

Determinação em laboratório de fatores de emissão de queima da palha de cana-de-açúcar para a estimativa de emissões

Daniela de Azeredo França¹
Karla Maria Longo²
Turíbio Gomes Soares Neto³
José Carlos dos Santos³
Ely Vieira Cortez³
João A. Carvalho Jr.³
Saulo R. de Freitas⁴
Bernardo F. T. Rudorff¹
Daniel Alves de Aguiar¹

¹ Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR)

² Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST)

³ Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP)

⁴ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – SP, Brasil, e-mail: franca@dsr.inpe.br

ABSTRACT: Although sugarcane crop is admittedly relevant to Brazilian economy, the increase of ethanol demand may produce significant environmental impacts. The common practice of pre-harvest burning of sugarcane straw emits particulate material, greenhouse gases, and tropospheric ozone precursors to the atmosphere. Although there are policies to eliminate this burning practice in Brazil until 2020, the effectiveness of this regulation is still questionable and the environmental damages during this period may be significant. Thus the generation of reliable inventories of emissions due to this activity is crucial in order to assess the environmental impact. In this context, this work is a first exercise to determine sugar cane straw burning emission factors in laboratory for some trace gases and quantify total emissions associated with pre-harvest sugarcane burning practice in São Paulo State. Excess mixing ratios for CO₂, CO, NO_x, and UHC (unburned hydrocarbons) were measured, allowing the estimation of their respective emission factors. Average values for emission factors estimated (g kg⁻¹ of burned dry biomass) were: 1303 ± 218 for CO₂, 65 ± 14 for CO, 1.5 ± 0.4 for NO_x, and 16 ± 6 for UHC. The relative amount of sugar cane straw burning was also observed in flaming and smoldering combustion steps.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, emissões, fator de emissão, inventários

1 – INTRODUÇÃO

A queima de biomassa corresponde à principal fonte de emissões antrópicas de gases de efeito estufa e aerossóis para a atmosfera, na América do Sul (Andreae, 1991; Artaxo et al., 2002). No Brasil, atividades relacionadas à agricultura e à pecuária extensiva contribuem significativamente para as emissões de gases traços e material particulado para a atmosfera, em função da utilização da queimada como ferramenta de manejo da terra e de modificações nos padrões de emissões naturais, relacionadas às mudanças de uso e cobertura da terra.

Apesar da grande importância econômica que assumiu para a economia nacional, especialmente em virtude da crescente demanda pela produção de etanol, a cultura da cana-de-açúcar apresenta um alto potencial de impacto ambiental em decorrência da emissão de material particulado, gases estufa e precursores do ozônio troposférico para a atmosfera, além de intensificar a vulnerabilidade da população residente nas vizinhanças à ocorrência de doenças respiratórias, quando realizada a prática da queima no período de colheita.

Mesmo com a existência de políticas para a redução da queima da palha da cana-de-açúcar na pré-colheita nos próximos anos, a efetividade destas regulamentações é ainda questionável e é possível que prejuízos sócio-ambientais continuem ocorrendo até que esta prática seja completamente eliminada. Deste modo, é necessário melhorar o conhecimento científico a respeito dos impactos relacionados ao crescimento da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil, sendo fundamental a geração de inventários de emissões de gases estufa e aerossóis associados a esta atividade. Os inventários de emissões pela queima de biomassa são, basicamente, o produto da quantidade de biomassa queimada por um fator de emissão. Uma estimativa da quantidade de biomassa queimada poderá ser obtida se forem conhecidos a densidade da biomassa acima do solo, o fator de combustão (fração da biomassa que foi realmente queimada) e a área queimada (Longo et al., 2009). O fator de emissão (FE), por sua vez, representa a quantidade de um composto emitido por quantidade de combustível seco consumido (g kg^{-1}) (Andreae e Merlet, 2001).

