



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

RICARDO ANTONIO MOLLMANN JUNIOR

SIMULAÇÃO DA EMISSÃO, CONCENTRAÇÃO E DISPERSÃO DOS POLUENTES
ORIUNDOS DA QUEIMA DE BIOMASSA DA CANA DE AÇÚCAR NO ESTADO DE
ALAGOAS UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM

MACEIÓ, AL

2014

RICARDO ANTONIO MOLLMANN JUNIOR

SIMULAÇÃO DA EMISSÃO, CONCENTRAÇÃO E DISPERSÃO DOS POLUENTES
ORIUNDOS DA QUEIMA DE BIOMASSA DA CANA DE AÇÚCAR NO ESTADO DE
ALAGOAS UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM

Dissertação submetida ao colegiado do
Curso de Pós-Graduação em Meteorologia
no Instituto de Ciências Atmosféricas da
Universidade Federal de Alagoas - UFAL,
Como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em
Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano
da Silva Júnior

MACEIÓ, AL

2014

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Maria Auxiliadora G. da Cunha

M726s Mollmann Junior, Ricardo Antonio.

Simulação da emissão, concentração e dispersão dos poluentes oriundos da queima de biomassa da cana de açúcar no estado de Alagoas utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM / Ricardo Antonio Mollmann Junior. – 2014.

128 f. : il.

Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.

Dissertação (Dissertação de Conclusão de Curso em Pós-graduação em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2014.

Bibliografia: f. 108-121.

Apêndices: f. 122-127.

1. Poluição atmosférica. 2. Queima de biomassa. 3. Cana-de-açúcar. 4. Modelagem atmosférica. 5. Sensoriamento remoto. 6. Química da atmosfera.
I. Título.

CDU: 551.502.6:633.61(813.5)

FOLHA DE APROVAÇÃO

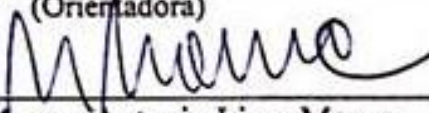
AUTOR: RICARDO ANTONIO MOLLMANN JUNIOR

SIMULAÇÃO DA EMISSÃO, CONCENTRAÇÃO E DISPERSÃO DOS POLUENTES
ORIUNDOS DA QUEIMA DE BIOMASSA DA CANA DE AÇÚCAR NO ESTADO DE
ALAGOAS UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM

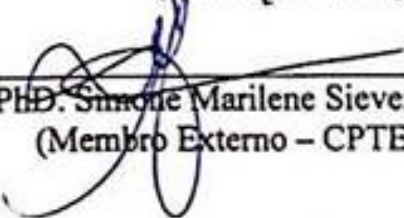
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia no Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, como parte dos requisitos à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e aprovada em (dia) de fevereiro de 2014.



Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior
(Orientadora)



Prof. Dr. Marcos Antonio Lima Moura
(Membro Interno)



Profa. PhD. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho
(Membro Externo – CPTEC/INPE)

DEDICATÓRIA

À REBECCA (em memória)

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. *Rosiberto Salustiano da Silva Júnior* por sua orientação intensiva, ensinamentos, conselhos, cobranças e, principalmente por sua amizade, fatores primordiais para conclusão deste estudo

Aos Professores do ICAT/UFAL, que contribuíram em minha formação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o período.

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD) pelo financiamento à missão de estudo no INPE.

Aos Doutores do INPE, *Dirceu Herdies, Saulo Freitas e Simone Costa*, por se disponibilizarem em receber-me no Instituto e contribuir para a elaboração desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Modelagem Atmosférica da UFAL, *Alaerte Germano, Arthur Lucas e Giuliano Carlos*, pela amizade e ajuda em vários momentos.

Aos amigos, alunos e funcionários do ICAT/UFAL, que me acolheram desde a minha chegada ao Estado de Alagoas.

Aos amigos do INPE, que também contribuíram para esta pesquisa.

À *Natália Sinhori e Jefferson Dornelles*, pela amizade e cooperação. Ambos, desempenhando o papel de família durante o período de mestrado.

Aos meus pais, *Ricardo Antonio Mollmann e Ilda Marina Correa Mollmann*, e minha irmã *Kamila Correa Mollmann* e avó *Maria Quintina Correa da Silva*, pelo carinho e suporte de confiança. Minha família não me ensinou nada sobre modelagem numérica, sobre química da atmosfera, tão pouco sobre sensoriamento remoto, mas ensinaram-me todo necessário para aprender sobre a vida.

A todas as pessoas que, de uma forma, contribuíram na minha formação acadêmica e moral.

“... E quando as coisas vão mal, você procura alguém para culpar, como se fosse uma sombra. O mundo não é um arco-íris nem um amanhecer, na verdade é um lugar ruim e asqueroso. E não importa o quão durão você seja, apanhará e ficará de joelhos, se assim permitir. Nem eu, nem você, nem ninguém baterá tão forte quanto à vida. Não importa o quão forte você bata, mas sim, quantos golpes você aguenta levar e continuar em frente, o quanto pode suportar e seguir adiante. Assim é a vida!”

Rocky Balboa (2006)
Sylvester Stallone, Metro-Goldwyn-Mayer (MGM) ®

RESUMO

No Brasil, o fogo é amplamente utilizado na plantação de cana-de-açúcar para a queima das palhas e limpeza do canavial, no sentido de facilitar o trabalhador rural no corte e manejo dessa vegetação. No Estado de Alagoas, um dos maiores produtores do país nesta cultura, utilizada esse procedimento durante o processo de colheita da cana. Afim de determinar o impacto causado por essas queimadas em Alagoas, bem como apresentar o padrão de transporte dos poluentes emitidos durante esse processo, foi realizada a implantação de um sistema de pré-processamento químico para servir como dados de base ao modelo numérico WRF/Chem. Este sistema se baseia em um inventário baseado nas emissões dos poluentes emitidos durante as queimadas de cana-de-açúcar a partir de estudos de referência. Este inventário, alimenta com informações dos poluentes (para este estudo foram analisados: CO e PM_{2,5}), os focos de queimadas detectados por diversos satélites, disponibilizados no site do CPTEC/INPE. As análises foram realizadas em forma de etapas, conforme as informações eram implantadas no sistema e para períodos diferentes. Para fazer uma avaliação direta dos resultados obtidos referente ao transporte e concentração do gás CO na atmosfera de Alagoas, foram utilizado dados de sondagem atmosférica para qualidade do (AIRS). Este sistema de coleta de dados, confirmou o sentido do transporte do poluente de forma acumulada para os dias de estudo pelo modelo. Para uma outra etapa: analisar a configuração vertical associada as queimadas, o chamado processo de *plume rise*. Este estudo analisou sua característica e influência durante a queima da cana no processo de ascensão da pluma, resultante da flutuabilidade positiva causada pelas altas temperaturas das queimadas em contato com ar ambiente. Foi observado durante o processo de queima, próximo ao foco, uma concentração máxima de 4000 ppbv de CO e de 60 µg/m³ para o PM_{2,5} de. Conforme a intensidade do vento, foi possível observar o transporte destes poluentes por quilômetros de distância do ponto inicial de emissão, essa observação se mostrou bastante condicionada não somente a ação do vento, mas também pela quantidade de focos próximos um ao outro, e pela natureza do poluente, gás ou aerossol. O CO, apresentou maiores deslocamentos devido a sua natureza pouca reativa após ser emitido, podendo ser observado em todos os dias de análise, sua influência na atmosfera de estados vizinhos à Alagoas, em concentrações entre 100-500 ppbv para um deslocamento superior a 300 km, e para localidades mais próximas, entre 2000-2500 ppbv, à 100 km da fonte. Para o PM_{2,5}, devido a sua característica de poluente sólido, o processo de permanência na atmosfera é mais curto. Foram analisados o transporte de PM_{2,5}, em localidades que haviam grande quantidade de focos de queimadas próximos, se deslocando por distâncias superior à 100 km, numa concentração entre 30-40 µg/m³. Foi possível observar que as emissões sobre os focos de queimadas realmente apresentam uma ascensão vertical próximo ao focos de queimada, e em especial para PM_{2,5}, observando a altura de injeção a cerca de 1,7 km da superfície. De forma geral a ferramenta BBEI para uso no modelo numérico WRF/Chem, demonstrou resultados positivos para representar o transporte e a concentração das emissões na realização de estudos da qualidade do ar devido à queima de biomassa.

Palavras-Chave: Poluição Atmosférica. Queima de Biomassa. Cana-de-açúcar. Modelagem Atmosférica. Sensoriamento Remoto. Química da Atmosfera.

ABSTRACT

In Brazil, the fire is generally used in sugar cane planting for the burning of straw and promoting clean the canebrake, making it easier for rural workers the cut and management of this vegetation. In the Alagoas state, one of the largest producers in the country in this culture, this procedure used during the process of harvest. In order to determine the impact of these fires in Alagoas, as well as presenting the transport of pollutants emitted during this process, the implementation of a system of chemical pre-processing data to serve as a basis for numerical model WRF/Chem performed. This system based on an inventory based on emissions of pollutants emitted during the burning of cane sugar from reference studies. This inventory feed with information of the pollutants (for this study were analyzed: CO and PM_{2,5}), the burning focus detected by several satellites, available in CPTEC/INPE site. Analyzes were performed in the form of steps, as were implanted in the information system and for different periods. To make a direct evaluation of the results obtained for the transport and concentration of CO gas in the atmosphere of Alagoas, data for atmospheric sounding quality (AIRS) were used. This system of data collection, confirmed the direction of transport of pollutant cumulatively for study days by the model. To another step: to analyze the vertical configuration associated fires, the process called plume rise. This study analyzed its characteristics and influence during the burning of sugarcane in the ascension process of the plume resulting from positive buoyancy caused by the high temperatures of fires in contact with ambient air. It observed during the burning, close to the focus, a maximum concentration of 4000 ppbv CO and 60 µg/m³ for PM_{2,5}. Of the according the intensity of the wind, it was possible to observe the transport of these pollutants for kilometers from the starting point of emission, this observation proved conditional, not only the action of the wind, but also by the amount of focus near one another, and the nature the pollutant, gas or aerosol. The CO, showed higher displacements due to their reactive nature little after being emitted and can be observed in everyday analysis, its influence on the atmosphere of the neighboring states Alagoas, at concentrations of 100-500 ppbv to a higher displacement 300 km, and closest, between 2000-2500 ppbv, at 100 km from the source locations. For PM_{2,5}, due to its characteristic of solid pollutant, the process remains in the atmosphere is shorter. Transport of PM_{2,5} were analyzed in localities that had lots of focus of fire near, by moving the upper 100 km, at a concentration of 30-40 µg/m³. It was observed that the emission of fires focus actually have a near vertical rise burning sources, and in particular for PM_{2,5}, observing the time of injection to about 1.7 km from the surface. Generally the BBEI tool for use in the numerical model WRF/Chem, demonstrated positive to represent the transport and concentration of emissions in studies of air quality due to biomass burning results.

Keywords: Atmospheric Pollution. Biomass Burning. Sugar Cane. Atmospheric Modelling. Remote Sensing. Atmospheric Chemistry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Visão aérea de talhões de cana-de-açúcar (A) em Matriz do Camaragibe no estado de Alagoas, durante o período de não queima e (B) em Bauru no estado de São Paulo, durante o processo de queimada.....	23
Figura 2.1 -	Ilustração dos mecanismos físicos de transporte, vertical e horizontal, do material emitido para atmosfera em uma queimada.....	31
Figura 2.2 -	Mapas de Incêndios Globais de 10 dias entre 30/06/2013 a 09/07/2013.....	36
Figura 2.3 -	(a) focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA & AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004 (número de focos em áreas de 40 x 40 km ²). (b) estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km ²	41
Figura 2.4 -	Concentração de CO para simulação com diferentes horários de emissão. Emissão entre 8 e 14Z (a); Emissão entre 14 e 20Z (b); Emissão entre 17 e 23Z (c). Concentração em [ppb].....	42
Figura 2.5 -	Vento μ a 70 m da superfície [m/s] e a concentração de PM _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para o dia 13 às 17Z. (a) com emissão de queimada, (b) sem emissão de queimada.....	42
Figura 2.6 -	Sequência de imagens caracterizadas pela ocorrência de “plumas” derivadas da queimada de cana-de-açúcar iniciando-se às 14:05 até 17:03, do dia 10/11/03, na divisa dos municípios de Porto Calvo e Porto de Pedras - Alagoas.....	46
Figura 3.1 -	Regiões ambientais do Estado de Alagoas.....	47
Figura 3.2 -	Mapa de Média Climatológica de regime pluviométrico no estado de Alagoas.....	49
Figura 3.3 -	Área Canavieira do estado de Alagoas.....	50
Figura 3.4 -	Topografia do estado de Alagoas em metros, (a) com a base de dados do modelo WRF, e (b) com as atualizações dos dados de STRM disponibilizados.....	55
Figura 3.5 -	Gráfico representativo aos focos de queimadas detectados por satélites, processados operacionalmente pelo DSA/INPE, de janeiro de 2009 a Maio de 2013.....	56
Figura 3.6 -	Focos de queimadas detectado pelos satélite de referência (AQUA_M-T).....	57
Figura 3.7 -	(A) Focos de queimadas para o mês de novembro de 2011. Os pontos de queimadas identificados pelo satélite estão na cor rosa, os pontos em vermelho são as representações municipais e (B) Focos de emissão de CO por queimadas	

	em Alagoas para o mês de nove novembro de 2011, inseridos no modelo WRF/Chem com base aos obtidos no site do CPTEC/INPE.....	62
Figura 3.8 -	Focos de queimadas observados no mês de janeiro de 2013 no estado de Alagoas, por satélites em órbita polar.....	63
Figura 3.9 -	Gráfico representativo ao número de focos diários detectados por satélites em órbita polar no estado de Alagoas de 01 de janeiro à 01 de fevereiro de 2013.....	64
Figura 3.10 -	Focos de queimadas observados das 12 horas às 12 horas do dia seguinte nos dias: (A) 27 de janeiro ao dia 28 de janeiro (51 focos), (B) 28 de janeiro ao dia 29 de janeiro (24 focos), (C) 29 de janeiro ao dia 30 de janeiro (26 focos), (D) 30 de janeiro ao dia 31 de janeiro (32 focos), (E) 31 de janeiro ao dia 01 de fevereiro (34 focos), no estado de Alagoas.....	65
Figura 3.11 -	Variação horária das entradas das emissões de queima de biomassa do modelo WRF/Chem, para (a) CO e (b) PM _{2,5}	68
Figura 3.12 -	Localização das cidades onde estão estações automáticas do INMET, no Estado de Alagoas.....	69
Figura 4.1 -	Representação da concentração do CO emitido nos seis pontos de emissão no dia 21 de Maio de 2011 às (A) 13Z, (B) 17Z e (C) 20Z, e no dia 22 de Maio de 2011 às (D) 00Z, (E) 07Z e (F) 12Z, respectivamente.....	72
Figura 4.2 -	Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 21 de maio de 2011 às (A) 13Z, (B) 14Z, (C) 15Z, (D) 16Z, (E) 17Z e (F) 18Z, (G) 19Z e (H) 20Z, respectivamente.....	73
Figura 4.3 -	Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 21 de maio de 2011 às (I) 21Z e (J) 22Z, (K) 23Z, (L) 00Z, (M) 01Z, (N) 02Z, (O) 03Z e (P) 04Z, respectivamente.....	74
Figura 4.4 -	Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 22 de maio de 2011 às (S) 07Z (T) 08Z (U) 09Z, (V) 10Z, (W) 11Z e (X) 12Z, respectivamente.....	75
Figura 4.5 -	Concentração de CO e direção do Vento às (A) 01Z, (B) 13Z e (C) 19Z do dia 01 de novembro de 2011.....	78
Figura 4.6 -	Concentração de CO e direção do Vento às (D) 01Z, (E) 13Z e (F) 19Z do dia 02 de novembro de 2011.....	79
Figura 4.7 -	Concentração de CO e direção do Vento às (G) 01Z, (H) 13Z e (I) 19Z do dia 03 de novembro de.....	80
Figura 4.8 -	Concentração de CO e direção do Vento às (J) 01Z, (K) 13Z e (L) 19Z Do dia 04 de Novembro de 2011.....	81
Figura 4.9 -	Concentração de CO e direção do Vento às (M) 01Z, (N) 13Z e (O) 19Z Do dia 04 de Novembro de 2011.....	82

