Teste 6	1359,21	20,47	0,96	4,1
Teste 8	1411,65	56,14	1,53	11,08
Teste 9	1117,76	28,32	0,83	8,89

**Tabela 2 – Fator medio de emissão das espécies químicas liberadas pela queima de biomassa *pinus elliotti*.**

	Fator de Emissão (g/kg)
CO <sub>2</sub>	1182
CO	25,8
NO	0,82
UHC	5,20

Todos os dados obtidos através dos analisadores específicos foram lançados em planilhas para efetuação dos cálculos.

Na figura 9 são apresentados os dados normalizados obtidos pelos analisadores específicos do experimento 2 que foi realizada com diâmetro maior que 2,5 cm, com vazão de 550 m<sup>3</sup>/h e sem inclinação da bandeja, e durou cerca 23 minutos. Os cálculos dos fatores de emissão deste experimento por análise específica são apresentados na Tabela 3.

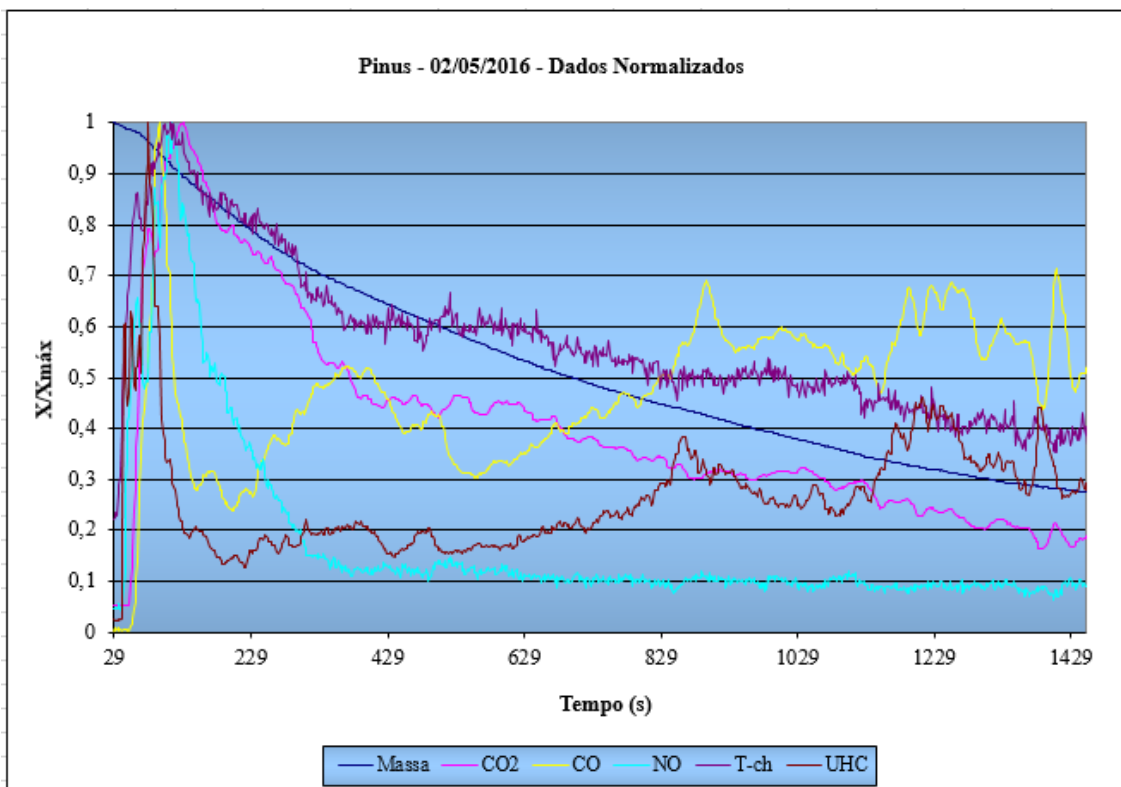


Figura 9 - Dados obtidos através dos analisadores específicos durante o experimento.

Tabela 3 –

Tabela 3 - Dados obtidos através dos analisadores específicos.