Como os fatores de emissão de gases traço e material particulado são dependentes do tipo de biomassa e combustão, é importante que sejam conhecidos e utilizados fatores de emissão específicos para cada espécie vegetal. Andreae e Merlet (2001) apresentaram uma revisão bibliográfica das informações disponíveis sobre emissões de queimadas em diversos tipos de biomassa. Estas informações têm sido atualizadas a partir de estudos mais recentes, como o de Christian et al. (2003), no que concerne às queimadas em savana, e o *Tropical Forest and Fire Emissions Experiment* (TROFFEE) que, a partir de experimentos em laboratório e de campanhas aéreas e em campo, reuniu informações sobre emissões de queimadas em vegetação tropical associadas a manutenção de pastagens e desflorestamento (Yokelson et al., 2007; 2008; Soares Neto et al., 2009). No entanto, esta informação para a cultura da cana-de-açúcar ainda é escassa, sobretudo no Brasil. Concomitantemente, grande parte das informações disponíveis para a queima de biomassa refere-se à combustão de biomassa em áreas florestais.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é determinar fatores de emissão de alguns gases traço emitidos durante a queima da palha da cana-de-açúcar, a fim de contribuir para a geração de inventários que considerem emissões desta natureza. Espera-se que inventários que incluam as emissões pela queima da cana-de-açúcar possam ser usados em modelos atmosféricos regionais e globais, para uma análise apropriada do transporte e da interação destas emissões com o ambiente.

2 – METODOLOGIA

Fatores de emissão para as espécies CO_2 , CO , NO_x e UHC (hidrocarbonetos não queimados), emitidas pela queima da biomassa cana-de-açúcar, foram estimados a partir de medidas realizadas em condições controladas de laboratório. Treze experimentos foram realizados no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) do INPE. Os dispositivos para a queima de amostras de biomassa encontravam-se montados no interior de um contêiner (câmara de combustão). Em cada experimento, parte de uma das amostras de cana-de-açúcar coletadas previamente (com cerca de 2,5 a 7,2 kg) foi depositada em uma bandeja de queima, com área equivalente a 1 m^2 , posicionada no centro do contêiner sobre uma balança, para o registro da perda de massa. A bandeja foi mantida na posição horizontal e coberta por uma camada de solo contendo alguns ramos e gramíneas, visando reproduzir as condições reais de queima no campo.

Durante os experimentos, os gases emitidos foram captados por uma coifa acoplada à chaminé, localizada a 0,30 m acima da bandeja de queima e cuja base tinha 1,6 m de diâmetro. Na chaminé, havia um exaustor para auxiliar a sucção dos gases traço, especialmente na fase de brasas. Os gases foram direcionados a um sistema de filtragem para a retenção de material particulado ($1\mu\text{m}$), água e alcatrão. Após este tratamento, as amostras

de gases passaram por analisadores específicos nos quais foram determinadas as concentrações de CO₂, CO, NO_x e UHC. As medidas das concentrações destes gases e de outras variáveis foram registradas em um sistema de aquisição de dados com um intervalo de aproximadamente 1s, no decorrer de cada experimento. Os dados registrados foram: tempo (s), massa (g), concentrações de O₂, CO₂, CO, NO_x e UHC (% e ppm), temperatura na coifa (°C), temperatura na chaminé (°C) e vazão na chaminé (m³ h⁻¹).

Cada experimento teve duração de 2 a 7 minutos, desde a ignição ao término da fase de incandescência. Em cada ensaio, as concentrações de CO₂, CO, NO_x e UHC (hidrocarbonetos não queimados) foram medidas, permitindo a estimativa dos respectivos fatores de emissão em g kg⁻¹ (gramas da espécie X por kg de biomassa seca queimada), que foram calculados de acordo com a Equação (1):

$$EF_X = \frac{V_{Total\ chaminé}}{m_{combustível\ (base\ seca)}} \frac{[]_X \cdot M_X}{V_{X\ (1\ mol\ a\ 1\ atm\ e\ 25^\circ C)}} \left[\frac{g_X}{kg_{combustível\ (base\ seca)}} \right] \quad (1)$$

onde:

V_{Total} = volume total da amostra do gás que fluiu pela chaminé durante o experimento (m³); $[]_X$ = concentração média da espécie X (ppm); M_X = massa molar da espécie X (kg mol⁻¹); m = massa do combustível em base seca (kg); e V_X = volume molar.