Figura 4.10 -	Dados de Umidade Relativa (%) e Temperatura (°C) do ar, obtidos das estações do INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para os municípios de Maceió, Arapiraca e Coruripe.....	84
Figura 4.11 -	Dados de direção (%) e velocidade (°C) do vento, obtidos das estações INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para o município de (A) Maceió.....	85
Figura 4.12 -	Dados de direção (%) e velocidade (°C) do vento, obtidos das estações INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para os municípios de (B) Arapiraca e (C) Coruripe.....	867
Figura 4.13 -	Imagens do satélite GOES-13 no canal vapor d'água para às para 00Z dos dias (a) 28/01/2013, (b) 29/01/2013, (c) 30/01/2013, (d) 31/01/2013 e (e) 01/02/2013.....	87
Figura 4.14 -	Carta Sinótica do nível de 250hPa para às d'água para às 00Z do dia 28 de janeiro ao dia 01 de fevereiro de 2013.....	88
Figura 4.15 -	Carta de pressão ao Nível do Mar para 00UTC dos dias (a) 28/01/2013, (b) 29/01/2013, (c) 30/01/2013, (d) 31/01/2013 e (e) 01/02/2013.....	89
Figura 4.16 -	Dispersão e Concentração de Monóxido de carbono do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013 em Alagoas.....	95
Figura 4.17 -	Dispersão e Concentração de Material Particulado Fino do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013 em Alagoas.....	100
Figura 4.18 -	(A) localização no Estado de Alagoas do município de Penedo (-10.3S,-36.58W), e (B) Relação entre o níveis do modelo e altura vertical (metros).....	102
Figura 4.19 -	Ascensão da pluma de CO na caixa de grade durante o dia 28 de janeiro de 2013 (A) sem o mecanismo e (B) com o mecanismo.....	103
Figura 4.20 -	Ascensão da pluma de PM _{2,5} na caixa de grade durante o dia 28 de janeiro de 2013 (A) sem o mecanismo e (B) com o mecanismo.	104
Figura 4.21 -	Última imagem de saída do modelo para os 5 dias de análise, do dia 28 de janeiro a 1 de fevereiro, respectivamente	105
Figura 4.22 -	Total ascendente de CO na camada atmosférica do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 -	Representação dos maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2012.....	22
Tabela 2.1 -	Índice de qualidade do ar (IQAr) estabelecidos na resolução CONAMA nº3 de 28/06/90.....	25
Tabela 2.2 -	Fatores de Emissão de CO e PM _{2,5}	43
Tabela 2.3 -	Concentrações de CO e PM _{2,5} registrados em estudos sobre queimadas de cana-de-açúcar	45
Tabela 3.1	Descrição das etapas de evolução do estudo.....	59
Tabela 3.2 -	Parametrizações físicas e químicas utilizadas na execução do modelo WRF/Chem.....	60
Tabela 3.3 -	Valores utilizados na Equação 3.5, para dados de entrada no “Biomass Burning Emission Input” para queimadas da palha da cana-de-açúcar.....	66
Tabela 3.4 -	Representação do grau de correlação linear de Pearson.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB –	Alta da Bolívia
AERONET –	Aerosol Robotic Network
AIRS –	Atmospheric Infrared Sounder
AMSU –	Advanced Micro-Sounding Unit
ARW –	Advanced Research WRF
AVHRR -	Advanced Very High Resolution Radiometer
BaP –	Benzopireno
BBEI –	Biomass Burning Emission Input
CALIPSO –	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
CCATT-BRAMS –	The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CETESB -	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄ –	Metano
CH₃Cl -	Cloro Metano
CLP –	Camada Limite Planetária
CO –	Monóxido de Carbono
CO₂ –	Dióxido de Carbono
COHb –	Carboxihemo Globina
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs –	Compostos Orgânicos Voláteis e Semivoláteis
CPTEC –	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climático
DOE –	Diário Oficial do Estado
DSA –	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
EOS –	Earth Observing System
EC –	Carbono Elementar (Fuligem)
ENOS –	El Niño de Oscilação Sul
EOSDIS –	Earth Observing System Data and Information System
FAA –	U. S. Federal Aviation Administration
FAO –	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FIM	–	Flow-following finite-volume Icosahedral Model
FNL	–	NCEP Final Analysis
GES DISC	–	Goddard Earth Sciences, Data and Information Services Center
GFED	–	Global Fire Data
GFS	–	Global Forecast System
GIOVANNI	–	Geospatial Interactive Online Visualization and analysis Infrastructure
GOCART	–	Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport
GRACES	–	Global-Regional Atmospheric Chemistry Event Simulator
H₂	–	Hidrogênio
HC	–	Hidrocarbonetos
HCHO	–	Formaldeído
HPAs	–	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
H₂S₂	–	di-sulfito de hidrogênio
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	–	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQAR	–	Índice de Qualidade do ar
IPCC	–	Intergovernmental Panel on Climate Change
LIDAR	–	Light Detection and Ranging
MADE/SORGAM	-	Modal Aerosol Dynamics Model for Europe/ Secondary Organic Aerosol Model
MIRS	–	Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MM5	–	Meso-scale Model 5 generation
MMM	–	Mesoscale & Microscale Meteorology Division
MODIS	–	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAPAP	–	National Acid Precipitation Assessment Program
MOZART	–	Model of Ozone and Related Tracers
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	–	National Center for Atmospheric Research
NCEP	–	National Centers for Environmental Prediction

NCN	–	Núcleo de Condensação de Nuvens
NEB	–	Nordeste do Brasil
NGA	-	National Geospatial-Intelligence Agency
NH₃	–	Amônia
N₂O	–	Óxido Nitroso
NO₂	–	Dióxido de Nitrogênio
NO_x	–	Óxidos de Nitrogênio
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	–	U. S. Naval Research Laboratory
NWS	–	National Weather Service
O₃	–	Ozônio
OH	–	Hidróxidos
OMS	–	Organização Mundial de Saúde
ORA₂	–	Ácidos Orgânicos
PM_{2.5}	–	Material Particulado Fino (0,1 e 2,5 µm)
PM₁₀	–	Material Particulado Grosso (ou PM ₁₀ - Partículas inaláveis)
PNT	–	Previsão Numérica do Tempo
POAS	–	Perturbações Oscilatórias do Atlântico Sul
PPBV	–	Parte por Bilhão por Volume
PPMV	–	Parte por Milhão por Volume
PREP-CHEM-SRC	–	Pre-Processor of Chemistry Sources
PREVFOGO	-	Sistema Nacional De Prevenção e Combate De Incêndios Florestais
PTS	–	Partículas Totais em Suspensão
RADM2	–	Regional Acid Deposition Model (versão 2)
RAMS	–	Regional Atmospheric Modeling System
RETRO	–	Reanalysis of the Tropospheric chemical composition over the past 40 years.
RMSP	–	Região Metropolitana de São paulo
SEMARH/AL	–	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas
SIG QUEIMADAS	-	Sistema de Informações Geográficas de Queimadas

SINDAÇÚCAR/AL	– Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas
SOA	– Secondary organic aerosols
SO₂	– dióxido de enxofre
SRTM	– Shuttle Radar Topography Mission
Tg	– Tera grama
TPM	– Total de material particulado
VAS	– Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder
VCAN	– Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
UR	- Umidade relativa
USEPA	– United States Environmental Protection Agency
USGS Eros Data Center	- United States Geological Survey Data Center
UTC	– Universal Time Coordinated
Z	– Hora Zulu
ZCAS	– Zona de Convergência da América do Sul
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical
WRF	– Weather Research and Forecasting
WRF/CHEM	– Weather Research and Forecasting – Chemistry

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	Poluição Atmosférica	25
2.1.1	Índice de Qualidade do ar.....	26
2.1.2	Queima de Biomassa.....	27
2.1.3	Transporte de poluentes em queimadas.....	30
2.1.4	Remoção de poluentes emitidos em queimadas.....	32
2.1.5	Principais poluentes emitidos em queimada.....	32
2.1.6	Efeitos das queimadas à saúde.....	33
2.2	Sensoriamento Remoto e Poluição Atmosférica	35
2.2.1	Sensoriamento Remoto na identificação dos focos de queimadas.....	35
2.2..	Sensores Orbitais de Qualidade do Ar.....	37
2.3	Modelagem e Poluição Atmosférica	37
2.3.1	Acoplamento meteorologia e química.....	38
2.3.2	Modelo de dispersão de poluentes.....	38
2.3.3	Determinação da taxa de emissão de poluentes em queimadas.....	39
2.3.4	Estudos de Modelagem atmosférica e queimadas.....	40
2.4	Cana-de-açúcar	43
2.4.1	A cultura da cana-de-açúcar.....	43
2.4.2	Cana-de-açúcar no estado de Alagoas.....	44
2.4.3	Estudos sobre queimadas de cana-de-açúcar.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Área de Estudo	47
3.1.1	Topografia.....	
3.1.2	Vegetação.....	48

3.1.3	Climatologia.....	48
3.1..	Área Canavieira.....	50
3.2	Descrição e Configuração do WRF/Chem.....	50
3.2.1	Módulo químico do WRF/Chem.....	51
3.2.2	Atualização dados de Topografia.....	54
3.2.3	Programa de Emissão de queima de biomassa (BBEI)	55
3.2.3.1	Identificação dos focos de queimadas.....	55
3.2.3.2	Determinação da Taxa de Emissões dos Poluentes	57
3.2.3.3	Variação Temporal da Emissões.....	58
3.2.3.4	Atualização dos Focos de Queimadas.....	58
3.2.4	Configuração das Simulações.....	58
3.2.4.1	Evolução dos Testes com o WRF/Chem.....	58
3.2.4.2	Configuração do Biomass Burning Emission Input.....	60
3.3	Dados de qualidade do ar por Sensoriamento Remoto.....	68
3..	Dados Meteorológicos.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1	Fase INICIAL.....	71
4.2	Fase INTERMEDIÁRIA.....	76
4.3	Fase COMPLETA.....	83
4.3.1	Dados Meteorológicos.....	83
4.3.2	Análise Sinótica.....	86
4.3.3	Monóxido de Carbono.....	89
4.3.4	Material Particulado Fino.....	96
4.3.5	Contribuição da queimada na Convecção "Plume Rise".....	101
4.3.6	Sensoriamento Remoto.....	104
	CONCLUSÃO.....	107
	REFERÊNCIAS.....	108

APÊNDICE A.....	122
------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a qualidade do ar é considerada como uma das maiores preocupações no âmbito da saúde humana e do meio ambiente. Desde o século passado, estudos referentes à poluição e qualidade do ar se tornaram mais frequentes nos meios acadêmicos devido ao aumento da emissão de componentes químicos nocivos à saúde da população. A utilização desenfreada de combustíveis fósseis, a expansão de indústrias desde a Revolução Industrial e a prática extensiva de queima de biomassa pela agricultura, são alguns dos fatores para esse aumento na emissão de poluentes.

Além da queima de biomassa ser a maior fonte de partículas finas e a segunda em gases traços na atmosfera global (Crutzen e Andreae, 1990; Bond et al., 2004; Yokelson et al., 201), ainda assim, as partículas emitidas e formadas em plumas de queima de biomassa podem afetar de forma direta e indireta o clima (Hobbs et al., 1997; Rosenfeld, 1999; Akagi et al., 2011).

Vários estudos e experimentos vêm sendo realizados ao redor do mundo através de observações de sensores a bordo de satélites no intuito de entender os impactos causados pela queima de biomassa no clima e na qualidade do ar global (Zhang et al., 2008). Já a instalação de estações de medição de concentração de poluentes e qualidade do ar se tornam frequentes em grandes cidades que sofrem sobre a influência de queimadas no seu entorno. Também por meio de modelos computacionais acoplados, entre as partes química e meteorológica, que simulam os impactos causados pelas emissões de poluentes atmosféricos no meio ambiente. Este método é de maior valia para o estudo do impacto causado por queimadas, devido a abrangência de áreas maiores. Porém, uma das grandes dificuldades dos modelos que estudam a dispersão dos poluentes seria a determinação da localização e tamanho dos focos de queimadas e a taxa de emissão dos poluentes.

O modelo WRF (*Weather Research and Forecast*) é o Estado da arte nos sistemas de previsão do tempo em mesoescala. Em março do ano 2000, foi iniciada a implementação da química no modelo, a qual foi baseada, em comparações estatísticas com o modelo MM5/Chem (*Penn State/NCAR nonhydrostatic mesoscale model*), e fundamentado em dados detalhados de fotoquímica coletados durante a pesquisa de campo (NEAQS) no verão de 2002 (Grell et al., 2005). O modelo WRF/Chem trata-se de um modelo de acoplamento “*online*”, pois calcula a meteorologia e a química em conjunto, ou seja, a meteorologia influencia a química, bem como a química influencia a meteorologia. O modelo WRF/Chem tem sido largamente usado em estudos entre a interação de aerossol, reações químicas, traçadores químicos e condições

meteorológicas (Chapman et al., 2009; Gustafson et al., 2007; Ntelekos et al., 2009; Tie et al., 2009; Lin et al., 2010; Grell et al., 2010).

Grell et al. (2010), realizaram estudo para a inclusão da queima de biomassa no modelo WRF/Chem, e assim observar o impacto de queimadas na previsão do tempo no Alaska, durante o ano de 2004. Mostrou-se que, a inclusão dos incêndios nas simulações do modelo, acarreta na interação dos aerossóis com o balanço de radiação atmosférica, o que resultou em modificações significativas nos perfis verticais de temperatura e umidade em áreas sem nuvens. Por outro lado, quando as nuvens estavam presentes, as altas concentrações de aerossol fino ($PM_{2,5}$) e o grande número de Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN) tiveram um forte impacto sobre a microfísica de nuvens.

França (2012), estudou as emissões associadas a queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e seus impactos na qualidade do ar. Foi observado que os efeitos das emissões associadas à prática da queima da palha da cana-de-açúcar podem exceder a escala local e afetar também a composição química da atmosfera em Estados vizinhos, em especial, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Paraná. O estudo das emissões e da composição química da atmosfera na região de São Paulo foi realizado por meio do modelo CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*, Freitas et al., 2005), utilizado operacionalmente pelo INPE como ferramenta de previsão da qualidade do ar.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, responsável por mais da metade do açúcar comercializado (Ministério da Agricultura, 2013). Com uma produção de 721 milhões de toneladas em 2012, concentrado em 7,8 milhões de hectares (IBGE, 2013). O Estado de São Paulo é o maior produtor no país, responsável por mais 56% da produção no ano de 2012. Na Tabela 1.1, é apresentado os principais Estados produtores da cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2012, de acordo com dados do IBGE.

Tabela 1.1 Representação dos maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2012.

#	Unidade da Federação	Produção (Tons.)
1	São Paulo	406.152.815
2	Minas Gerais	70.521.498
3	Goiás	58.348.797
4	Paraná	47.940.989
5	Mato Grosso do Sul	37.761.461
6	Alagoas	27.674.454
7	Mato Grosso	17.108.709
8	Pernambuco	14.242.228
9	Bahia	6.894.350
10	Paraíba	5.865.365

Fonte: adaptado IBGE, 2013

O Nordeste do Brasil é produtor de cana-de-açúcar mais antigo do Brasil. No Estado de Alagoas, maior produtor da região nordeste, como nos demais Estados produtores de cana-de-açúcar, a cultura canavieira foi um dos fatores de formação e desenvolvimento regional. A produção em grande escala da cana-de-açúcar proporciona regionalmente um processo de monocultura agrícola, que é de fácil visualização nos tabuleiros costeiros do Estado, utilizando imagens de satélite. Na figura 1.1, são mostradas visões aéreas de canaviais no período sem e com queima.

O setor agrícola brasileiro vem sendo marcado por um novo ciclo no plantio da cana-de-açúcar para obtenção do álcool combustível, não apenas para substituição do petróleo devido à elevação dos preços internacionais, mas por questões relacionadas às mudanças climáticas, já que o etanol é uma fonte alternativa de energia renovável e menos poluidora. Dentre as fontes de energia usadas no Brasil, a cana-de-açúcar passou a ser a segunda matriz energética, superando a energia hidráulica, apenas atrás do petróleo (Gonçalves et al., 2013).

O cultivo da cana-de-açúcar se faz mais viável, tanto para produção de açúcar quanto para produção de etanol, em comparação à culturas como o milho, por exemplo, devido a fatores, como: custo, estocagem, fermentação e, principalmente, produtividade, onde um hectare de cana-de-açúcar rende 90 toneladas de cana e produz 7 a 8 mil litros de etanol, enquanto em uma área do mesmo tamanho de milho, produz apenas 15 a 20 toneladas de milho e apenas 3500 litros de etanol (Bosso e Machado, 2006; Weingrill, 2007; Salla e Cabello, 2010).

A queima da palha da cana-de-açúcar é um procedimento comum adotado no Brasil, com o propósito de facilitar as operações de colheita, oferecendo não só maior segurança ao trabalhador agrícola, ainda, oferecendo maiores lucros aos produtores devido à economia no tempo e ausência de maquinário agrícola. A queimada consiste em incendiar o canavial para promover a limpeza das palhas secas e verdes. Um dos pontos mais críticos sobre a queima da palha da cana-de-açúcar são as emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, como por exemplo: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e a formação do ozônio (O_3), além da poluição do ar atmosférico por matérias sólidas, como a fumaça e a fuligem (Gonçalves et al., 2013).

Figura 1.1 - Visão aérea de talhões de cana-de-açúcar (A) em Matriz do Camaragibe no Estado de Alagoas, durante o período de não queima e (B) em Bauru no Estado de São Paulo, durante o processo de queimada.



Fonte: (A) Fotografias aéreas, 2013; (B) Tyba, 2008.

Contudo, o objetivo principal deste trabalho são:

- ❖ Elaborar um sistema de pré-processamento químico para o acoplamento da meteorologia e química no WRF/Chem para queima de biomassa, levando em consideração a determinação de poluentes emitidos, bem como, quantidade emitida; localização dos focos de queimadas no Estado de Alagoas através de sensoriamento remoto; considerações específicas sobre o processo da queima da palha de cana-de-açúcar;
- ❖ Validar os resultados obtidos com estudos referentes à queima de biomassa, cana-de-açúcar;
- ❖ Validar os resultados com produtos de sensoriamento remoto oriundos de satélites com sensores ambientais;

- ❖ Avaliar os produtos obtidos pelo modelo atmosférico WRF/Chem em relação à dispersão dos poluentes e qualidade do ar no Estado de Alagoas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico será feito uma revisão de estudos bibliográficos referente à poluição atmosférica, queima de biomassa e cana-de-açúcar. A partir de considerações referente a poluição atmosférica é feito um levantamento informações detalhadas sobre todo o processo da queima de biomassa, a partir da ignição do incêndio até seu comportamento quando suspenso na atmosfera. Além de visões de autores sobre os diferentes meios de se estudar as emissões de queima de biomassa quando emitidas na atmosfera, referente a sensoriamento remoto e modelagem atmosférica, Por último, será discutido sobre a cana-de-açúcar, sua política e história no Estado de Alagoas.

2.1 Poluição Atmosférica

A legislação federal brasileira, na forma de Lei nº 6.938 de 1981 define poluição atmosférica como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, ainda, criem condições adversas às atividades sociais e econômicas, afetem desfavoravelmente a biota, afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente, e lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, Artigo 3º, inciso III, 1988).

O nível de poluição atmosférica é determinado pela quantificação de substâncias poluentes no ar. De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº3 de 28/06/1990, poluente atmosférica é:

“Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. ”

Em geral, essas substâncias podem se acumular de maneira que cause efeitos negativos sobre os seres vivos quando o meio ambiente se torna incapaz de absorver e eliminar os poluentes da atmosfera (Matsuda, 2009).

Entre os poluentes, existem alguns grupos que são usados como indicadores da qualidade do ar, em particular, causados pelos efeitos adversos sobre o meio ambiente e à saúde da população. Desta forma, estão inseridos: monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂),

óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), hidrocarbonetos (HC), ozônio (O₃) e o material particulado (PM). Esses poluentes uma vez presente no ar, ainda podem interagir química e fisicamente entre si, de modo a gerar componentes derivados (CETESB, 2009).