Dados das emissões	CO <sub>2</sub>	CO	NO	UHC
Emissão máxima (ppmv)	7462,00	255,45	15,26	103,50
Concentração média (ppmv)	3081,07	101,51	2,74	27,46
Background (ppmv)	396,88	1,35	0,77	2,57
Concentração real (ppmv)	2684,18	100,16	1,97	24,90
Massa Molar g/mol	44,00	28,00	30,00	22,41
Emissão Real 0°C e 1 atm (mg/m <sup>3</sup> )	5269,44	125,13	2,64	24,90
Massa Emitida 0°C e 1 atm- Digiflux (mg)	1159534,37	27534,30	580,33	5478,22
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (g)	1159,53	27,53	0,58	5,48
Fator de Emissão 0°C e 1 atm - Digiflux (g/kg)	1202,27	28,55	0,60	5,68
Água no ar (mg/m <sup>3</sup> )	11647,0	11647,0	11647,0	11647,0
Água nos compostos (mg/m <sup>3</sup> )	2,39	2,39	2,39	2,39
Concentração real (ppmv) de água no ar	14493,09	14493,09	14493,09	14493,09
Concentração real corrigida (ppmv) Cor.	2645,84	98,73	1,94	24,54
Emissão Real 0°C e 1 atm (mg/m <sup>3</sup> ) Cor.	5194,16	123,34	2,60	24,54
Massa Emitida 0°C e 1 atm- Digiflux (mg) Cor.	1142969,21	27140,95	572,04	5399,96
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (g) Cor.	1142,97	27,14	0,57	5,40
Fator de Emissão 0°C e 1 atm - Digiflux (g/kg) Cor.	1185,09	28,14	0,59	5,60
Fator de Emissão 0°C e 1 atm (g/kg) - Corrigido (maçarico)	1172,45			

Na figura 10 são apresentados os dados normalizados obtidos pelos analisadores específicos do experimento 3 que foi realizada com diâmetro menor ou igual a 2,5 cm, com vazão de 800 m<sup>3</sup>/h e com inclinação de 10° da bandeja, e durou cerca 17 minutos.

Os cálculos dos fatores de emissão deste experimento por análise específica são apresentados na Tabela 4.