A biomassa queimada em cada experimento era constituída principalmente pela palha de cana-de-açúcar, contendo também colmos envoltos por palha. Nove amostras de cana-de-açúcar foram colhidas no Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), no Estado de São Paulo, localizado na região sudeste do Brasil entre os paralelos 19° 50' S e 24° 30' S e os meridianos 44° 00' O e 53° 30' O, ocupando uma área de aproximadamente 250.000 km². Estas amostras, referentes a duas variedades de cana-de-açúcar, foram coletadas em um episódio de tempo seco e em talhões distintos, a fim de que a biomassa estivesse em condições ideais para a queima e uma boa representatividade com relação a sua diversidade fosse obtida.

3 – RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos fatores de emissão (g kg⁻¹ de biomassa seca queimada) estimados neste trabalho para CO₂, CO, NO_x e UHC, bem como outros resultados publicados na literatura.

Tabela 1 – Fatores de emissão (g kg⁻¹ de biomassa seca queimada) e MCE.

Combustível	CO ₂	CO	NO _x	UHC	MCE	Referência
cana-de-açúcar	1303 ± 218	65 ± 14	1.5 ± 0.4	16 ± 6	0.928	Presente trabalho
cana-de-açúcar	1288 ± 167	28 ± 3	-	-	-	Lopes e Carvalho (2009)
cana-de-açúcar	1838	28.3	-	-	0.976	Yokelson et al. (2008)
savana e pastagem	1613 ± 95	65 ± 20	3.9 ± 2.4	-	-	Andreae e Merlet (2001)
resíduos agrícolas	1515 ± 177	92 ± 84	2.5 ± 1.0	-	-	Andreae e Merlet (2001)

Também foi estimada a eficiência de combustão modificada (MCE), que corresponde à razão entre o carbono emitido como CO₂ e o carbono emitido como CO₂ + CO (MCE = CO₂ / (CO₂ + CO)). O valor médio estimado da MCE para a queima da palha da cana-de-açúcar é mostrado na Tabela 1. Na Figura 1, é representada a relação entre os fatores de emissão dos compostos versus a eficiência de combustão modificada (MCE), que indica a quantidade relativa da fase de chama e da fase de incandescência do processo de combustão. Observa-se uma boa correlação entre os fatores de emissão e a MCE estimados: uma

correlação positiva para os compostos produzidos na fase de chamas do processo de combustão e uma correlação negativa para os compostos liberados na fase de incandescência.