2.1.1 Índice de Qualidade do ar

O Índice de Qualidade do Ar é um padrão utilizado para transformar as concentrações dos diversos poluentes em um único valor adimensional que possibilita a comparação com os limites legais de concentração para os diversos poluentes.

Na Tabela 2.1, são mostrados os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e os critérios para episódios agudos da poluição do ar estabelecidos conforme a Resolução CONAMA nº 03 de 28/06/1990, para seis poluentes atmosféricos, a saber: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (PI10), Dióxido de Enxofre, Dióxido de Nitrogênio, Ozônio e Monóxido de Carbono.

Tabela 2.1. Índice de qualidade do ar (IQAr) estabelecidos na resolução CONAMA nº3 de 28/06/90.

ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR (IQAr)								
Qualidade	Índice	Níveis de Cautela Sobre a Saúde	PTS (µg/m ³)	PI ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (ppm)	O ₃ (µg/m ³)
Boa	0-50		0-80	0-50	0-80	0-100	0-4,5	0-80
Regular	51-100		81-240	51-150	81-365	101-320	4,6-9,0	81-160
Inadequada	101-199	Insalubre para grupos sensíveis	241-375	151- 420	366-800	321- 1130	9,1- 15,0	161- 400
Má	200-299	Muito insalubre (Nível de Atenção)	376-625	251- 420	801- 1600	1131- 2260	15,1- 30	401- 800
Péssima	300-399	Perigoso (Nível de Alerta)	626-875	421- 500	1601- 2100	2261- 3000	30,1- 40	801- 1000
Crítica	400 ou maior	Muito perigoso (Nível de Emergência)	>875	>500	>2100	>3000	>40	>1000
Os índices, até a classificação REGULAR, atendem aos Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 03 de 28/06/1990.								

Fonte: CONAMA, 1990.

2.1.2 Queima de Biomassa

A queima de biomassa é uma ferramenta utilizada comumente para ajudar no manejo da terra e atividades relacionadas, incluindo: o desmatamento de florestas e savanas para uso agrícola e de pastagens; controle de grama, ervas daninhas, lixo e por vezes pragas; em terras agrícolas e de pastagem pode estar associada na eliminação de palhas e resíduos, antes e depois a colheita (Levine et al., 1995).

Biomassa pode ser definida como sendo o resultado da fotossíntese para a produção de hidratos de carbono estruturais e não estruturais que compreendem em tecidos dos vegetais ou das plantas. Os componentes de biomassa incluem celulose, hemicelulose, lignina, lipídios, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos. As concentrações de cada classe de compostos podem variar dependendo da espécie, do tipo de tecido de planta, fase e condições de crescimento. A matéria vegetal, ou biomassa, pode ser considerada com uma fonte primária de energia, utilizada na alimentação de seres vivos e assim manutenção da vida na terra, ou como matéria prima para produção de outras formas de energia, em forma de combustível (Jenkins et al. 1998).

Queima, ou combustão, é um processo complexo envolvendo reações químicas, físicas e transferência de massa e calor. O processo de queima também é definido como a combinação de reagentes, tais como: combustíveis, água e ar; esses reagem entre si para produção de alguns produtos da combustão e emissões (Jenkins et al. 1998; Wardoyo, 2007).

Queima de biomassa é a queima de vegetação, viva ou morta. Essa pode ser antropogênica, quando o ser humano inicia a queimada, sendo para o desmatamento e/ou mudança no uso da terra. Já na forma biogênica, naturalmente, no caso de incêndios induzidos por raios, por exemplo. Os cientistas estimam que os seres humanos são responsáveis por cerca de 90% da queima de biomassa, com apenas uma pequena percentagem de incêndios naturais, contribuindo para a quantidade total da vegetação queimada (NASA - Earth Observation, 2013). A queima de biomassa libera grandes quantidades de partículas sólidas (partículas de combustão de carbono sólido) e gases, incluindo gases de efeito estufa.

O conteúdo de umidade da biomassa também determina processo de combustão. Se o conteúdo de umidade é elevado, não reagem espontaneamente e uma maior quantidade de energia é necessária para evaporar a água. Isto reduz o valor calorífico da biomassa e diminui a eficiência da combustão (Jenkins et al., 1998). Por outro lado, o menor conteúdo de umidade faz com que a biomassa queime de forma mais rápida, levando a uma queima incompleta, o que

umenta a formação de partículas de fumaça (partículas sólidas). O fornecimento de oxigênio durante a queima tem sido reconhecido como um fator importante que contribui para a produção de emissões (Zou et al, 2003; Wardoyo, 2007).

De acordo com Freitas et al. (2005), a evolução de uma queimada é descrita em quatro estágios: ignição, chamas, brasas e extinção. O estágio de ignição da biomassa depende do seu tipo e de sua umidade e de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e vento. O estágio de chamas inicia-se com um processo pirolítico, durante o qual as elevadas temperaturas provocam uma ruptura das moléculas constituintes da biomassa. Componentes de alto peso molecular são decompostos em compostos de peso molecular mais baixo, tais como o carvão e o alcatrão, os quais constituem fonte primária de energia para as chamas, e finalmente em compostos de natureza gasosa. A temperatura numa queimada pode chegar a 1800K, produzindo carvão e liberando, principalmente, vapor d'água, CO₂ e CO (dióxido e monóxido de carbono, respectivamente). Com a diminuição das condições necessárias para a manutenção das chamas, a queima entra em um estágio mais “frio”, denominado, fase de brasas, quando a temperatura no interior da chama está abaixo de 1000 K, reduz-se drasticamente a produção de CO₂, há uma grande emissão de compostos incompletamente oxidados, como o CO, além de uma rápida formação de partículas e acreção de partículas orgânicas de carbono.

O estágio de brasa é a responsável pela emissão da maior parte do material particulado (Ward et al., 1992). A extinção pode ser alcançada devido a vários fatores, além da diminuição da quantidade de biomassa disponível. Fatores ambientais causadores seriam, por exemplo, o resfriamento convectivo devido ao entranhamento de ar mais frio, o resfriamento radiativo e o baixo suprimento de oxigênio em relação à densidade e tamanho da biomassa. A quantidade de água na biomassa pode determinar qual fase, de chamas ou de brasas, será mais significativa, definindo, por exemplo, as proporções de CO e CO₂ emitidos. O clima local tem grande relevância na determinação da quantidade de biomassa disponível para a queima. O tempo local, através da temperatura, precipitação e umidade e o vento, determinam condições necessárias para a ocorrência do fogo e seu comportamento, no que refere à razão entre a combustão da fase de chamas para a de brasas.

A fase de brasas é a que apresenta maior número de diferentes compostos emitidos, enquanto que a fase de chamas apresenta maiores quantidades de material emitido. A principal emissão acontece na forma de CO₂, produzido principalmente na fase de chamas. As emissões deste composto representam em média cerca de 80% a 85% da massa total de carbono queimado, podendo, no entanto, variar de 50% a 99%. A emissão de carbono na forma de CO

representa em média 7%, podendo variar entre 2% a 15%. Em terceiro lugar, aparecem os hidrocarbonetos com médias em torno de 2% a 3%, com CH₄ (metano) representando cerca de 0,5%. O material particulado é emitido em ambas as fases, sendo sua composição elementar e distribuição de tamanho dependentes do estágio em que foi emitido (Lobert e Warnatz, 1993; Freitas et al., 2005).

O fogo é, também, amplamente utilizado na plantação de cana-de-açúcar, normalmente, essa prática ocorre ao entardecer por ser um horário em que a temperatura e a umidade do canavial são menores, os ventos são mais fracos e mantém a direção constante. O fogo é intenso, porém, dura pouco tempo, especialmente se o clima estiver seco e com baixa umidade, o que é característico do clima de inverno no interior paulista. A duração do fogo é de cerca de 20 a 30 minutos, dependendo do tamanho do talhão, e cessa após a queima total da palha seca (Zancul, 1998)

A queima intencional de terras ocasiona uma das principais fontes de produtos de combustão para a atmosfera. A queima de vegetação inclui a emissão de gases como CO₂, CO, NO_x (Óxidos de Nitrogênio), CH₄ (Metano), hidrocarbonetos não metálicos e partículas elementares e orgânicas. Para CH₄, por exemplo, estima-se que 40 Tg/ano de um total emitido de 598 Tg/ano é resultado da queima de biomassa. Para CO, uma fonte de biomassa emite 700 Tg/ano de um total de 2780 Tg/ano. Para NO_x, é estimado que a queima de biomassa contribui globalmente com 7,1 Tg/ano, comparado com 33 Tg/ano para a queima de combustíveis fósseis (Seinfeld, 2006). O efeito das emissões das queimadas sobre a química da atmosfera e clima, principalmente nos trópicos, é extremamente importante.

Crutzen e Andrae (1990) e Andrae (1991), quantificaram a contribuição da queima de biomassa para emissões globais anuais de alguns gases, comparando com as emissões totais de outras fontes incluindo a queima de biomassa. É bastante evidente a partir da Tabela 2.1, que a queima de biomassa resulta em contribuições importantes a nível mundial para a emissão atmosférica de vários dos referidos gases. Como grande parte da queima é concentrada em regiões limitadas e ocorre principalmente durante a estação seca, não é surpreendente que o resultado das emissões de queima de biomassa se compare nos níveis de poluição atmosférica ao das regiões industrializadas de países desenvolvidos. Esta comparação se aplica especialmente a um grupo de gases que são os principais atores na fotoquímica atmosférica: hidrocarbonetos (por exemplo o CH₄), CO e NO_x. Estes gases têm uma forte influência sobre a química de O₃, e OH (hidróxidos), e, assim, sobre o Estado oxidante da atmosfera. A queima

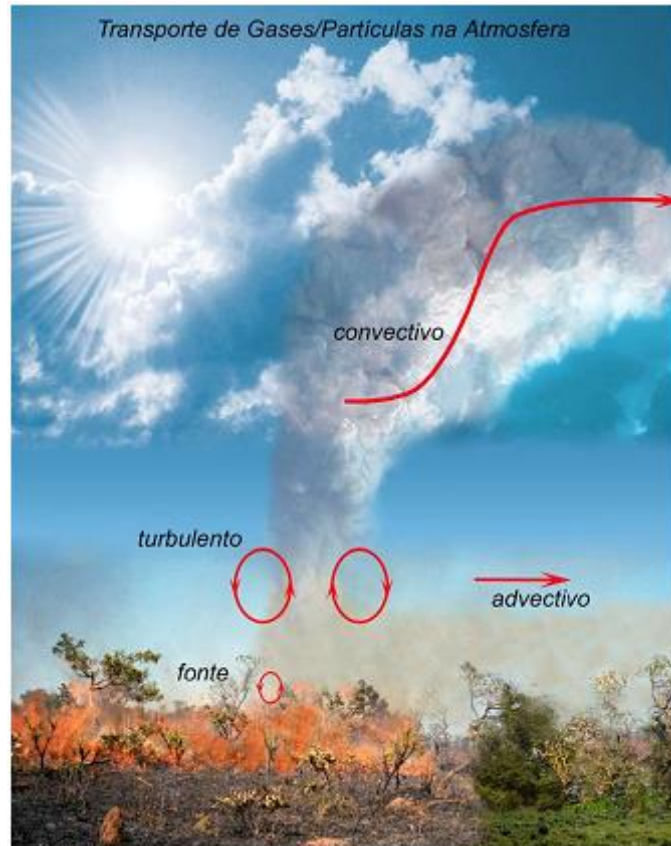
de biomassa inclui todos os incêndios em vegetações ao redor do mundo, Florestas, savanas e terrenos agrícolas (seja para limpeza ou mudança no uso do terreno).

2.1.3 Transporte de poluentes emitidos em queimadas

O processo de transporte vertical de poluentes emitidos em queimadas é associado diretamente a temperatura do material. Os gases e partículas que são emitidos em uma queimada obtêm uma flutuação positiva, devido a diferença de temperatura dos mesmos em relação ao ar ambiente. Um dos fatores determinantes para altura final em que estes poluentes são injetados na atmosfera é a estabilidade termodinâmica (Freitas et al. 2005). Ainda há a relação entre a pluma de fumaça emitida e o ambiente, através da turbulência, que faz com que o ar mais frio do ambiente se misture com a pluma e ocorra a diluição da mesma.

A mistura turbulenta da camada limite diurna, também transporta verticalmente estes materiais, tendendo a homogeneizá-los por toda a camada de mistura. Na direção horizontal, a advecção ocasionada pelo vento domina o transporte, arrastando os poluentes na direção do fluxo da atmosfera dentro da Camada Limite Planetária (CLP). O entranhamento no topo da CLP e processos convectivos úmidos atuam para transportar estes materiais para a troposfera, rompendo a estabilidade no topo da CLP. Sistemas convectivos rasos e não-precipitantes formam-se no topo da CLP e, tipicamente, atuam transportando gases e partículas para a baixa troposfera, e desta forma ajudam na dispersão dos poluentes. Sistemas convectivos profundos e precipitantes atuam de formas distintas dependendo da natureza higroscópica dos traçadores. CO₂ e CO, por exemplo, possuem baixa higroscopicidade, e desta forma são transportados pelas correntes ascendentes até o topo da nuvem na alta troposfera onde são desentranhados no ambiente. Uma vez na troposfera, o transporte destes poluentes se dá de forma mais eficiente devido às velocidades maiores do fluxo de ar, transportando-os para regiões distantes dos locais de emissão, transformando o problema de escala local para continental ou, mesmo, global (Freitas et al., 2005). A figura 2.1 mostra os mecanismos de transporte de emissões de queimadas para atmosfera.

Figura 2.1 Ilustração dos mecanismos físicos de transporte, vertical e horizontal, do material emitido para atmosfera em uma queimada.



Fonte: Freitas et al., 2005.

A Dispersão é o processo no qual os poluentes se espalham por uma grande área e, assim, reduzindo a sua concentração (Kozarev et al., 2011). Os Fatores que podem afetar a dispersão dos poluentes são:

O vento pode contribuir na mistura dos poluentes com o ar limpo, causando assim a sua diluição. Mas quando o vento está calmo, a diluição se torna um processo muito lento. Assim como o vento depende das condições meteorológicas ele também depende dos obstáculos que irá encontrar na superfície da Terra, que podem vir a contribuir na diminuição da velocidade do mesmo. Desse modo, em áreas urbanas há uma diminuição da diluição dos poluentes do ar pelo vento, pois este encontra impedimentos em seu caminho. Em áreas não urbanas, como áreas agrícolas ou florestas tropicais, locais onde há queima de biomassa, devido à falta de obstáculos, os poluentes tendem a dispersar livremente por grandes localidades de acordo com a velocidade do vento.

2.1.4 Remoção de poluentes emitidos em queimadas

Processos de remoção de poluentes da atmosfera são mais eficientes dentro da CLP, de modo que, uma vez transportados para a alta troposfera, a vida-média destes pode aumentar (Freitas et al., 2005). Porém, partículas de fumaça podem servir como núcleos de condensação do vapor de H₂O para formar gotículas de nuvem ou neblina, e ainda haver colisão das gotas de chuva e partículas dentro e abaixo das nuvens (Goddish, 2004). Esse processo denominado deposição úmida, inclui todos os processos pelos quais os gases e partículas suspensas no ar são transferidas para a superfície da Terra na forma aquosa (chuva, neve, nevoeiro, nuvens, orvalho). Sistemas convectivos induzem também a formação de correntes descendentes que trazem parcelas de ar da média troposfera para a CLP, diluindo e esfriando a atmosfera local (Freitas et al., 2005). As interações de camadas de ar e substâncias emitidas, sejam elas partículas ou gás com a superfície terrestre (vegetação, água ou solo) induzem também a remoção do material, num processo denominado deposição seca (Goddish, 2004).

2.1.5 Principais poluentes emitidos em queimadas

Material Particulado (PM) - Material Particulado é o termo usado para descrever uma complexa mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar, de origem natural ou antropogênica. O tamanho, a composição química, e outras propriedades físicas e biológicas dependem da fonte e das transformações atmosféricas sofridas pelas partículas. A descrição comumente utilizada para caracterizar o material particulado quanto ao tamanho é o diâmetro aerodinâmico, definido como o diâmetro de uma esfera densa que tem a mesma velocidade de sedimentação da partícula em questão (Dockery and Pope, 1994; Arbex, 2001). O diâmetro pode variar entre 0,002 µm e 100 µm. As partículas grandes com diâmetro acima de 100 µm não permanecem por muito tempo em suspensão e tendem a precipitar rapidamente. As partículas de maior importância para os aspectos físico-químicos da atmosfera e para a saúde humana são as de diâmetro compreendido entre 0,002 a 10 µm (Arbex, 2001). Com base no diâmetro as partículas podem ser classificadas da seguinte forma:

Ultrafinas ou núcleo de Aitken (partículas com diâmetro menos que 0,1 µm);

Finas ou de acumulação (partículas com diâmetro entre 0,1 e 2,5 µm);

Grandes ou grossas (partículas com diâmetro maior que 2,5 µm).

Partículas finas e ultrafinas são preferencialmente emitidas por processos de combustão. Geralmente as partículas finas e ultrafinas são compostas por material carbonáceo, metais

compostos orgânicos e íons sulfatos, nitratos e amoníacos. As partículas ultrafinas tendem a se agrupar por aglomeração ou por condensação, aumentando o diâmetro aerodinâmico e transformando-se em partículas finas (USEPA, 1996). Segundo Ward and Hardy (1989) apud Who (1999), a combustão com ausência de chamas libera várias vezes mais partículas finas que a combustão com chamas.