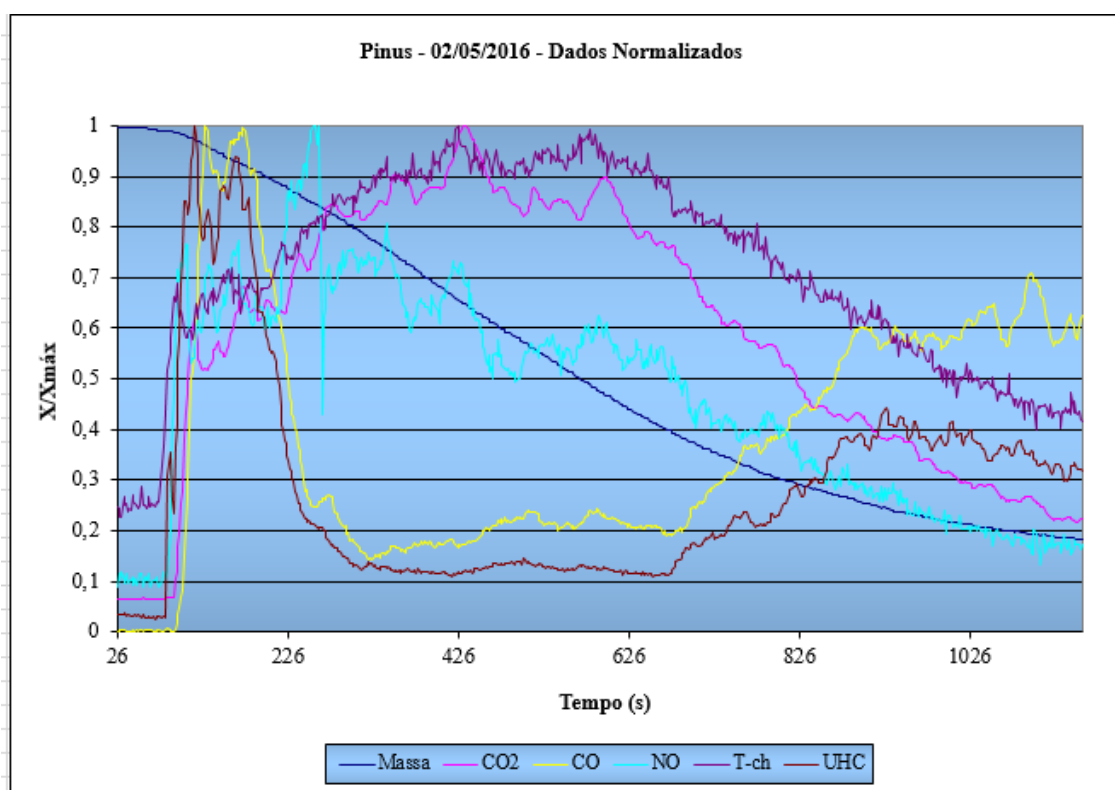


Figura 10 - Dados obtidos através dos analisadores específicos durante o experimento.

Tabela 4 - Dados obtidos através dos analisadores específicos.

Dados das emissões	CO <sub>2</sub>	CO	NO	UHC
Emissão máxima (ppmv)	6110,24	162,04	7,60	65,99
Concentração média (ppmv)	3584,26	61,87	3,53	18,45
Background (ppmv)	400,57	0,55	0,81	2,36
Concentração real (ppmv)	3183,69	61,32	2,73	16,09
Massa Molar g/mol	44,00	28,00	30,00	22,41
Emissão Real 0°C e 1 atm (mg/m <sup>3</sup> )	6250,03	76,60	3,65	16,09
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (mg)	1715761,76	21028,74	1001,59	4416,68
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (g)	1715,76	21,03	1,00	4,42
Fator de Emissão 0°C e 1 atm - Digiflux (g/kg)	1296,69	15,89	0,76	3,34
Água no ar (mg/m <sup>3</sup> )	11647,0	11647,0	11647,0	11647,0
Água nos compostos (mg/m <sup>3</sup> )	2,62	2,62	2,62	2,62
Concentração real (ppmv) de água no ar	14493,39	14493,39	14493,39	14493,39
Concentração real corrigida (ppmv) Cor.	3138,20	60,44	2,69	15,86
Emissão Real 0°C e 1 atm (mg/m <sup>3</sup> ) Cor.	6160,74	75,51	3,60	15,86
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (mg) Cor.	1691249,82	20728,32	987,28	4353,58
Massa Emitida 0°C e 1 atm - Digiflux (g) Cor.	1691,25	20,73	0,99	4,35
Fator de Emissão 0°C e 1 atm - Digiflux (g/kg) Cor.	1278,16	15,67	0,75	3,29
Fator de Emissão 0°C e 1 atm (g/kg) - Corrigido (maçarico)	1268,57			

## 4.2 Estudo Estatístico

O estudo estatístico tem como finalidade mostrar qual variável influenciou no decorrer do experimento. Na tabela 5 onde tem um modelo de fatorail  $2^3$  observa-se como foi proposto as condições de todos os 8 testes. Nela podemos ver as três variáveis que foram analisadas, e as letras que representaram as demais variáveis, o diâmetro do tronco foi representado pela letra A, a vazão pela letra B e inclinação pela letra C e por fim dois níveis que foram representa pelo sinal + (nível alto) e o - (nível baixo).

**Tabela 5 – Fatorial  $2^3$  . Representa as condições do experimento.**

	A (diâmetro tronco)	B (vazão)	C (inclinação)
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
8	+	+	+
9	-	+	+

(+)	= nível alto
-----	--------------

(-)	= nível baixo
-----	---------------

Nas Tabelas 6, 7 e 8 são apresentados os valores de fatores de emissão para os 4 gases medidos em termos g gas/Kg de biomassa seca. Os valores da segunda linha destas tabelas representam a diferença dos fatores de emissão quando se compara a variável em estudo no nível alto e nível baixo. Por exemplo na Tabela 6 tem-se para o CO<sub>2</sub> o valor de 272 g/Kg de biomassa seca.