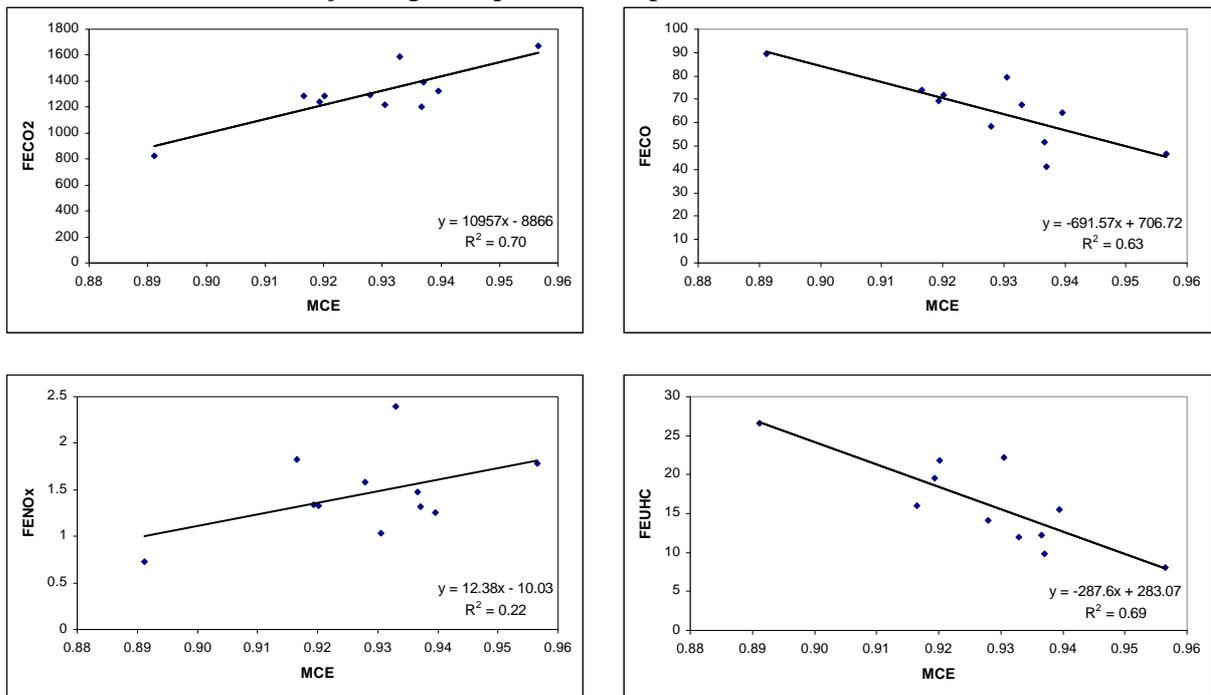


Figura 1 – Correlação entre os fatores de emissão (FE) de CO₂, CO, NO_x e UHC e a MCE.

Foram registradas, também, as fases do processo de combustão. A Figura 2 mostra estas diferentes fases registradas durante a queima da palha da cana-de-açúcar, em um dos experimentos realizados em laboratório. Observa-se que a combustão na fase de chamas (*flaming*) e a combustão na fase de incandescência (*smoldering*) produziram fumaças com diferentes composições químicas. Inicialmente, as emissões foram provenientes da fase de chamas, na qual ocorre o maior consumo de biomassa e é gerada uma maior quantidade de compostos como CO₂ e NO_x. Ao passo que os compostos oxidados de forma incompleta, tais como CO e UHC, foram gerados com maior concentração na fase de incandescência.