Monóxido de Carbono (CO) - O CO é um gás tóxico incolor e inodoro produzido pela combustão incompleta na queima de biomassa é menos abundante do que o CO₂ e o vapor de água. O CO é produzido mais abundantemente durante a combustão com ausência de chamas, sendo que imediatamente após cessar a combustão são produzidos os níveis máximos de CO. O mecanismo de toxicidade do monóxido de carbono está relacionado a sua grande afinidade com a proteína heme¹ carregadora de oxigênio. Essa proteína apresenta afinidade 220 vezes maior pelo monóxido de carbono do que com o oxigênio e a exposição ao monóxido de carbono produz no indivíduo a carboxihemoglobina (COHb) (Arbex, 2001). A carboxihemoglobina formada diminui a capacidade do sangue de transportar oxigênio. Atua também desviando a curva de dissociação de hemoglobina para a esquerda levando a uma diminuição da liberação de oxigênio nos tecidos (Elson, 1987). Concentrações de CO de 35 ppm durante três a quatro horas eleva o nível de carboxihemoglobina em 5% e produzem em seres humanos sinais de desorientação e fadiga. Exposição a pequenas e moderadas concentrações de CO prejudica o raciocínio e a percepção produz cefaleia, diminuição dos reflexos, redução da destreza manual, e sonolência. Em altas concentrações pode levar à morte. Indivíduos com doença cardiovascular ou respiratória pré-existente, crianças, idosos, e grávidas são considerados indivíduos de alto risco (Malilay, 1999 apud Arbex, 2001).

2.1.5.1 Efeitos das queimadas à saúde

As emissões de queima de cana-de-açúcar podem apresentar riscos maiores para crianças, idosos e asmáticos e têm como consequência maior demanda do atendimento dos serviços de saúde (Ribeiro, 2008). Até recentemente, estudos com cana tinham a preocupação, apenas com trabalhadores no processo produtivo, no estudo Phoolchund (1991) mostrou que cortadores

¹ Heme – é um grupo prostético que consiste de um átomo de ferro contido no centro de um largo anel orgânico heterocíclico chamado porfirina. O grupo heme possui um átomo de ferro ferroso "Fe⁺⁺" para exercer a função de ligação com o oxigênio em células sanguíneas, parte se liga a um resíduo de histidina da globina e outra a uma molécula de oxigênio, a mioglobina possui um grupo heme na sua cadeia polipeptídica a hemoglobina possui quatro grupos heme.

apresentavam riscos mais elevados de câncer de pulmão em consequência da queima da folhagem.

Nas queimadas, a combustão é incompleta, com formação de compostos não totalmente oxidados irritantes ao sistema respiratório e, em alguns casos, carcinogênicos. Malilay (1999) afirma que o material particulado fino alcança os alvéolos e em grandes concentrações entra na corrente sanguínea ou fica nos pulmões, resultando em doenças crônicas, como enfisema. O monóxido de carbono pode causar hipóxia, ao prevenir o sangue de carregar oxigênio suficiente. Fetos são especialmente susceptíveis, pois não podem compensar pela redução na oxihemoglobina sem aumento sustentado na frequência cardíaca. Os aldeídos são irritantes das mucosas e alguns, como o formaldeído, podem ser carcinogênicos. Compostos orgânicos voláteis podem irritar a pele e os olhos, causar tontura, tosse e chiado e alguns são carcinogênicos. Alguns desses gases, que por si só já são altamente danosos para a saúde e o bem-estar da população são percussores do Ozônio, na medida em que ao reagirem fotoquimicamente na atmosfera transformam-se neste gás, gerando a alta acumulação de Ozônio na baixa atmosfera. Tal fenômeno é conhecido como "smog fotoquímico". Ozônio, em altas concentrações, pode afetar a função pulmonar, causar tosse, engasgo, falta de ar, muco, coceira e ardor na garganta, náusea e diminuição da função pulmonar, quando em exercício (Malilay 1999).

Além da liberação dessas substâncias, a queima da palha de cana-de-açúcar produz a "fuligem", consistente em material particulado, proveniente da combustão incompleta da matéria de queimada. Nesta fuligem foi detectada a presença massiva dos chamados hidrocarbonetos policíclica aromática. Tais substâncias são consideradas de controle prioritário pela Agência de Proteção ambiental Americana (USEPA). Sua importância se deve ao fato de tratar de substâncias carcinogênicas, teratogênicas e/ou mutagênicas. Além disso, também contribuem para danificar significativamente a flora, uma vez que se depositam sobre as folhas, interferindo no processo de fotossíntese. Assim, além de causar danos à saúde da população, a fuligem oriunda da queima da palha da cana-de-açúcar interfere também no desenvolvimento de outras espécies vegetais.

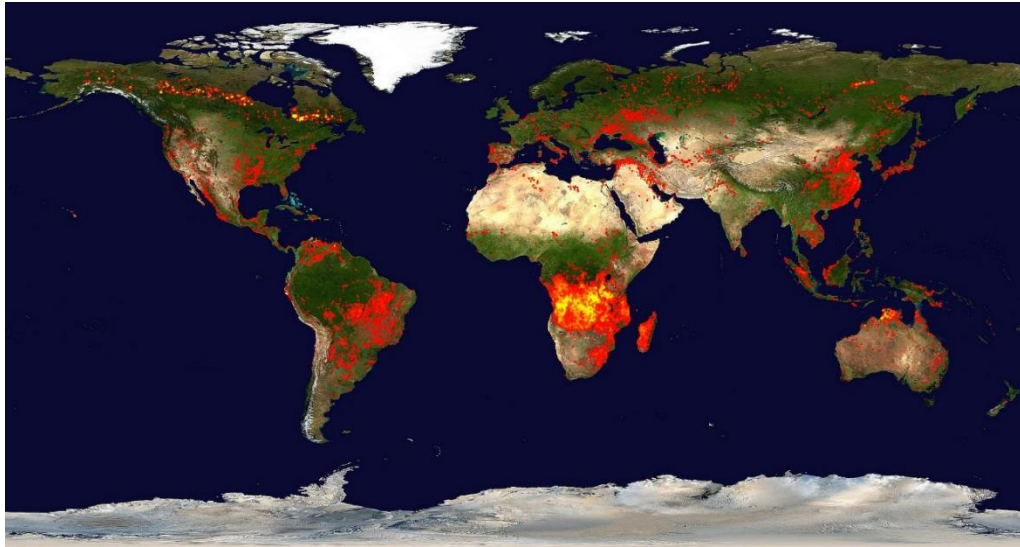
Mazzoli-Rocha et. al, (2008) em pesquisa demonstraram que uma única pequena dose de partículas ambientais produzidas pelo tráfego ou queima de cana de açúcar induz alterações significativas na mecânica pulmonar e histologia do pulmão em camundongos. Porém, a mecânica das vias aéreas é mais afetada em partículas de origem de queima de biomassa.

2.2 Sensoriamento Remoto e Poluição Atmosférica

2.2.1 Sensoriamento Remoto na identificação dos focos de queimadas

Uma maneira de determinar com precisão a localização exata e a extensão dos incêndios é tendo uma visão global do espaço e assim realizando medições espaciais. O monitoramento de queimadas em imagens de satélites é particularmente útil para regiões remotas sem meios intensivos de acompanhamento, condição esta que representa a situação geral do Brasil. Uma vez que nenhum satélite já tenha se dedicado ao monitoramento e medição do fogo, a maioria das observações de incêndios do espaço são obtidos a partir de satélites existentes desenvolvidos para outros fins. Medições de fogo são oriundas do AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) presente na série de satélites do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e através do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) presente nos satélites da NASA, Terra e Aqua. Os satélites com os sensores AVHRR e MODIS podem determinar a localização e o tamanho da área queimada (Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios – INPE, 2012). Os sensoriamentos remotos de incêndios globais indicam a África como "centro do fogo" no planeta, com mais biomassa consumida pelo fogo do que em qualquer outro lugar na Terra. A Figura 2.2 representa mapas de incêndios globais, de 10 dias entre 30/06/2013 a 09/07/2013, localizado através do sensor MODIS, para representar a atividade do fogo atual ao redor do mundo. Os mapas de incêndios acumulam as localizações dos incêndios detectados pelo sensor a bordo dos satélites da NASA, Terra e Aqua, ao longo de um período de 10 dias. Cada ponto colorido indica um local onde MODIS detectou pelo menos um incêndio durante o período de composição. As Cores variam do vermelho (baixo), até o amarelo (alto), para a contagem de focos de queimadas.

Figura 2.2 - Mapas de Incêndios Globais de 10 dias entre 30/06/2013 a 09/07/2013.



Fonte: NASA – EOSDIS, 2013.

Setzer e Pereira (1991) implementaram de forma operacional no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a técnica de detecção de focos de queimadas na região de cerrado e floresta tropical no Brasil, usando o radiômetro AVHRR, a bordo da série de satélites NOAA. São utilizados todos os satélites que possuem sensores óticos operando na faixa termal-média de 4 μ m e que o INPE consegue receber através do seu sistema de recepção. Atualmente, são processadas operacionalmente, na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA -INPE), as imagens AVHRR dos satélites polares NOAA-15, NOAA-16, NOAA-18 e NOAA-19, as imagens MODIS dos satélites polares NASA TERRA e AQUA, as imagens dos satélites geoestacionários GOES-12, GOES-13 e MSG-2. Cada satélite de órbita polar produz pelo menos um conjunto de imagens por dia, e os geoestacionários geram algumas imagens por hora, sendo que no total o INPE processa mais de 100 imagens por dia especificamente para detectar focos de queima da vegetação. Esses produtos são disponibilizados em tempo quase real no site do INPE (<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Para os satélites em órbita polar (série de satélites do NOAA a 800 km de distância da Terra, e os satélites da NASA, Terra e Aqua a 730 km), trabalhos de validação de campo indicaram que incêndios com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura, ou maior, serão detectados. Para os geoestacionários, a 25 mil km de distância da Terra, o incêndio precisa ter o dobro de tamanho para ser localizado. Entretanto, como o elemento de resolução espacial (píxel) do satélite de órbita polar tem 1 km x 1 km ou mais, uma queimada de algumas dezenas de m² será identificada como tendo pelo menos 1 km². Nas imagens dos satélites geoestacionários, onde o píxel tem 4km x 4km, esta pequena queimada passará a ser indicada

por uma área de 16 km² ou mais. Assim, um foco de queimada, pode ser considerado como um píxel de queima, pode indicar tanto uma pequena queimada assim como várias pequenas queimadas, ou apenas um incêndio muito grande no seu interior (<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>).

2.2.2 Sensores Orbitais de Qualidade do Ar

O sensoriamento remoto via sensores (passivos e ativos) vêm obtendo grandes avanços no meio científico e tecnológico para quantificar poluentes na atmosfera. A NASA é um dos destaques nesse sentido, com sensores que fazem a medição da camada atmosférica de poluentes emitidos por diversas fontes ao redor do mundo, com o programa especial de monitoramento da Terra chamado de EOS (*Earth Observing System*). O EOS é um programa com vários satélites em órbita polar para observações globais. O programa é formado por uma série de satélites lançados desde 1997. Informações sobre os satélites podem ser obtidas na internet através do endereço: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/mission_profiles/index.php. Para estudos referentes a queima de biomassa e uma análise através de sensoriamento remoto, os sensores mais importantes são: MODIS, MIRS (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*), AERONET (*Aerosol Robotic Network*), CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation*) e AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*). Os três primeiros sensores realizam o monitoramento de aerossóis e o último quantifica gases do efeito estufa na atmosfera. O CALIPSO elabora os dois tipos de estudo.

2.3 Modelagem e Poluição atmosférica

A modelagem numérica é uma importante ferramenta para estudo e previsão do impacto de gases traçadores e aerossóis na atmosfera e na qualidade do ar. Vários modelos de transporte atmosférico em escala regional e global têm sido propostos na literatura. Chatfield et al. (1996) usou o *Global-Regional Atmospheric Chemistry Event Simulator* (GRACES) para introduzir um modelo conceitual de como as emissões de incêndios e da química, produzem as plumas no continente africano. O modelo *Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport* (GOCART) é um exemplo de modelo de transporte global. Chin et al. (2000) empregou GOCART para simular o ciclo sulfúrico atmosférico global. Chatfield et al. (2002) apresentou uma conexão entre emissões tropicais e um pluma subtropical de monóxido de carbono em áreas remotas sobre o Oceano Pacífico, usando os modelos GRACES e MM5. MOZART (*Model of Ozone And Related Tracers*) é um modelo “off-line” de transporte global apropriado para simulação tridimensional da distribuição de espécies químicas na atmosfera

(Brasseur et al., 1998; Horowitz et al., 2003). Grell et al. (2000) descreveu um modelo químico complexo em multi-escala acoplado ao modelo *Penn State/NCAR nonhydrostatic mesoscale* (MM5-CHEM). Outros modelos de transporte regional e totalmente acoplado de forma “*on-line*” baseados em modelos atmosféricos usados são: *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS; Freitas et al., 2005b; Wang et al., 2006) e o *Weather Research & Forecasting Model* (WRF; Grell et al., 2005; Fast et al., 2006).

2.3.1 Acoplamento meteorologia e química

Os modelos de acoplamento químico são algoritmos computacional criado para trabalharem simultaneamente com modelos meteorológicos de mesoescala. Desempenham o papel de servir o mesmo com configurações químicas específicas de determinadas emissões por determinadas fontes poluente.

Inventários de emissões de gases traços e aerossóis fornecem fluxo de massa para a superfície para níveis superiores, para cálculo na equação da continuidade de massa, que são informações cruciais necessárias para esses estudos numéricos de dispersão de poluentes. Para fornecer estas informações, vários programas e grupos internacionais têm desenvolvido inventários de emissões dos gases primários traços e aerossóis atmosféricos mais relevantes. Como, o *Global Fire Emissions Database* (GFED, van der Werf et al., 2006) para a queima de biomassa e a “*REanalysis of the TROpospheric chemical composition over the past 40 year*” (RETRO, <http://retro.enes.org>) para emissões urbanas. A simulação numérica da composição química da atmosfera é feita com modelos avançados, onde equação da continuidade de massa é resolvido *online* ou *offline* (Zhang, Y., 2008) com várias resoluções espaciais e projeções geográficas, em ambas escalas regionais ou globais. O PREP-CHEM-SRC versão 1.0 (Freitas et al., 2011), desenvolvido para fornecer as emissões, em grade, de gases traços e aerossóis com uma resolução espacial flexível, várias projeções e adequado para modelos regionais e globais. Os Campos de emissões geradas por este sistema têm sido utilizados pelos modelos CCATT-BRAMS (Freitas et al., 2009b), WRF/Chem (Grell et al., 2005), e o *Flow-following finite-volume Icosahedral Model* (FIM, Bleck et al., 2010).

2.3.2 Modelo de dispersão de poluentes

A atmosfera atua sobre as substâncias poluentes através de dois fenômenos fundamentais: o transporte e a difusão. Para determinar o campo de vento (responsável pelo transporte) existem vários procedimentos codificados nos modelos matemáticos chamados de modelos meteorológicos ou de campo de vento. Os modelos meteorológicos são códigos

computacionais que permitem reconstruir a evolução espaço-temporal da variável que descreve o fluido atmosférico. Podem ser utilizados sozinhos, para validar as condições meteorológicas passadas ou futuras, ou como pré-processadores de modelos de dispersão. A interação do campo de vento com o solo e do aquecimento do mesmo, devido ao sol ou de seu resfriamento durante a noite por irradiação terrestre, produz um movimento caótico do ar conhecido como turbulência atmosférica. Esta turbulência é responsável pela dispersão na atmosfera (a diluição dos poluentes na horizontal e na vertical). Este último efeito é limitado pela altura da CLP, que por sua vez está relacionada com a turbulência atmosférica (Moreira et al. 2008).

O processo de difusão de partículas, o qual é representado como a concentração de massa (g/cm^3), e número de concentração ($\text{partículas}/\text{cm}^3$) pode ser diferente em diversos pontos no espaço (Wardoyo, 2007).

Ao determinar a altura final da pluma é possível ver, a partir da fonte de emissão, a altura em que o material foi injetado durante a fase de chamas e, em seguida, transportados e dispersos pelos ventos predominantes (Freitas et al., 2006, 2007).

2.2.3 Determinação da taxa de emissão de poluentes em queimadas

A quantidade emitida do poluente em cada foco de queimada é obtido através do método definido por Seiler e Crutzen (1980). Este método determina que para cada foco, a massa do traçador emitida é calculada pela Equação 2.3, que leva em consideração os valores estimados para a quantidade de biomassa acima do solo disponível para a queima (α), o fator de combustão (β) e o fator de emissão (E_f) para uma determinada espécie $[\eta]$, tendo em conta o tipo de vegetação, e a área queimada (a) para cada evento de queima.

$$M_{[\eta]} = \alpha_{cana} \cdot \beta_{cana} \cdot E_f^{[\eta]} \cdot a_{fogo} \quad (2.3)$$

O Fator de Emissão (EF_x), definido como a quantidade de determinado composto liberado (M_x) pela quantidade de matéria seca consumida (M_{biomassa}), expressa em unidade de g/kg^{-1} . O cálculo desse parâmetro exige conhecimento do teor de carbono na biomassa queimada e o orçamento do carbono consumido pelo fogo; ambos os parâmetros são difícil estabelecer no campo, a não ser experimento em laboratório onde são prontamente determinados. O total de carbono lançado geralmente é estimado pela soma de concentrações medidas de CO_2 , CO , hidrocarbonetos, e partículas de carbono, quando esta informação é disponível. O fator de emissão pode então ser expresso pela equação 2.4, como:

$$EF_x = \frac{M_x}{M_{biomassa}} = \frac{M_x}{M_C} [C]_{biomassa} \quad (2.4)$$

Fonte: Andrae e Merlet, 2001

Onde M_C é a massa de carbono emitido, $[C]_{biomassa}$ é a concentração de carbono na biomassa queimadas, $[x]$ é a concentração de uma espécie x na fumaça (CO, CO₂, etc.).