Mais especificamente na Tabela 6 pode-se verificar as comparações de resultados obtidos com a variável A com nível alto e nível baixo, neste caso nível baixo representa diâmetro do tronco menor ou igual a 2,5 cm e nível baixo e nível alto diâmetro do tronco maior que 2,5 cm até 4,5 cm.

**Tabela 6 - Comparação da variável A nos níveis alto e baixo.**

VARIÁVEL A (+)				VARIÁVEL A (-)			
CO <sub>2</sub> <sup>(1)</sup> 1318	CO <sup>(1)</sup> 31,7	NO 0,91	UHC 5,89	CO <sub>2</sub> 1046	CO 19,9	NO 0,73	UHC 4,51
272	11,8	0,18	1,38				

Na tabela 7 pode-se verificar as comparações de resultados obtidos com a variável B com nível alto e nível baixo, neste caso nível baixo representa vazão 550 m<sup>3</sup>/h e nível alto vazão 800 m<sup>3</sup>/h.

**Tabela 7 - Comparação da variável B nos níveis alto e baixo.**

VARIÁVEL B (+)				VARIÁVEL B (-)			
CO <sub>2</sub> 1281	CO 30,53	NO 0,9	UHC 26	CO <sub>2</sub> 1082	CO 21	NO 0,72	UHC 3,9
199	9,53	0,18	22				

Na tabela 8 pode-se verificar as comparações de resultados obtidos com a variável C com nível alto e nível baixo, neste caso nível baixo representa sem inclinação da bandeja e nível alto com inclinação da bandeja de 10°.

**Tabela 8 - Comparação da variável C nos níveis alto e baixo.**

VARIÁVEL C (+)				VARIÁVEL C (-)			
CO <sub>2</sub> 1219	CO 31	NO 1	UHC 28	CO <sub>2</sub> 1144	CO 20,56	NO 0,59	UHC 3,40
75	10,44	0,41	24,6				

Para obter-se o resultado de qual variável mais influenciou no experimento, foi feito um estudo estatístico da seguinte maneira. Pegou – se a somatória dos teste com nível alto e dividiu-se por quatro, subtraiu-se pela somatória dos testes com nível baixo dividido por quatro, e assim obteve-se o resultado final do teste estatístico. Abaixo observa-se a ilustração da equação que foi utilizada pra chegar no resultado final.

$$EPv = \frac{(\sum \text{med. dos testes nivel alto})}{R} - \frac{(\sum \text{med. dos testes de nivel baixo})}{R}$$

Onde:

$EPv$  = Efeito principal da variável



R = total de níveis que foi usado em cada teste, nesse caso foram realizados 8 testes, 4 com nível alto e 4 com nível baixo. Portanto o R = 4.

Comparando-se os resultados das tabelas 6,7 e 8 é possível observar que a variável que teve efeito principal maior ou seja, a que mais influenciou no experimento, foi a variável A. Portanto através do resultado final do estudo estatístico, concluiu-se que a variável que mais influenciou no experimento foi do diâmetro do tronco. Observa-se na tabela 6 que o nível que teve maior fator de emissão foi o nível alto (A+) com: CO<sub>2</sub> - 1318 g/kg, CO - 31,7 g/kg, NO - 0,91 g/kg e UHC - 5,89 g/kg, onde o diâmetro do tronco é maior que 2,5 cm e varia até 4 cm.

Este resultado foi uma surpresa, pois o esperado era que o nível baixo, onde o diâmetro do tronco é menor ou igual a 2,5 cm, tivesse mais influência no fator de emissão, pois com galhos e troncos finos teria uma melhor combustão e naturalmente um fator de emissão maior. Durante o experimento observou-se que todos os galhos e troncos finos tinham uma casca grossa e os galhos e troncos mais grosso que 2,5 cm não tinham totalmente essa proteção da casca. Por fim, concluiu-se que esta proteção da casca influenciou no resultado do experimento.

As figuras 11,12 e 13 representam graficamente os resultados das variáveis A (diâmetro do tronco), B(vazão) e C(inclinação da bandeja) com nível alto e nível baixo, somente para o CO<sub>2</sub>, por ser o principal gas que contribui com o efeito estufa.