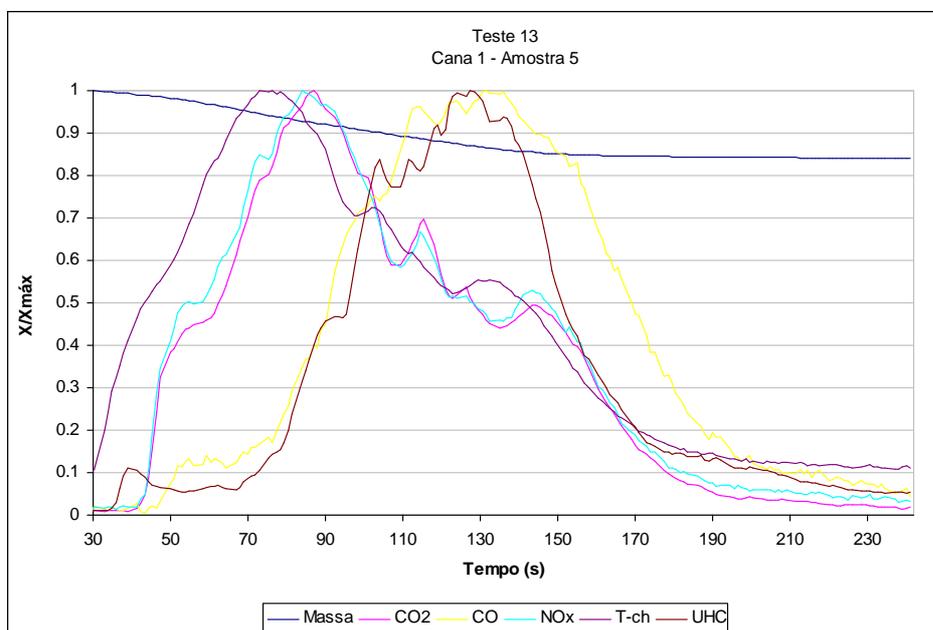


Figura 2 – Dados normalizados do Experimento 13, em função do tempo: emissões dos gases e sua relação com as fases da combustão.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fatores de emissão estimados para as espécies emitidas durante a queima da palha da cana-de-açúcar podem ser aproveitados para a geração de inventários de emissões mais realistas e, conseqüentemente, o aprimoramento dos resultados de modelos de qualidade do ar. Em particular, espera-se que, na próxima etapa deste trabalho, a inclusão destes fatores de emissão no modelo de emissões de poluentes 3BEM (*Brazilian Biomass Burning Emission Model*, Longo et al., 2010), disponível no CPTEC-INPE, contribua para a melhoria dos inventários de emissões para o Estado de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Srs. Luiz Antonio Paes e Luis Clarete, do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), e aos membros do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) – Edson Anselmo, Carlos A. dos Santos, Gislaíne F. de Matos e Emíliana Amorim – por todo o apoio prestado durante a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREAE, M. O. Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*. Ed. J. S. Levine, MIT Press, Cambridge, Mass., p. 3-21, 1991.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 15, n. 4, p. 955-966, 2001.
- ARTAXO, P.; MARTINS, J.; YAMASOE, M.; PROCÓPIO, A.; PAULIQUEVIS, T.; ANDREAE, M.; GUYON, P.; GATTI, L.; CORDOVA, A. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. *Journal of Geophysical Research*, v. 107 (D20), 8081, 14 p., 2002.
- CHRISTIAN, T. J.; KLEISS, B.; YOKELSON, R. J.; HOLZINGER, R.; CRUTZEN, P. J.; HAO, W. M.; SAHARJO, B. H.; WARD, D. E. Comprehensive laboratory measurements of biomass burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels, *J. Geophys. Res.*, 108, 4719, 2003.
- FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, p. 8525-8569, 2007.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, p. 1-11, 2010. doi:10.5194/acp-10-1-2010
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; YOKELSON, R.; ARTAXO, P. Biomass burning in Amazonia: emissions, long-range transport of smoke and its regional and remote impacts. In: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Dias, P. (Org.). *LBA synthesis book “Amazonia and Global Change”*. American Geophysical Union, 2009.
- LOPES, M. L. A.; CARVALHO, L. R. F. Estimativas de emissão de gases provenientes da queima de cana-de-açúcar em escala regional. In: 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2009, Salvador. *Anais 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*, 2009.
- SOARES NETO, T. G.; CARVALHO Jr., J. A.; VERAS, C. A. G.; ALVARADO, E. C.; GIELOW, R.; LINCOLN, E. N.; CHRISTIAN, T. J.; YOKELSON, R. J.; SANTOS, J. C. Biomass consumption and CO₂, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire, *Atmospheric Environment* 43 (2009) 438–446, 2009.
- YOKELSON, R. J.; KARL, T. G.; ARTAXO, P.; BLAKE, D. R.; CHRISTIAN, T. J.; GRIFFITH, D. W. T.; GUENTHER, A.; HAO, W. M. The tropical forest and fire emissions experiment: Overview and airborne fire emission factor measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5175–5196, 2007.
- YOKELSON, R. J.; CHRISTIAN, T. J.; KARL, T. G.; GUENTHER, A. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3509–3527, 2008.