Para determinar o Fator de Emissão do material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀) em g/kg⁻¹, é necessário a coleta de concentrações do material sólido emitido na queimada em um determinado período de tempo, e é calculada por meio da equação 2.5:

$$EF_x = \frac{[x]}{m_{biomassa}} \quad (2.5)$$

Onde:

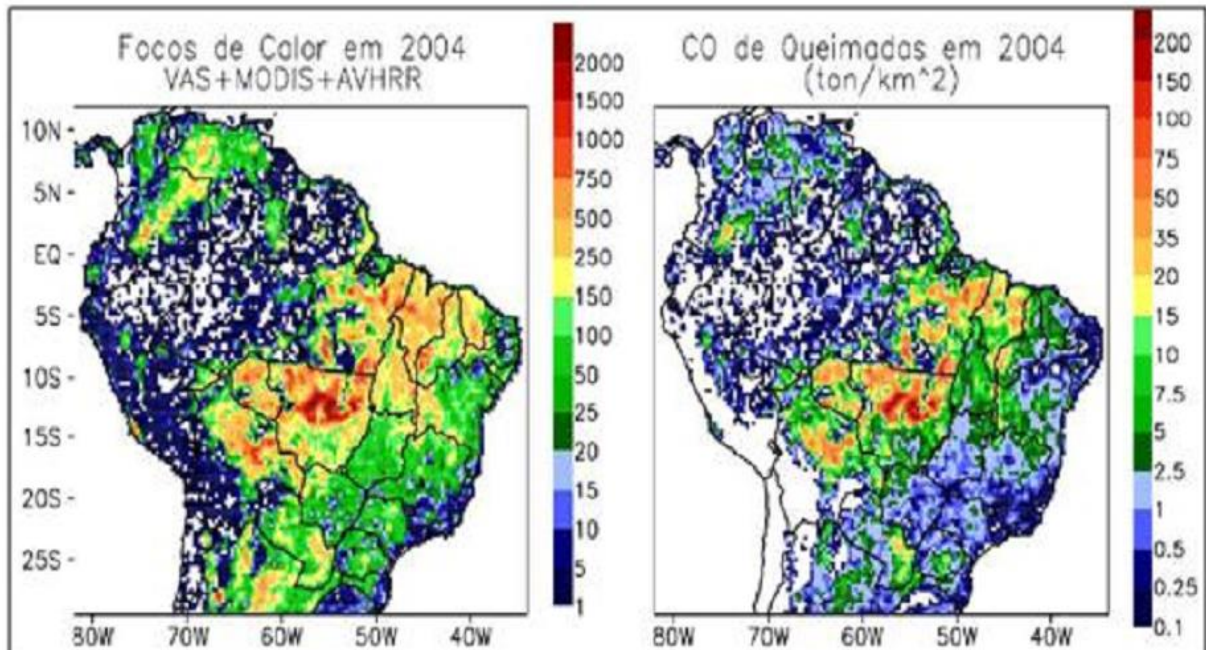
$[X]$ = é a concentração total da espécie X (PM₁₀ ou PM_{2,5}) em mg/m³, baseado em medições de uma amostra de ar em um determinado período (m³/s); m = biomassa seca consumida (kg).

Em estudos de queimadas em modelos numéricos a variável área queimada (a), pode ser tratada de duas formas: como a grade ou sub-grade do modelo.

2.3.4 Estudos de Modelagem atmosférica e queimadas

Freitas et al. (2005) apresentaram a distribuição de focos de calor detectados em 2004 por diversos sensores, eliminando as redundâncias de detecções do mesmo foco (figura 2.3a) e a estimativa de emissão de monóxido de carbono (figura 2.3b). Os sensores utilizados no respectivo trabalho foram: *Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder* - VAS (satélite GOES), *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - MODIS (AQUA e TERRA) e *Advanced Very High Resolution Radiometer* - AVHRR (NOAA). Os autores nesse trabalho afirmaram que as regiões que mais se destacam (com seus respectivos períodos de máxima quantidade de focos) são: Nordeste do Brasil (outubro - janeiro); centro-oeste brasileiro e na borda da região Amazônica (julho - outubro); no Estado do Mato Grosso. Junto aos focos de queimadas é apresentado a estimativa de emissão de monóxido de carbono (figura 2.3b) para as mesmas regiões. Ainda complementaram que as queimadas de canaviais são as principais razões para a quantidade de focos de queimadas no Estado de São Paulo identificados na figura 2.3, da mesma forma como no Nordeste do Brasil.

Figura 2.3 – (a) focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA & AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004 (número de focos em áreas de 40 x 40 km²). (b) estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km²

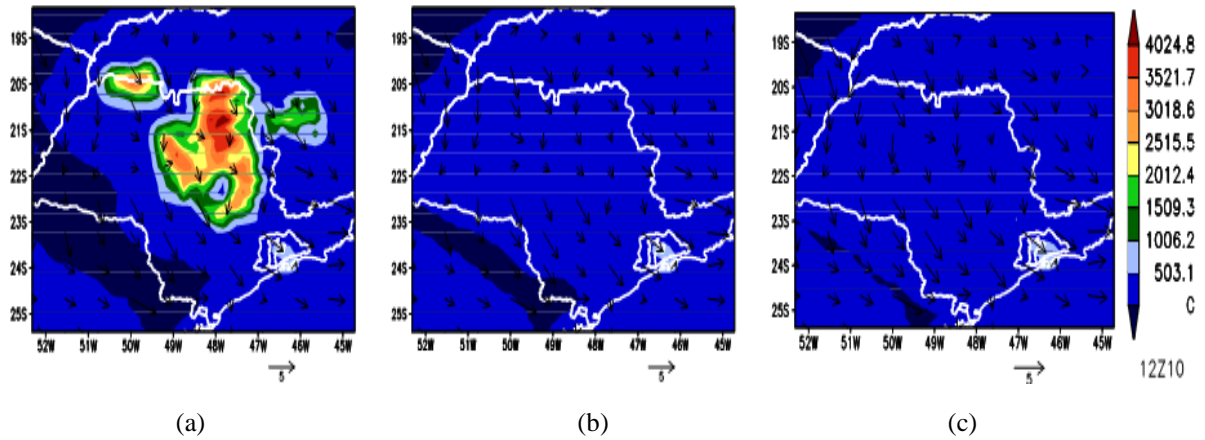


Fonte: Freitas et al. (2005)

Vedrasco (2006), buscou, através de modelagem numérica, avaliar o impacto das emissões de queimadas na concentração de ozônio na RMSP, utilizando o modelo BRAMS. Na análise da dos percussores do Ozônio, como o CO, o autor observou que A mudança na termodinâmica da atmosfera somada à a maior quantidade de precursores contribuiu para modificar as concentrações deste poluente, podendo reduzir ou aumentar tais concentrações, dependendo do horário da emissão e da concentração dos precursores (Figura 2.4).

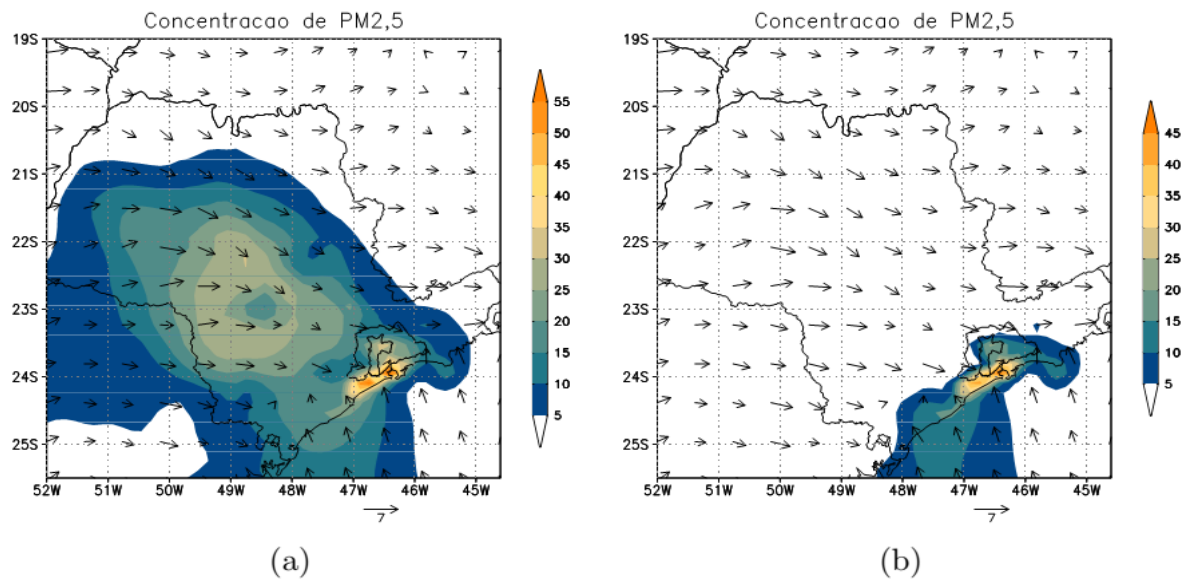
Ainda, em uma abordagem referente ao material particulado fino, Vedrasco observou que na ausência de queima de cana-de-açúcar, o interior do Estado de São Paulo tem baixa concentração de PM_{2,5}, enquanto que o material particulado emitido pela região urbana é transportado para o litoral (Figura 2.5b), devido ao vento predominante de Noroeste/Oeste. Contudo, na presença de queimada, existe um transporte de material particulado com origem no interior do Estado que alimenta a pluma da emissão urbana (Figura 2.5a).

Figura 2.4 - Concentração de CO para simulação com diferentes horários de emissão. Emissão entre 8 e 14Z (a); Emissão entre 14 e 20Z (b); Emissão entre 17 e 23Z (c). Concentração em [ppb].



Fonte: Vedrasco, 2006.

Figura 2.5 - Vento μ a 70 m da superfície [m/s] e a concentração de PM_{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para o dia 13 às 17Z. (a) com emissão de queimada, (b) sem emissão de queimada.



Fonte: Vedrasco, 2006

Já França (2012), realizou estimativas de fatores de emissão da queima da palha de açúcar a partir de medidas diretas. A importância de realizar este tipo de estudo para uso em modelagem numérica, é devido a criação de inventários de emissões da biomassa que será queimada para ser inserido no modelo. A estimativa da quantidade de biomassa queimada pode ser obtida se forem conhecidos a densidade da biomassa acima do solo, o fator de combustão (fração de biomassa que foi realmente queimada) e a área queimada (Longo et al., 2009). Enquanto que o fator de emissão (EF) representa a quantidade de um composto emitido pela

quantidade de combustível seco consumido (g/kg) (Andrae e Merlet, 2001). Como os fatores de emissão de gases traço e materiais particulados dependem do tipo de biomassa e de combustão, é importante que fatores de emissão específicos sejam determinados e usados por cada espécie vegetal. Na tabela 2.4, é apresentado uma revisão da literatura acerca das informações sobre os fatores de emissão de queimadas de CO e PM_{2,5}, para resíduos agrícolas e cana-de-açúcar.

Tabela 2.2 - Fatores de Emissão de CO e PM_{2,5}.

Tipo de Biomassa	CO [g/kg]	PM _{2,5} [g/kg]	Referência
Cana-de-açúcar	65 ± 14	2,6 ± 1.6	França et al. 2012
Cana-de-açúcar	28 ± 3	-	Lopes and Carvalho, 2009
Cana-de-açúcar	28.3	2.17	Yokelson et al., 2008
Cana-de-açúcar	-	2.8	Le Canut et al., 1996
Resíduos Agrícolas	92 ± 84	3.9	Andrae e Merlet, 2001
Resíduos Agrícolas	102 ± 33	6.26 ± 2.36	Akagi et al., 2011
Resíduos Agrícolas	92	3.9	Satyendra et al. 2013

Fonte: Autor, (2013).

2.4 Cana-de-açúcar

2.4.1 A cultura da cana-de-açúcar

A maior parte da queima de biomassa ocorre nos países em desenvolvimento e tem sido realizada para limpeza da terra para o cultivo, para converter florestas em áreas agrícolas e pastos, e para remover a matéria seca do solo, melhorando a produtividade agrícola. A queima de resíduos agrícolas, tais como a palha da cana-de-açúcar é outra importante fonte de queima de biomassa (Crutzen and Andrae, 1990).

O Brasil é, desde o período colonial, um dos principais produtores de cana-de-açúcar do mundo, que está novamente em fase de franca expansão e desenvolvimento. A demanda pelos produtos do setor sucroalcooleiro está crescendo no cenário mundial, e neste segmento, segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), o Brasil é líder absoluto na produção mundial de cana-de-açúcar. Conforme dados disponíveis relativos ao ano

2007, a produção brasileira foi de 514 milhões de toneladas, o que corresponde a 144% a mais que a Índia – país que ocupa a segunda posição, e representa 33% da produção mundial, que produziu 1.558 bilhão de toneladas de cana-de-açúcar (BRASIL, 2009).

Com a crescente demanda de biocombustíveis, culturas como a da cana-de-açúcar, que têm a queima associada à produção de seus derivados, vêm expandindo consideravelmente sua produção. A utilização do álcool como combustível em veículos automotores houve uma melhora na qualidade do ar nos grandes centros urbanos. No entanto, Arbex et al. (2004) complementaram que existe, porém, um contraponto: devido ao fato que a cana-de-açúcar ser uma cultura agrícola que por razões de produtividade e de segurança, sua colheita é realizada após a queima dos canaviais; isso gera grande quantidade de material particulado negro, que os mesmos denominaram como “fuligem da cana”, que consiste em “*black carbon*” ou também chamado de carbono negro. Esse material faz com que a população exposta por aproximadamente seis meses por ano seja afetada por esses poluentes além desses poluentes modificarem as características do ambiente nas regiões onde a cana-de-açúcar geralmente é cultivada, queimada, colhida e industrializada.

O fogo é amplamente utilizado na plantação de cana-de-açúcar, para a queima das palhas e promoção da limpeza do canavial, facilitando para o trabalhador rural o corte dessa vegetação (Roseiro e Takayanagi, 2004). O processo da queima da palha da cana-de-açúcar, antes do corte, é o mais utilizado nos canaviais porque o rendimento obtido com essa modalidade é cerca de três vezes maior do que aquele aferido pelo corte manual da cana-de-açúcar não queimada (Zancul, 1998; Roseiro e Takayanagi, 2004). As regiões sudeste e nordeste do Brasil são ressaltadas em relação a esse problema, onde o uso de queimadas na cana-de-açúcar é feita para facilitar a colheita.

2.4.2 Cana-de-açúcar no Estado de Alagoas

A história de Alagoas tem sua origem na atividade canavieira, tendo sua primeira usina criada no final do século XIX, utilizando equipamentos importados da Europa para a produção do açúcar. O setor sucroalcooleiro se transformou no mais importante da economia de Alagoas, sendo principal fonte de empregos e de desenvolvimento do Estado. Devido à tamanha grandeza, senhores de engenho, coronéis, usineiros e empresários uniram-se, ocasionando, em 1944, a fundação do Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Alagoas (Sindaçúcar/AL), entidade de defesa e representação dos produtores da cana, açúcar e energia. (Sindaçúcar/AL, 2012)

De acordo com SINDAÇÚCAR/AL, o Estado é um dos principais produtores da cultura de cana-de-açúcar do país, sendo o maior da região Nordeste, tendo atingindo na safra 2012/2013 uma produção de 23.459.852 toneladas, contra 13.573.865 toneladas do Estado de Pernambuco (Sindaçúcar/AL, 2013).

2.4.3 Estudos sobre queimadas de cana-de-açúcar

A tabela, apresenta análises de concentrações de poluentes como o CO e o PM_{2,5}, emitidos em queimadas de cana-de-açúcar de acordo com algumas referências bibliográficas.

Tabela 2.3 – Concentrações de CO e PM_{2,5} registrados em estudos sobre queimadas de cana-de-açúcar.

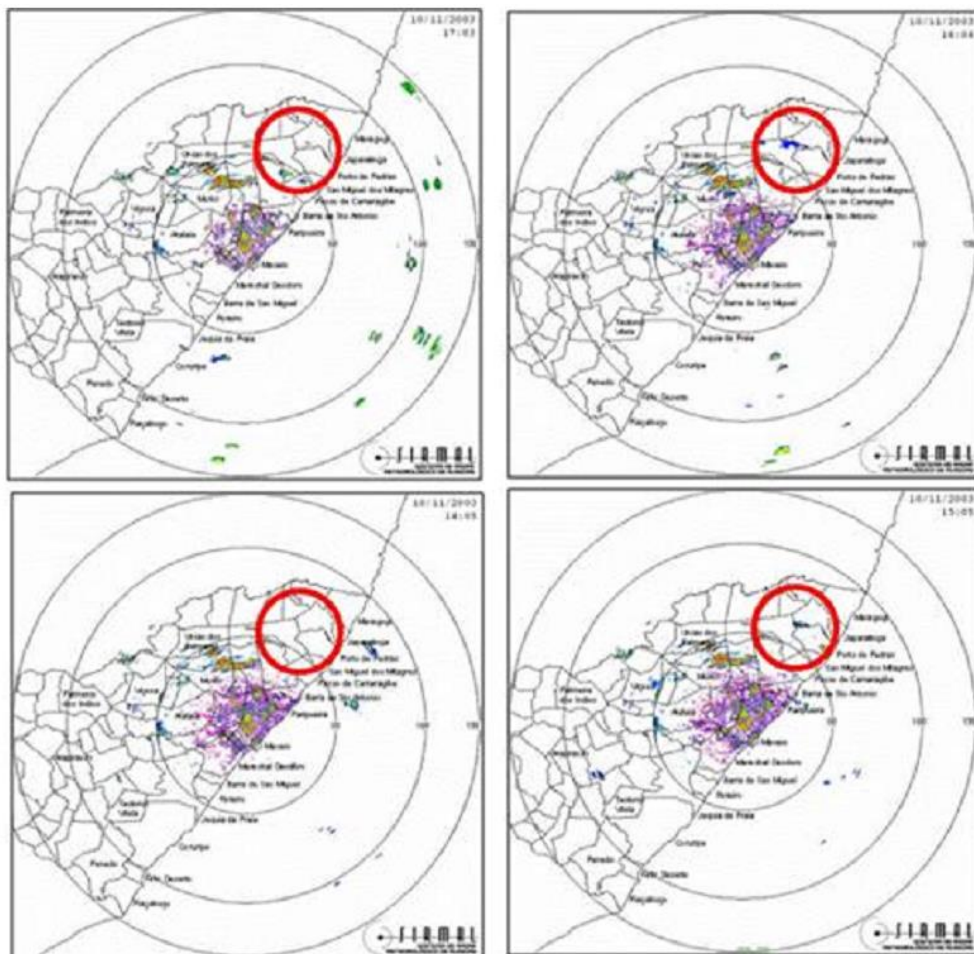
Referência	CO [ppbv]	PM _{2,5} [µg/m ³]	Detalhamento
Mariano (2010)	3528,54	-	Realizou medições foi utilizado o sistema LIDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>) móvel, na cidade de Rio Claro – SP, as medições do gás foram realizadas em regiões de queimadas de cana-de-açúcar.
Marinho e Kichhoff (1991)	600	-	Experimento para avaliar os efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na baixa atmosfera. Foram realizadas medições com auxílio de aviões sobrevoando localidades onde haviam queimadas de cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. Ressaltando que as medições foram feitas a 2 km de altitude e quase 300 km horizontal de distância da fonte poluidora, para caracterizar um Estado médio da baixa atmosfera.
CETESB (1999)	3600	117	A partir do município de Araraquara, foi diagnosticado um padrão de concentração no período de Safra para CO e PM _{2,5}
Lara et al. (2005)	-	80	As influências as emissões de queimadas de cana-de-açúcar para a cidade de Piracicaba, Sudeste do Brasil

Matsuda (2009)	-	90	Medições do aerossol foi feita através do instrumento “Monitor DUSTTRAK Aerosol, modelo 8520”, durante três períodos de 10 dias cada uma, na cidade de Tatuí – SP, no mês de novembro de 2007.
----------------	---	----	--

Fonte: Autor, (2013)

A ocorrência de queimadas de biomassa, como da cana-de-açúcar, pode ser visualizada através de alguns sistemas, como Radares meteorológico. Observando uma série de imagens sequenciais de um Radar instalado em Alagoas, Quintão (2004) pode verificar a ocorrência de “plumas” nas regiões canavieiras, no mesmo horário em que as queimadas foram realizadas. Os movimentos advectivos dessas “plumas” são ilustrados na figura 2.6:

Figura 2.6 - Sequência de imagens caracterizadas pela ocorrência de “plumas” derivadas da queimada de cana-de-açúcar iniciando-se às 14:05 até 17:03, do dia 10/11/03, na divisa dos municípios de Porto Calvo e Porto de Pedras - Alagoas.