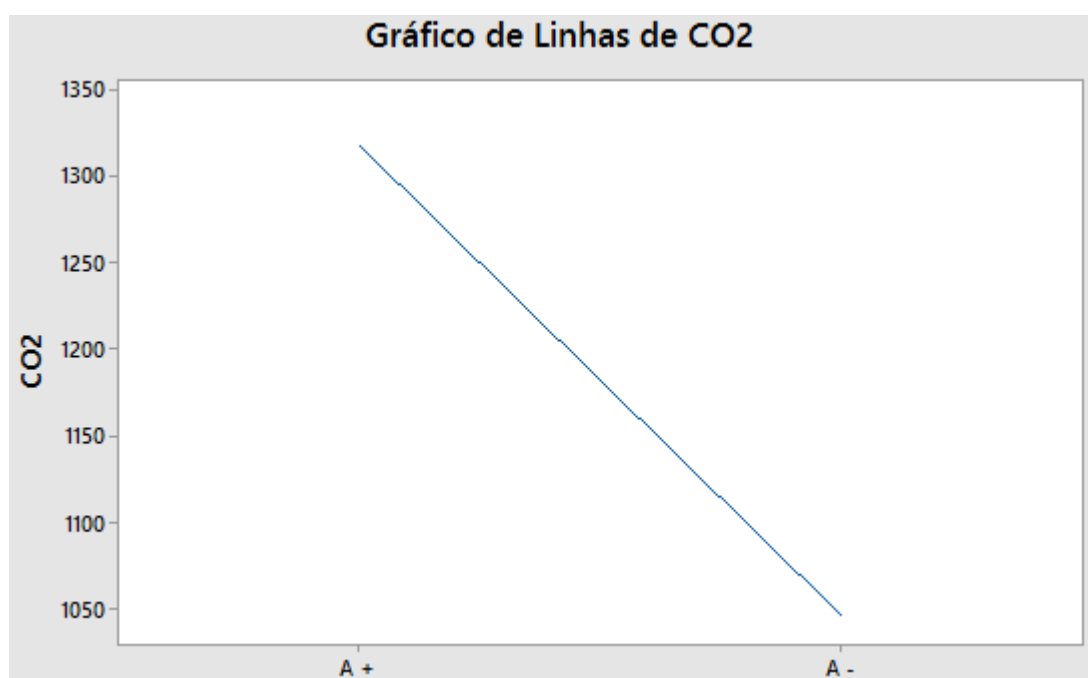


Figura 11 – Gráfico demonstrativo da influência da variável A na emissão de CO<sub>2</sub>.