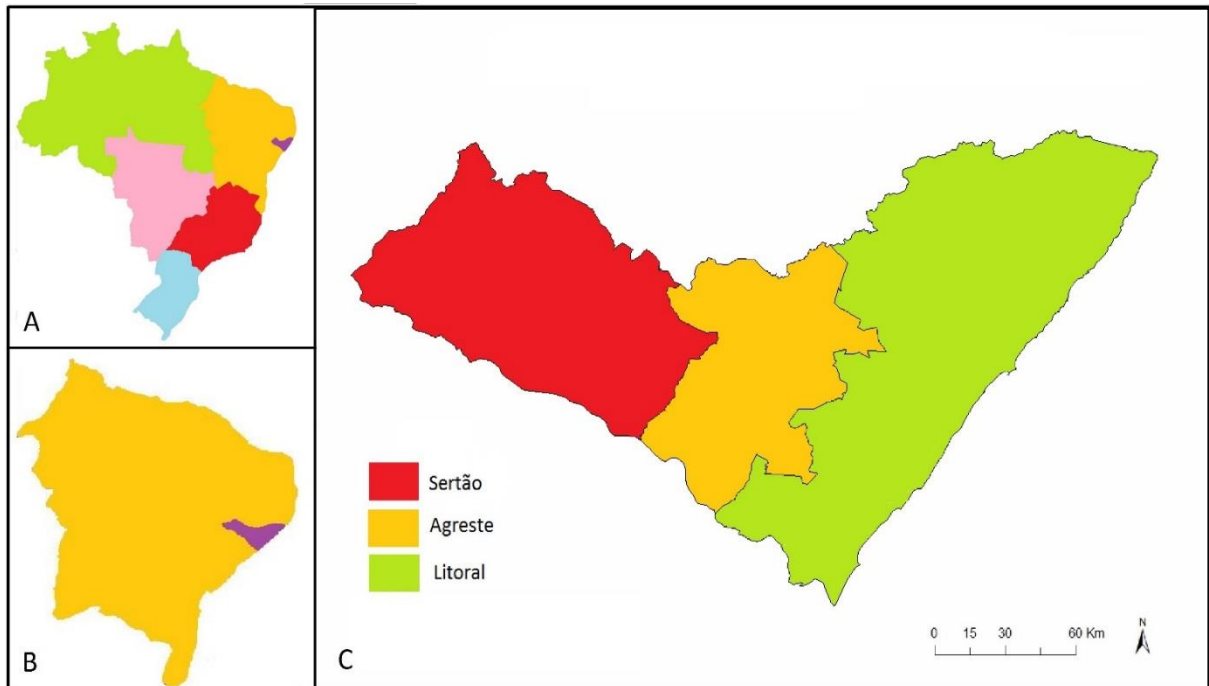
Fonte: Quintão (2004).

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O Estado de Alagoas localiza-se no nordeste brasileiro, entre os paralelos 8,81°S e 10,50° S e os meridianos 35,15° W e 38,23° W. Com uma área territorial de 27.779,343 km² (IBGE, 2010), é o 2º menor Estado brasileiro em dimensões territoriais, correspondente a 0,33% do tamanho do Brasil, e 1,79% da região nordeste. Limita-se ao norte com o Estado de Pernambuco; ao sul, com o Estado de Sergipe, com o Rio São Francisco como divisor; a leste, com o Oceano Atlântico e a oeste, com os Estados da Bahia e Pernambuco. Na figura 3.1, são apresentadas as regiões ambientais do Estado de Alagoas.

Figura 3.1 – Sub-regiões do Estado de Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

3.1.1 Topografia

Alagoas possui uma faixa costeira de 230 km de extensão, formada por tabuleiros areníticos e colinas (menores que 100m), para onde os rios de embocaduras afogadas convergem e originam os brejos e lagoas que dão nome ao Estado (Eletrobrás, 2008).

Apresenta um relevo de planícies com terrenos arenosos no litoral, planaltos ao norte e depressão ao centro (Costa, 2006). O relevo alagoano é predominantemente plano (Nunes, 2012) com cerca de 86% do território alagoano se encontra abaixo de 300 metros de altitude e

61% abaixo de 200 metros e apenas 1% fica acima de 600 metros (Amorim et al., 2008). A maior parte do Estado, portanto, compõe uma formação aplainada de relevo predominantemente suave, com ondulações e poucos picos e serras (Atlas Brasileiro de Desastres Climáticos – 1991 a 2010, Volume Alagoas, 2011).

3.1.2 Vegetação

A cobertura vegetal está diretamente relacionada com as condições climáticas e edáficas da região (Ferreira, 1999). A vegetação litorânea do Estado de Alagoas caracteriza-se por ter grande número de regiões estuarinas e lagunares, as quais apresentam áreas consideráveis ocupadas pelo ecossistema manguezal (Salles, 1995 apud Correia e Sovierzoski, 2010). A Floresta Ombrófila Densa, formação florística que recobre todo o litoral do Estado, constitui-se por uma vegetação de grande porte (20-30 m) que praticamente foi extinta pelo desmatamento (Ferreira, 1999). Na porção central, o Agreste representa a formação florística predominante, junto com áreas de transição entre o clima úmido e o clima mais seco, onde se encontram algumas espécies da Mata Atlântica e da Caatinga (Costa, 2006). A formação de Caatinga é observada a oeste do Estado, no Sertão Alagoano, intercaladas com vegetações antrópicas e pastos cobertos por espécies nativas de pequeno porte – cajueiros, umbuzeiros e juazeiros, porém de forma espaçada (Eletrobrás, 2008).

Alagoas é classificada com diferentes tipos de vegetação, com áreas de savana predominam no sertão, transição entre savana, cultivos agrícolas e floresta no Agreste e florestas abertas e densa no litoral.

Esta cobertura vegetal é influenciada pelo regime pluviométrico que cobrem o Estado, variando conforme a sazonalidade da precipitação. Outra característica de Alagoas é a economia ser predominantemente agropecuária, sendo um dos principais produtores de cana-de-açúcar do Brasil.

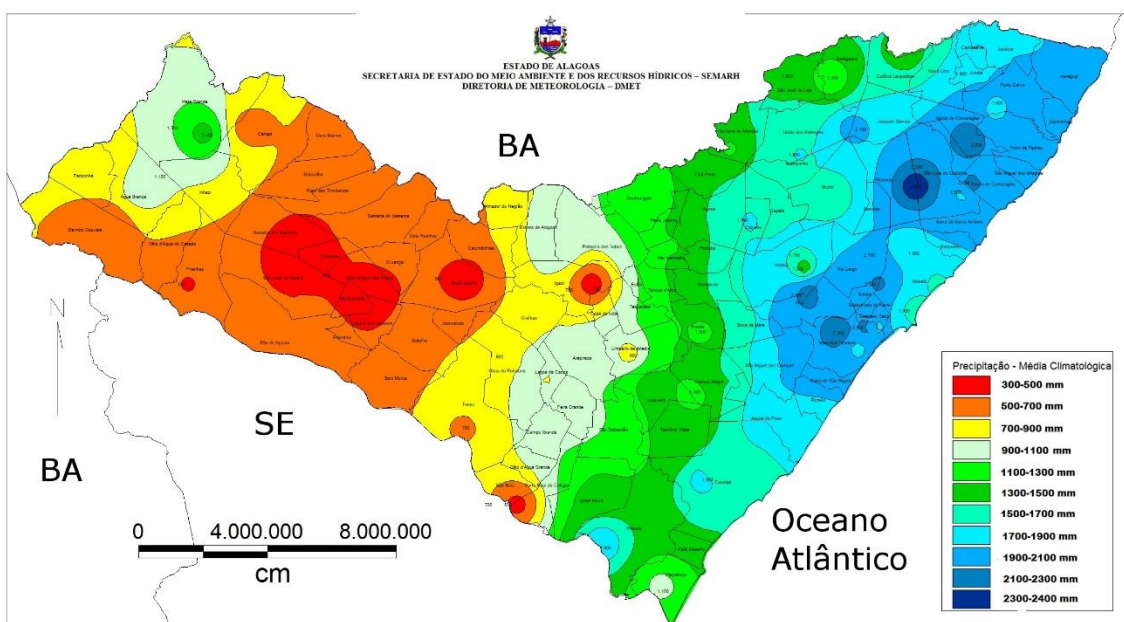
3.1.3 Climatologia

O clima no Estado de Alagoas, por sua vez, se divide conforme as delimitações das três mesorregiões (Nascimento e Xavier, 2010). As temperaturas médias anuais variam de 22°C a 26°C, com exceção de algumas áreas serranas. No entanto, o que mais caracteriza a região, quanto à precipitação, é a irregularidade da distribuição das chuvas, principalmente no sertão. Cerca de 48% do Estado é bem revestido de um mosaico edafoclimático, cortado por uma rica base hidrográfica. O clima de Alagoas é bem diversificado, ocorrendo precipitações elevadas

na faixa litorânea (em torno de 1.800mm), tornando-se bem mais escassas à medida que adentra no interior do Estado (Figura 3.2). Segundo os dados da Diretoria de Hidrometeorologia da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL apud Nascimento e Xavier, 2010), o tempo e o clima são influenciados principalmente pelos sistemas meteorológicos Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que oscilam entre os dois hemisférios sazonalmente, e Ondas de Leste, o que nos leva a considerar uma região de grande variabilidade nos índices pluviométricos.

Com base em Molion e Bernardo (2002), os outros mecanismos que provocam precipitação no Nordeste Brasileiro (NEB) são as Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs), que ocorrem o ano inteiro, sendo mais frequente em períodos de La Niña. Também pela penetração dos Sistemas Frontais vindos do Sul. Durante a fase quente do El Niño Oscilação Sul (ENOS) há uma intensificação da seca no semiárido nordestino e redução das chuvas na região costeira. Para a fase fria do ENOS, correspondente ao período de La Niña, a entrada de sistemas frontais é mais frequente, pois há o aumento da magnitude do vento sobre o pacífico equatorial, implicando na aceleração do deslocamento destas massas de ar para regiões mais próximas ao Equador. A sazonalidade no Estado é baseada diretamente pela precipitação, onde o outono-inverno é caracterizado por ser estação chuvosa, compreendida entre os meses de abril a julho, enquanto os meses de seca ocorrem na primavera-verão, de outubro a janeiro (Silva, 2009).

Figura 3.2 - Mapa de Média Climatológica de regime pluviométrico no Estado de Alagoas.

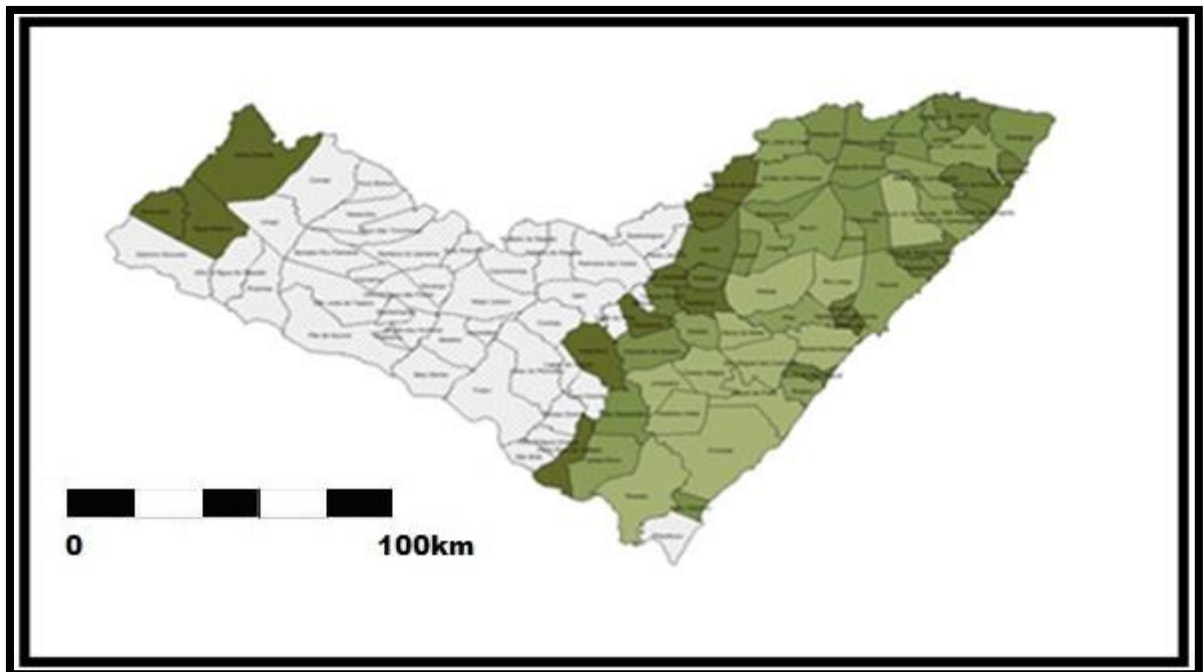


Fonte: SEMARH/AL, 2013

3.1.4 Área Canavieira

A cultura canvieira constitui o principal elemento da paisagem do Estado. As plantações recobrem os solos argilosos das colinas e morros, além das várzeas dos rios. A região canvieira de Alagoas está concentrada no Litoral alagoano e no Agreste (Figura 3.3), que é a zona de transição para o sertão, onde predominam os solos ricos de humos, com temperaturas em média de 24°C e regime pluviométricos semelhantes ao Cerrado (1.400 mm/ano); ele abrange a porção leste do Estado.

Figura 3.3 - Área Canvieira do Estado de Alagoas.



Fonte: Adaptado IBGE - Produção agrícola municipal – 2010.

Cerca de metade da população ativa de Alagoas está ocupada no setor primário. A participação da indústria da cultura canvieira na economia do Estado atinge 45 % do PIB alagoano, tendo influência no setor agropecuário, na indústria e no setor de serviços. De acordo com dados da Secretaria da Fazenda do Estado de Alagoas, 60% da indústria e 30% do setor de serviços estão correlacionados ao setor canvieiro (Santos, 2011).

3.2 Descrição e Configuração do WRF/Chem

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um modelo atmosférico de mesoescala não hidrostático para previsão numérica de tempo (PNT) e clima. É aberto e flexível, com

código fonte disponibilizado livremente para uso operacional e de pesquisa. Por possuir um código estável, limpo e aprimorado, o WRF pode ser executado desde computadores comuns, ou até em supercomputadores de grandes centros de pesquisa. Sua formulação física é baseada na conservação de massa, que expressa às variações de energia, momentum e umidade do ar. O modelo foi desenvolvido através da parceria entre diversos institutos dos Estados Unidos: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR); *Mesoscale & Microscale Meteorology* (MMM); *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP); *Naval Research Laboratory* (NRL); *Federal Aviation Administration* (FAA) e Universidade de Oklahoma (Skamarock et al., 2008). Os mesmos autores descrevem detalhadamente toda a sua estrutura física e computacional, além de outras informações específicas.

Para as condições iniciais e de contorno, foram empregados dados *NCEP Final Analysis* (FNL) na entrada das simulações no WRF. Sua assimilação de dados é baseada em uma grande gama de tipos diferentes tipos de dados observados sejam por satélite e boias marinhas, a sondagens atmosféricas e radares meteorológicos. Os domínios espaciais de execução podem ir desde alguns metros (microescala) até milhares de metros (escala planetária). Estas informações possuem resolução espacial de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$, aproximadamente 111 km, em um intervalo temporal de 6 horas para cada ponto de grade.

3.2.1 Módulo químico do WRF/Chem

A versão química do modelo WRF – WRF/Chem (Grell et al., 2005), realiza simulações de gases traço e partículas interativamente com os campos meteorológicos, usando várias considerações sobre a variedade de processos físicos e químicos, como os transportes, a deposição, a emissão, a transformação química, as interações de aerossol, fotólise e radiação.

• Transporte

Todo Transporte de espécies químicas é feito de maneira “online”. Embora o WRF tenha várias opções de núcleos dinâmicos, o modelo é usado a versão de massa coordenada “ARW” (*Advanced Research WRF*). As equações prognósticas integradas no modelo ARW são mostradas na forma conservativa (fluxo) para variáveis conservadas; variáveis não conservadas como a pressão e a temperatura são diagnosticados a partir do prognóstico de variáveis conservadas. Nas variáveis conservadas aproximadas, o modelo ARW integra a equação de conservação de massa e a equação de conservação escalar na forma:

$$\mu_t + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mu) = 0, \quad (3.2)$$

$$(\mu\varphi)_t + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mu) = 0. \quad (3.3)$$

Nestas equações μ é uma massa da coluna de ar seco, \mathbf{V} é a velocidade (u, v, ∇), e φ é uma razão de mistura escalar. Estas equações são discretizadas em uma formulação de volume finito, e como um modelo exato (a equação de conservação escalar discretizada se altera para a equação de conservação de massa, quando $\varphi = 1$) e preserva as correlações de traçado (Lin and Rood, 1996; Grell et al., 2005). O modelo ARW usa uma avaliação espacial de 5ª ordem do fluxo horizontal advectivo na equação de conservação escalar e de 3ª ordem para o fluxo vertical advectivo, acoplado com o esquema de integração no tempo de Runge-Kutta de 3ª ordem (Wicker and Skamarock, 2002). O Transporte turbulento na camada limite é realizada utilizando um nível de 2,5, parametrização de fechamento de Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1982).

Para o mecanismo químico é usado no modelo 39 espécies químicas totalmente prognósticas. Para o módulo de aerossol, outras 34 variáveis são adicionadas, incluindo o número total de partículas de aerossol dentro de cada moda, bem como todas as espécies primárias e secundárias (orgânica e inorgânica) para ambas modas (Aitken e acumulação), e três espécies para a moda grossa (aerossóis antropogênicos, marinho e derivado do solo).

- Deposição Seca

O fluxo de gases e partículas da atmosfera para a superfície é calculado multiplicando as concentrações na camada menor do modelo pela velocidade de deposição variando espacial e temporal, que é proporcional à soma de três resistências características (resistência aerodinâmica, resistência da subcamada, resistência da superfície). A parametrização da resistência da superfície desenvolvida por Wesley (1989) é usada. Nesta parametrização, a resistência da superfície é derivada do solo e da vegetação. As propriedades das vegetações são determinadas usando dados de uso do solo da estação. A resistência da superfície também depende do coeficiente de difusão, a reatividade, e solubilidade na água dos gases traços reativos. No caso de simulação empregando parametrização de aerossol, a velocidade de deposição, \widehat{v}_{dk} , para o momento de ordem k de aerossol polidisperso é dado pela equação 3.4:

$$\widehat{v}_{dk} = (r_a + \hat{r}_{dk} + r_a \hat{r}_{dk} \widehat{v}_{Gk})^{-1} + \widehat{v}_{Gk}, \quad (3.4)$$

Onde r_a é a resistência de superfície, \widehat{v}_{Gk} é a velocidade de sedimentação polidispersa, e \hat{r}_{dk} é a difusividade Browniana (Slinn and Slinn, 1980; Pleim et al., 1984).

- **Química em fase gasosa**

O mecanismo químico atmosférico foi originalmente desenvolvido por Stockwell et al. (1990) para *Regional Acid Deposition Model, version 2* (RADM2, Chang et al., 1989). O mecanismo RADM2 é um ajuste detalhado químico entre previsões químicas precisas e recursos computações disponíveis. Isto é extensivamente usado em modelos atmosféricos para prever concentrações de oxidantes e outros poluentes do ar. As espécies inorgânicas incluídas no mecanismo RADM2 são: 14 espécies estáveis, 4 intermediários reativos, e 3 espécies abundantes estáveis (oxigênio, nitrogênio e água). A química orgânica atmosférica é representada por 26 espécies estáveis e 16 radicais peróxido. O mecanismo RADM2 representa química orgânica através de uma aproximação molecular agregada a reatividade (Middleton et al., 1990). Compostos orgânicos similares são agrupados juntos em um número limitado de grupos do modelo através do uso do peso molecular. O fator de agregação para a maioria dos compostos orgânicos voláteis emitidos (COVs) é dado em Middleton et al. (1990). Um método de aproximação do Estado de quase equilíbrio com 22 espécies diagnosticados e 38 previstas é usada para prever produção química e perda de termos de tendência na solução numérica. O tempo de integração para 38 espécies químicas são então resolvidos usando estas tendências e aproximação Euler *Backward* (Retrocesso). Condições iniciais e de limite para as variáveis prognósticas na fase gasosa são baseadas naquelas de McKeen et al. (2002). Essas consistem de perfis verticais invariantes lateralmente representando condições claras, oceânicas e médias latitudes para medições antigas coletadas a bordo pelas missões de aeronaves patrocinadas pela NASA. Nenhum ajuste para as condições limites baseadas na vortacidade potencial são aplicadas para as grades do modelo na estratosfera ou superior a troposfera.

- **Emissões**

Emissões Antropogênicas são tratadas de forma similar à de McKeen et al. (2002), com atualizações até abril de 2002 do inventário da EPA NET-96, versão 3.12 (USEPA, 1998). Atribuição temporal horária, especiação dos COV, particionamento espacial em um município específico são com base nas informações mais antigas, contudo detalhado dentro do *National Acid Precipitation Assessment Program* (NAPAP) base de dados de emissão (US EPA, 1998). A fim de aderir ao mecanismo RADM2, o coeficiente de reatividade de várias espécies COV aglomeradas do NAPAP é usado para derivar as emissões das espécies aglomeradas do RADM2 de acordo com Stockwell et al. (1990, 1997). Fontes de COV, CO, NO_x, e aerossol de incêndios

florestais e queima prescritas são omitidos das emissões uma vez que estes são específicos para 1996 no inventário EPA.

- **Parametrização de Aerossol**

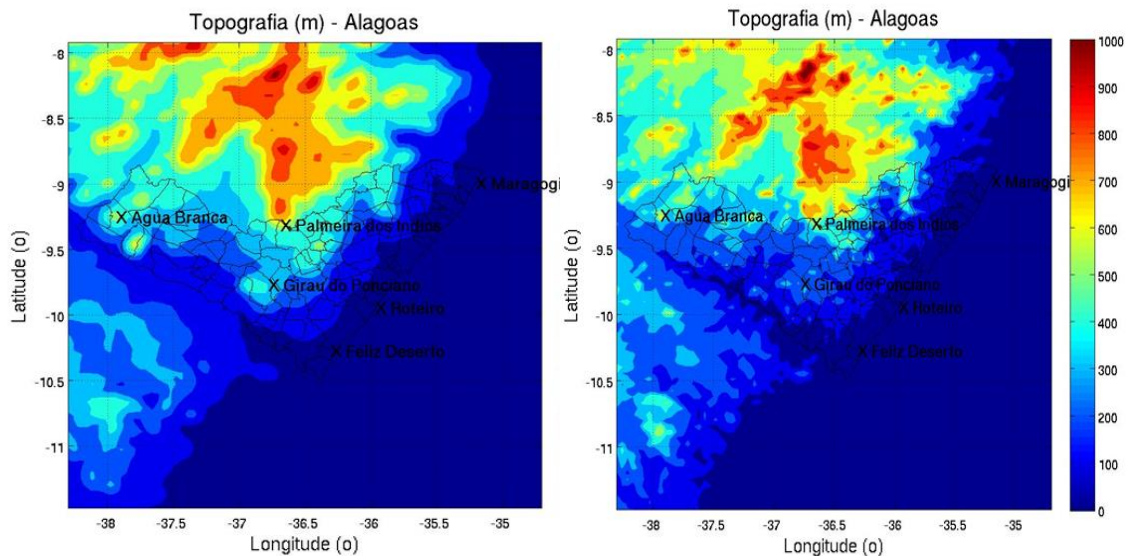
O módulo de aerossol é baseado no *Modal Aerosol Dynamics Model for Europe* (MADE, (Ackermann et al., 1998) que por sua vez é uma modificação do modelo de partículas regional (Binkowski and Shankar, 1995). *Secondary organic aerosols* (SOA) foram incorporados no MADE por Schell et al. (2001), por meio do *Secondary Organic Aerosol Model* (SORGAM). MADE/SORGAM emprega uma aproximação modal (acumulação de Aitken, e moda grossa) para representar o tamanho da distribuição de aerossol.

3.2.2 Atualização dados de Topografia

Ainda, neste estudo é utilizada uma atualização nos dados de entrada do modelo WRF/Chem, para topografia. Baseado no projeto “Brasil em Relevo”, que utilizou como fonte primária os modelos digitais de elevação, com aproximadamente 90 metros de resolução espacial, originários da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) dos Estados Unidos no ano 2000. Os dados obtidos pelo mapeamento foram disponibilizados pelo *USGS Eros Data Center* (*United States Geological Survey*) (Miranda, 2005).

Os pesquisadores da Embrapa Monitoramento por Satélite baixaram os dados brutos do SRTM do site da NASA e fizeram um cuidadoso trabalho de correção e padronização, eliminando falhas, sombras e distorções. O resultado aqui disponibilizado é uma série de mapas em que cada pixel tem um valor altimétrico real, visualmente convertido em falsas cores, simbolizando as diversas altitudes. Isso pode ser observado na Figura 3.4b, utilizando para o Estado de Alagoas, e fazendo a comparação dos dados de topografia (HGT) original na base de dados do modelo (figura 3.4a), e a nova HGT atualizada com os dados de SRTM.

Figura 3.4 – Topografia do Estado de Alagoas em metros, (a) com a base de dados do modelo WRF, e (b) com as atualizações dos dados de STRM disponibilizados.



Fonte: Autor, 2013

3.2.3 Programa de Emissão de queima de biomassa (BBEI)

Neste capítulo será feita a descrição do modelo de pré-processamento químico: *Biomass Burning Emission Input* (BBEI). Esse programa foi desenvolvido dentro do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade de Alagoas no Laboratório de Modelagem Atmosférica, o qual foi elaborado para servir de dados de entrada para as centenas de casos de queima de biomassa, do tipo palha da cana-de-açúcar, e é subdividido em relação as características adotadas na queimada em questão, como: informações de focos de queimadas, cálculo da emissão do poluente, tamanho da área queimada e informações temporal da queimada.

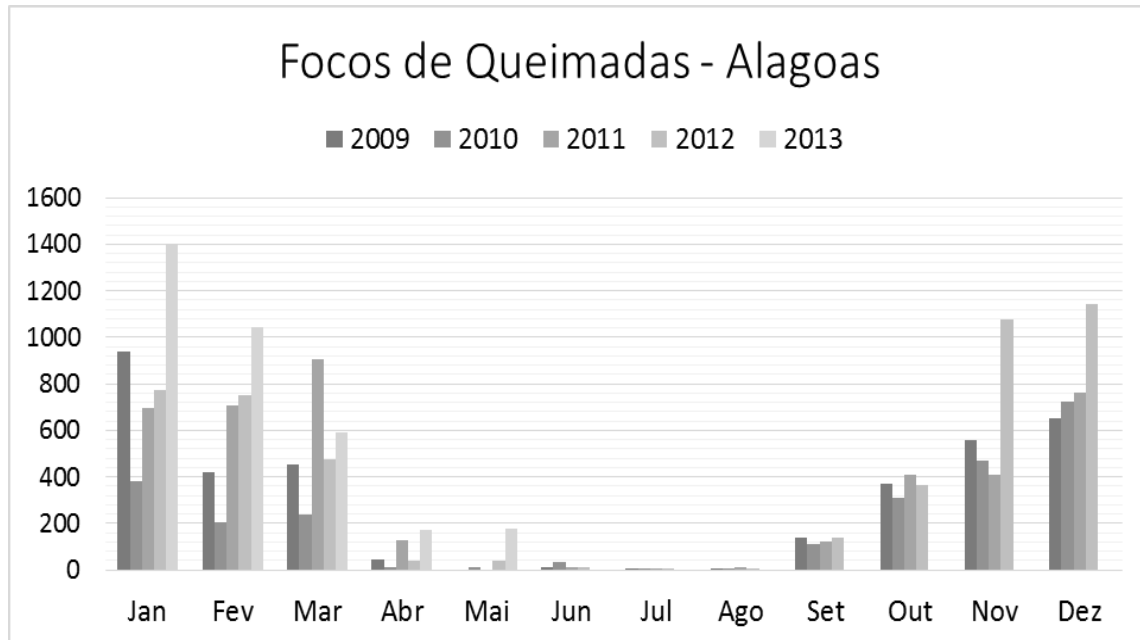
3.2.3.1 Identificação dos focos de queimadas

Conforme descrito no Portal de Queimadas do INPE, para a detecção dos focos de queimadas é feita a análise em que um material em chamas, ou seja, em um processo de queima de biomassa é emitido energia principalmente na faixa termal-média de $3,7\mu\text{m}$ a $4,1\mu\text{m}$ do espectro óptico. Utilizam-se as imagens que tenham esta faixa característica e nelas selecionam-se os píxeis (elementos de resolução) com maior temperatura, em geral saturando o sensor. Sendo processadas operacionalmente, na DSA/INPE, as imagens AVHRR dos satélites polares NOAA-15, NOAA-16, NOAA-18 e NOAA-19, as imagens MODIS dos satélites polares NASA TERRA e AQUA, as imagens dos satélites geoestacionários GOES-12, GOES-13 e MSG-2

O Portal de Monitoramento de Queimadas do INPE disponibiliza um banco de dados com informações de focos de calor processados dos satélites (Figura 3.5), com informações do

momento exato em que foi identificada a queimada e a coordenada geográfica (latitude e longitude) do foco.

Figura 3.5 - Gráfico representativo aos focos de queimadas detectados por satélites, processados operacionalmente pelo DSA/INPE, de janeiro de 2009 a Maio de 2013.



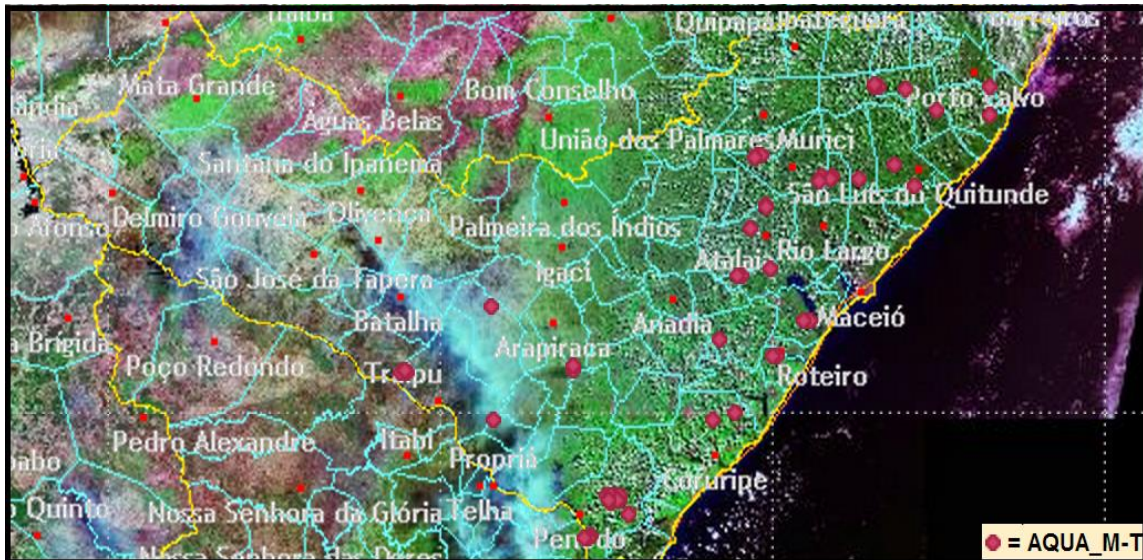
Fonte:

Autor, 2013.

É possível confirmar com a Figura 3.5, o período do ano em que há a queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas, com o aumento do número de focos de queimadas. O ciclo das queimadas tem seu início em setembro até final de março de cada ano, observando ainda na Figura, o aumento na quantidade de focos de queimadas nos meses finais de 2012 (novembro e dezembro), e no início do ano 2013 (janeiro e fevereiro).

No mês de janeiro de 2013, o Portal de Monitoramento de focos queimadas do INPE, detectou cerca de 1400 focos contabilizado por uma série de satélites (AQUA, TERRA, NOAA, GOES, METEOSAT). A Figura 3.6 mostra a localização no território do Estado de Alagoas dos focos detectados em janeiro de 2013 apenas pelo satélite de referência AQUA. O satélite de referência é considerado isento de falsas detecções devido ao reflexo do sol na superfície terrestre, e ao seu horário de passagem, ao final da tarde.

Figura 3.6 - Focos de queimadas detectado pelo satélite de referência em novembro de 2011 (AQUA_M-T).



Fonte: Monitoramento de Queimadas – INPE

Com base na figura 3.6 é possível observar o padrão de localização dos focos de queimadas no Estado Alagoas, coincidindo com as áreas onde está localizada os canaviais no Estado, a mesorregião do litoral e a zona de transição do litoral e agreste (Figura 3.3).

3.2.3.2 Determinação da Taxa de Emissões dos Poluentes

Além de definir o posicionamento dos focos de queimadas, também foi necessário calcular a quantidade emitida de cada poluente na queima da palha da cana. Com a utilização de equação desenvolvida para a determinação da quantidade emitida em cada foco de queima de biomassa no modelo para cada poluente de estudo (por exemplo, equação 2.3); Seiler e Crutzen, 1980), baseado em: área queimada, fator de emissão do poluente para determinada biomassa, fator de combustão da biomassa e quantidade de matéria seca disponível para a queima. O BBEI, alimenta o foco de queimada com essa quantidade de poluentes. Além disso, o BBEI contabiliza e discriminar focos muito próximos, considerando assim, quando há a existência de mais de um foco num mesmo ponto de grade do modelo, o programa dá um peso de emissão ao mesmo, de acordo com a quantidade de focos sobre uma região aproximada.

Para esse estudo foi feito um levantamento de vários estudos referente as emissões de queima de biomassa, principalmente sobre da palha da cana-de-açúcar para o gás CO e para o PM_{2,5} (Tabela 2.2).