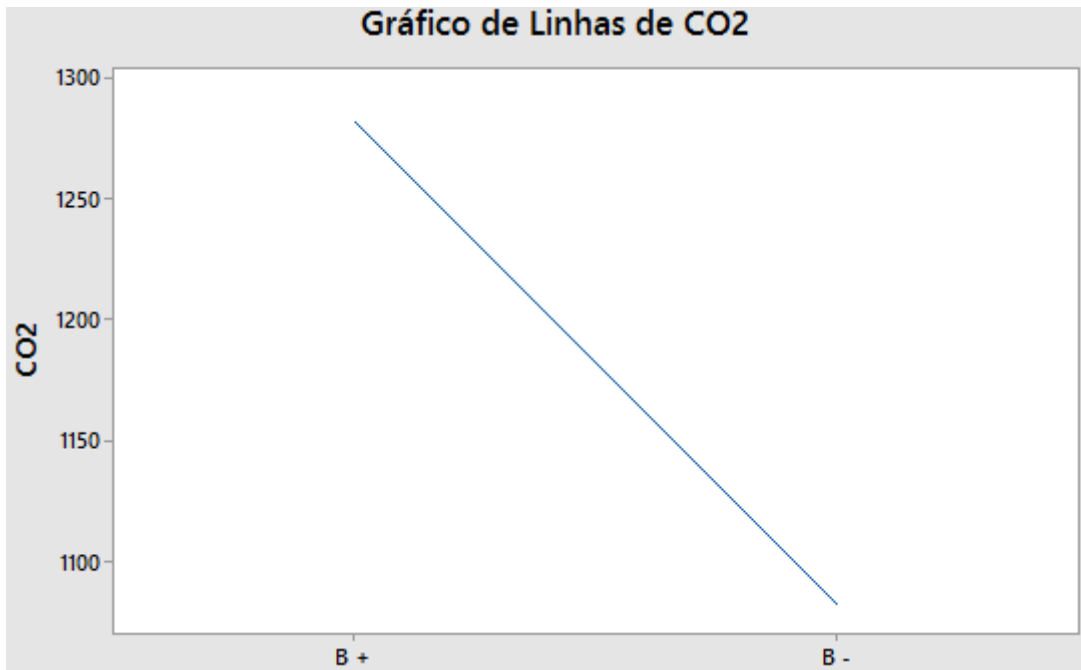


Figura 12 - Gráfico demonstrativo da influência da variável B na emissão de CO<sub>2</sub>.

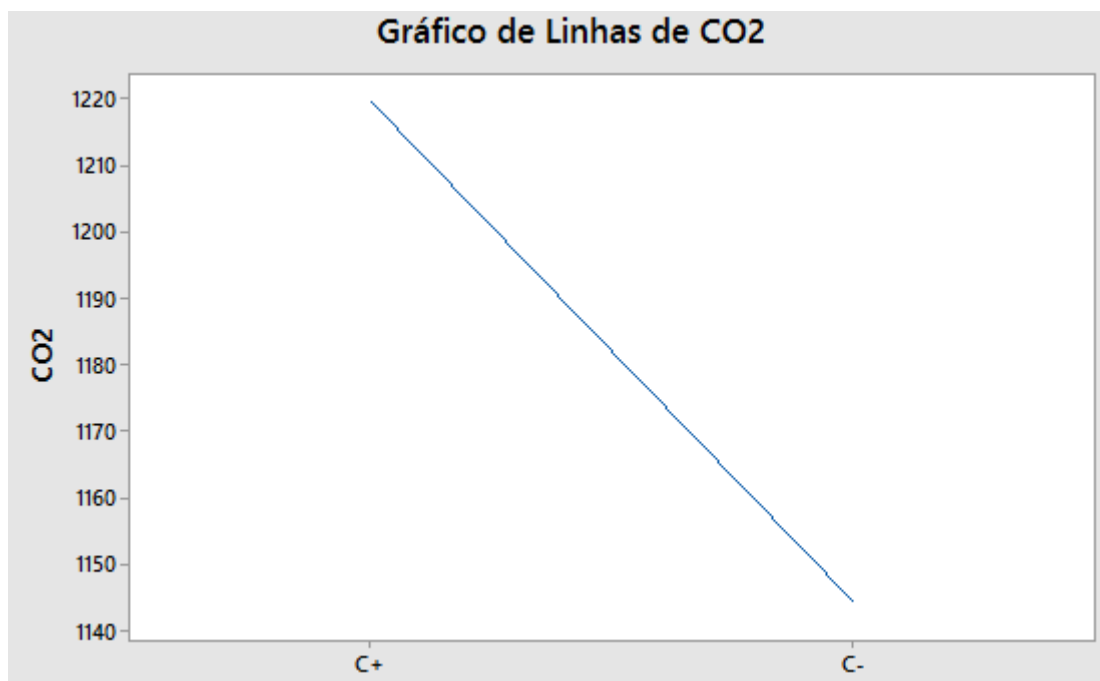


Figura 13 - - Gráfico demonstrativo da influência da variável B na emissão de CO<sub>2</sub>.

## 5. CONCLUSÃO

Os fatores médios de emissão obtidos para o *Pinus elliotti* foram: CO<sub>2</sub> - 1182 (g/kg); CO - 25,8 (g/kg); NO - 0,82 (g/kg) e UHC - 5,20 (g/kg).

O diâmetro do tronco foi a variável que mais influenciou na emissão de CO<sub>2</sub> no experimento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LOBERT, J.M.; SCHARFFE, D.H.; HAO, W.M.; CRUTZEN, P.J., 1990, Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases. **Nature**, **346** (1990) 552-554.

LOBERT, J.M.; SCHARFFE, D.H.; HAO, W.M.; KUHNBUSCH, T.A.; SEUWEN, R.; WARNECK, P.; CRUTZEN, P.J., 1991, Experimental evaluation of biomass burning emissions: nitrogen and carbon containing compounds. In: J. S. Levine (editor). *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, pp 289 - 304. MIT Press.

SOARES NETO, T.G.; CARVALHO JR., J.A.; CORTEZ, E.V.; AZEVEDO, R.G. ; OLIVEIRA, R.A.; FIDALGO, W.R.R., SANTOS, J.C., Laboratory evaluation of Amazon forest biomass burning emissions, *Atmospheric Environment*, 45 (2011) 7455 - 7461.

AMARAL, S.S.; CARVALHO JR., J.A.; COSTA, M.A.M., SOARES NETO, T.G.; DELLANI, R.; LEITE, L.H.S., Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: Chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions, *Bioresource Technology* 164 (2014) 55-63.

ANDREAE, M.O.; BROWELL, E.V.; GARSANG, M.; GREGORY, G.L.; HARRISS, R.C.; HILL, G.F.; JACOB, D.L.; PEREIRA, M.C.; SACHSE, G.W.; SETZER, A.W.; SILVA DIAS, P.L.; TALBOT, A.L.; TORRES, A.L.; WORSY, S.C., 1988, Biomass burning emissions and associated haze layers over Amazonia. *J. Geophys. Res.*, 93, 1509-1527.

ANDREAE, M.O., 1991, Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: J. S. Levine (editor). *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, pp 3- 21. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England.

ANDREAE, M.O. and MERLET, P., 2001, Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, 15, 955-966.

- BABBITT, R.E., WARD, D.E., SUSOT, R.A., ARTAXO, P., KAUFFMAN, J.B., 1996. "A comparison of concurrent airborne and ground-based emissions generated from biomass burning in the Amazon basin". In: SCAR-B: Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation-Brazil: Proceedings. Transtec, São José dos Campos, SP, pp. 23–26.
- CARVALHO, E.R.; CARVALHO, J.A.; VERAS, C.A.G.; FERREIRA, M.A.; SANDBERG, D.V., 2002, Estudo paramétrico sobre incandescência em biomassa, Submetido para apresentação no IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas.
- CARVALHO, J.A.; SANTOS, J.M.; SANTOS, J.C.; LEITÃO, M.M.; HIGUCHI, N.; 1995, A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region, *Atmos. Environ.* 29, 2301-2309.
- CARVALHO, J.A.; HIGUCHI, N.; ARAÚJO, T.M.; SANTOS, J.C., 1998, Combustion completeness in a rainforest clearing experiment in Manaus, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 103, 13195-13200.
- CARVALHO, J.A.; COSTA, F.S.; VERAS, C.A.G.; SANDBERG, D.V.; ALVARADO, E.C.; GIELOW, R.; SERRA, A.M., SANTOS, J.C., 2001, Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in Northern Mato Grosso, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 106, 17877-17877.
- CRUTZEN, P.J., 1971, Ozone production rates in an oxygen, hydrogen, nitrogen-oxide atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 76, 7311-7327.
- CRUTZEN, P.J.; HEIDT, L.E.; KRASNECK, J.P.; POLLOCK, W.H.; SEILER, W., 1979, Biomass burning as a source of atmospheric trace gases: CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl and COS. *Nature*, 282, 253-256.
- CRUTZEN, P.J., 1987, Role of the tropics in atmospheric chemistry, In: *The Geophysiology of Amazonia Vegetation Climate Interaction*, edited by R. E. Dickinson, pp. 107-131, John Wiley, New York.
- CRUTZEN, P.J. and ANDREAE, M.O., 1990, Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250, 1669-1678
- GOODE, J.G.; YOKELSON, R.J.; SUSOTT, R.A., WARD, D.E., 1999, Trace gas emissions from laboratory biomass fires measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy: Fires in grass and surface fuels. *J. Geophys. Res.*, 104, 21237-21245.
- GOODE, J.G.; YOKELSON, R.J.; WARD, D.E.; SUSOTT, R.A.; BABBITT, R.E.; DAVIES, M.A.; HAO, W.M., 2000, Measurements of excess O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, HCN, NO, NH<sub>3</sub>, HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH, HCHO, and CH<sub>3</sub>OH in 1997 Alaskan biomass burning plumes by airborne Fourier transform infrared spectroscopy (AFTIR), *J. Geophys. Res.*, 105, 22147-22166.
- GRAEDEL, T.E.; CRUTZEN, P.J., 1997, In: *Atmosphere, Climate, and Change*. Scientific American Library, New York.

GRIFFITH, D.W.T.; MANKIN, W.G.; COFFEY, M.T.; WARD, D.E.; RIEBAU, A., 1991, FTIR remote sensing of biomass burning emissions of CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, and N<sub>2</sub>O, In: J. S. Levine (editor). Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, pp 3 - 21. MIT Press.

HOFFA, E.A.; WARD, D.E.; HAO, W.M.; SUSOTT, R.A.; WAKIMOTO, R.H., 1999, Seasonality of carbon emissions from biomass burning in a Zambia savanna. *J. Geophys. Res.*, 104, 13841-13853.

KAUFMAN, Y.J.; HOBBS, P.V.; KIRCHHOFF, W.J.H.; ARTAXO, P.; REMER, L.A.; HOLBEN, B.N.; KING, M.D.; WARD, D.E.; PRINS, E.M.; LONGO, K.M.; MATTOS, L.F.; NOBRE, C.A.; SPINHIRNE, J.D.; JI, Q.; THOMPSON, A.M.; GLEASON, J.F.; CHRISTOPHER, S.A.; TSAY, S.C., 1998, Smoke, clouds, and radiations-Brazil (SCAR-B) experiment. *J. Geophys. Res.*, 103, 31783-31808.

LIN, A.C.; MARTINS, M.A.; FARHAT, S.L.; POPE III, C.A.; CONCEIÇÃO, G.M.S., ANASTÁCIO, M.V., 1999, Air pollution and respiratory illness of children in São Paulo, Brazil. *Pediatr. Perinat. Epidemiol.*, 13, 475-487.

LOBERT, J.M.; SCHARFFE, D.H.; HAO, W.M.; CRUTZEN, P.J., 1990, Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases. *Nature*, 346, 552-554.

LOBERT, J.M.; SCHARFFE, D.H.; HAO, W.M.; KUHLBUSCH, T.A.; SEUWEN, R.; WARNECK, P.; CRUTZEN, P.J., 1991, Experimental evaluation of biomass burning emissions: nitrogen and carbon containing compounds. In: J. S. Levine (editor). Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, pp 289 - 304. MIT Press.

LOBERT, J.M.; KEENE, W.C.; LOGAN, J.A.; YEVICH, R., 1999, Global chlorine emissions from biomass burning: reactive chlorine emissions inventory. *J. Geophys. Res.*, 104, 8373-8390.

SOARES NETO, T.G.; CARVALHO, J.A.; VERAS, C.A.G.; ALVARADO, E.C.; GIELOW, R.; LINCOLN, E.N.; CHRISTIAN, T.J.; YOKELSON, R.J.; SANTOS, J.C., 2009, Biomass consumption and CO<sub>2</sub>, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire, *Atmospheric Environment* 43 (2009) 438-446

WARD, D.E.; PETERSON, J.; HAO, W.M., 1993, An inventory of particulate matter and air toxic emissions from prescribed fires in the USA for 1989. In Proceedings of the 86<sup>th</sup> annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association, Denver, Colorado.

WARD, D.E.; SHEA R.; HAO, W.M., 1994, Fires in tropical savanna ecosystems – The need for mitigation. In: Proceedings of the Air & Waste Management Association International Specialty Conference. Global Climate Change – Science, Policy, and Mitigation Strategies, Phoenix, Arizona.

---

Assinatura  
Orientador(a)

---

Assinatura  
Bolsista