3.2.3.3 Variação Temporal das Emissões

O comportamento do fogo em uma queima depende das características da área: topografia do terreno, umidade, ventos, temperatura atmosférica, quantidade e distribuição dos materiais vegetais. Cada um destes fatores provoca efeitos específicos no fogo e se eles foram avaliados de forma correta e previamente à execução da queima, é possível ter uma margem alta de segurança e prever o que vai acontecer durante o processo.

Por essa razão em Alagoas, como já mostrado na Figura 3.5, a queima da cana coincide com período seco, com baixas precipitações no Estado, sendo esse entre setembro a março. Essa característica indica piores condições de dispersão já que impossibilita a chamada deposição úmida, agravando seus efeitos na qualidade do ar., todavia, as queimadas costumam acontecer no período onde é visto a maior umidade no ar (durante a noite), por questões relacionadas a saúde e controle da queimada.

O BBEI leva em consideração essa informação, fazendo dessa forma que a maiores quantidades de emissões ocorram no período noturno.

3.2.3.4 Atualização dos Focos de Queimadas

Outra importante consideração inserida no modelo, foram a atualização dos dados de focos de queimadas. Com essa consideração, as emissões dos dias anteriores podem ser observada na atmosfera nos dias posteriores de estudo. Isso torna as observações sobre o impacto temporal da concentração dos poluentes emitidos mais próximo ao que ocorre na atmosfera.

3.2.4 Configuração das Simulações

Com o objetivo de mostrar a evolução das implementações feitas no programa de pré-processamento de queimada feita para o modelo WRF/Chem, as rodadas foram divididas em três fases de testes, sendo elas: Inicial, Intermediária e Completa. As configurações referentes às rodadas das três fases serão tratadas a seguir.

3.2.4.1 Evolução dos testes com WRF/Chem

As simulações foram feitas para datas diferentes, conforme as devidas considerações referentes a queima de cana-de-açúcar e iam sendo implementadas. A fase **INICIAL**, feita com uma simulação com um intervalo de 24 horas, a partir do dia 21 ao dia 22 de maio de 2011, tendo o início das emissões às 12Z; Na segunda fase de testes, **INTERMEDIÁRIA**, as simulações foram realizadas para um intervalo de 120 horas, entre os dias 01 e 06 de novembro de 2011. E para a terceira e última fase, denominada como **COMPLETA**, as simulações foram inicializadas às 12Z do dia 27 de janeiro de 2013, para início das condições de fundo da

atmosfera, visto que, nessa data já havia queimadas no território e eram máximas para este período, ver figura 3.7. As análises iniciam às 00Z do dia 28 de janeiro até as 12Z do dia 1 de fevereiro de 2013. Na tabela 3.1 é descrito as etapas de evoluções do estudo, onde são detalhados nos textos que se segue.

Tabela 3.1 - Descrição das etapas de evolução do estudo.

#	INICIAL	INTERMEDIÁRIA	COMPLETA
Domínio	81x81	81x81	81x81
Resolução	5 km	5 km	5 km
Data	21 a 22 de maio de 2011	1 a 6 de novembro de 2011	28 de janeiro a 01 de fevereiro de 2013
Focos	6 focos no litoral	Focos de satélite acumulados para os 5 dias (satélite de referência)	Satélites em órbita polar, atualizados
Poluente estudado	CO	CO	CO e PM _{2,5}
Opção Biomass Burning	Desligado	Desligado	Ligado
Cálculo de Emissão	-	Seiler e Crutzen (1980)	IPCC (2006)
Variação Temporal das Emissões	-	-	Horário das queimadas no estado (período noturno)
Topografia	-	-	Brasil em Relevo
Plume Rise	-	-	Ligado
Validação da Dispersão	-	-	AIRS

Fonte: Autor (2013).

Para este estudo foi utilizado a versão 3.4 do modelo WRF/Chem. Para todas as três fases de testes do estudo, o modelo foi configurado com um domínio de 81 x 81 pontos em x e y respectivamente, e 27 níveis verticais; com uma resolução de 5 km, suficiente para cobrir todo o Estado de Alagoas. As condições iniciais e de contorno derivam do modelo *NCEP Final Analysis* (FNL), o qual é uma filial da NOAA e do NWS (*National Weather Service*), nos EUA.

Tabela 3.2 - Parametrizações físicas e químicas utilizadas na execução do Modelo WRF/Chem.

<i>Parametrização</i>	<i>Opção do WRF/Chem</i>
<i>Microfísica</i> <i>Cumulus</i>	Lin (Purdue) (Lin, Farley e Orville, 1983) Grell-devenyi (Grell e Devenyi, 2002)

<i>Radiação OL</i>	RRTMG (Iacono et al. 2008)
<i>Radiação OC</i>	Goddard shortwave (Chou et al., 1998)
<i>Camada Limite Planetária</i>	Asymmetrical Convective Model, version 2 (ACM2) (Pleim 2007 a,b)
<i>Camada Limite Superficial</i>	Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)
<i>Superfície do Solo</i>	Noah Land Surface Model (Chen et al. 1996)
<i>Mecanismo químico</i>	RADM2 (Stockwell et al., 1997)
<i>Mecanismo de Aerossol</i>	MADE/SORGAM (Ackermann et al., 1998)
<i>Emissão Queima de Biomassa</i>	BBEI (Presente estudo), com cálculo de ascensão da pluma.

3.2.4.2 Configuração do Biomass Burning Emission Input

Nas três fases de testes o BBEI foi modificado a partir de considerações referente as queimadas de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas. As três metodologias de alteração serão descritas a seguir:

Na fase de teste **INICIAL**, as considerações iniciais para as primeiras simulações e para os primeiros resultados foram: localização onde ocorrem as queimadas no Estado de Alagoas; quais poluentes são emitidos, além de qual seria utilizado como gás traço para a análise.

Gás traço utilizado para a simulação - A escolha do CO para o gás traço para análise das simulações deve-se ao fato do mesmo ser um poluente produzido pela combustão incompleta na queima de biomassa e de combustíveis fósseis, além de ser pouco reativo depois de emitido na atmosfera, com tempo de residência superior a 30 dias, nesta escala de tempo, o mesmo corresponde a um traçador passivo na atmosfera. Quando a fonte emissora é a queima de biomassa, é produzido principalmente no início da combustão com ausência de chamas. Não foram feitas considerações referente à quantidade emitida do poluente, fazendo com que as quantidades de concentração nas barras de cores fossem ilustrativas.

Localização das Queimadas - Conforme descrito no tópico 3.1.4, referente a Área Canavieira do Estado de Alagoas. A área onde se concentra os canaviais no Estado de Alagoas está localizada no litoral, que apresenta as condições ideais de solo, temperatura e regime de chuvas.

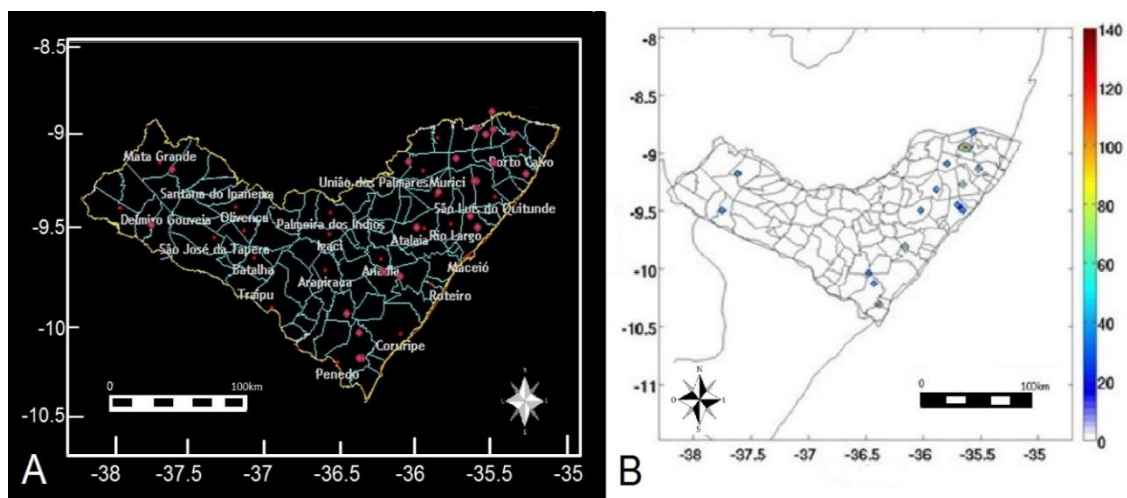
Este teste foi elaborado no sentido de avaliar a dispersão dos poluentes, tendo em vista que o vento predominante da área de estudo é de sudeste. Então posicionamos os focos de queimadas no litoral e em regiões que apresentavam plantio de cana-de-açúcar com base em informações obtidas pelo “Google Earth”. Vale lembrar que para esse teste não tinha como

objetivo avaliar as concentrações, logo foram colocadas emissões altas dos poluentes traços (monóxido de carbono – CO). As cidades selecionadas para o estudo e suas coordenadas geográficas para a simulação foram: Penedo (10°17' S, 36°36' W), Coruripe (10°08'S, 36°10' W), Roteiro (9°49' S, 35°59'W), Satuba (9°33' S, 35°50' W), São Luís do Quitunde (9°19' S, 35°33' W) e Porto Calvo (9°02' S, 35°23 W).

Para a segunda fase de evolução, **INTERMEDIÁRIA**, nos resultados foram tomadas considerações afim de tornar mais reais as simulações referente as queimadas no Estado de Alagoas. Estas considerações se definiram em: implantação de focos de queimadas obtidos por sensoriamento remoto no Estado de Alagoas; e definição da quantidade de CO emitida durante um processo da queima da palha da cana-de-açúcar, junto à confirmação das quantidades emitidas de CO com base em estudos referentes ao processo de queima palha de cana-de-açúcar.

Localização das queimadas - Nesta etapa, foram iniciados os testes usando essas informações disponíveis no site do DSA/INPE, e incorporadas ao programa BBEI e em seguida utilizados como dados de entrada para o modelo WRF/Chem. Então, as coordenadas dos focos de queimadas no Estado de Alagoas no mês de Novembro de 2011 identificadas pelo satélite de referência o do INPE, para detecção de incêndios (AQUA, sensor MODIS), foram georreferenciadas, transformadas em ponto de grade, e inseridas no modelo de pré-processamento, e assumindo como um foco de emissão (Figura 3.7).

Figura 3.7. (A) Focos de queimadas para o mês de novembro de 2011. Os pontos de queimadas identificados pelo satélite estão na cor rosa, os pontos em vermelho são as representações municipais e (B) Focos de emissão de CO por queimadas em Alagoas para o mês de nove novembro de 2011, inseridos no modelo WRF/Chem com base aos obtidos no site do CPTEC/INPE



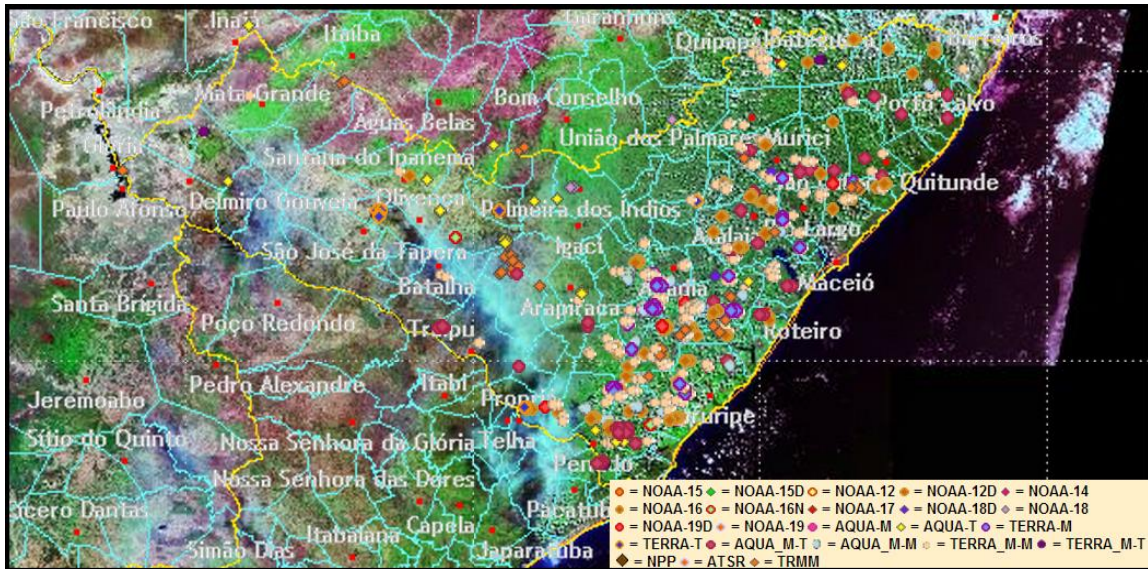
Cálculo da taxa de emissão de CO - Para calcular a quantidade emitida de um determinado poluente em análise, no capítulo 2.4.3 (Determinação da taxa de emissão de poluentes em queimadas), baseado em Seiler and Crutzen, 1980, se define variáveis referente a biomassa queimada para o cálculo do valor emitido. Sendo método determina que para cada foco a massa do traçador emitida é calculada pela equação (2.3). Os parâmetros (α_{veg} , β_{veg} , $E_f^{[n]}$) adotado foram baseados em valores propostos em estudos referentes ao processo de queima de cana-de-açúcar, sendo: o fator de emissão (E_f) para o CO igual a 28,3 g/kg, é estabelecido de acordo com Yokelson et al. (2008); a quantidade de biomassa acima do solo disponível para a queima (α), é baseado no estudo de Lara et al. (2001), onde afirma que anualmente, aproximadamente 20 toneladas de palha de cana-de-açúcar é queimada por hectare; o Fator de Combustão (β) utilizado é igual 0,8, valor utilizado por Figueiredo et al. (2010) para estimar a emissão de gases do efeito estufa associados à produção de cana-de-açúcar, sendo a área de queimada (a_{fire}) a área da grade do modelo.

Na fase **COMPLETA** da pesquisa utilizando o pré-processador BBEI de forma completa, junto com análise do período de estudo para a dispersão dos poluentes CO e PM_{2,5}, ou seja, será feita a análise de gás traço e aerossol, ambos emitidos na queima da palha-de-açúcar. Nesta etapa além da análise dos poluentes, também foram assumidas atualizações de no modelo de definições temporais, com definição do horário da queimada, ou horário de maior emissão de poluentes, e ainda atualização dos focos diários de queimada.

Focos de Queimadas - De acordo com a Figura 3.5, o mês de janeiro de 2013 apresentou um aumento considerável no número de focos de queimadas detectados no Estado de Alagoas, em comparação aos outros anos. Sendo registrados 530 focos de queimadas detectados por satélites em órbita polar (série de satélites do NOAA a 800 km de distância da Terra, e os satélites da NASA, Terra e Aqua a 730 km). Para este estudo serão utilizados apenas dados de focos de sensores de satélites polares, devido tratarem o elemento de resolução espacial (píxel) com 1 km x 1 km ou mais, o estudo parte do pressuposto de que uma queimada de algumas dezenas de m² será identificada como tendo pelo menos 1 km² (Figura 3.8).

Para o período de estudo escolhido, foi baseado em um período de dias que apresentasse configurações diferentes para o número de queimadas, tendo aumento, diminuição e uma quantidade considerável no número de focos. A razão desta escolha foi no sentido de analisar os impactos causados pelas queimadas para a atmosfera de Alagoas e vizinhança, bem como condições meteorológicas favoráveis ou não para a ignição e manutenção da queimada.

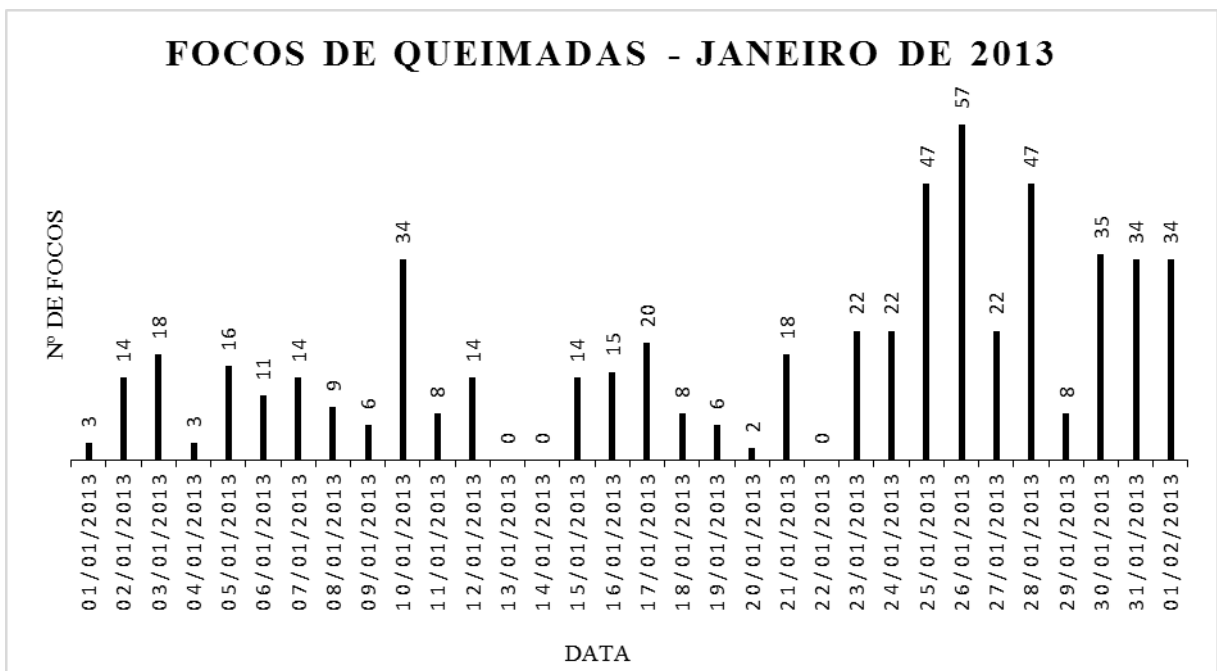
Figura 3.8 - Focos de queimadas observados no mês de janeiro de 2013 no Estado de Alagoas, por satélites em órbita polar.



Fonte: SIG QUEIMADAS, INPE/CPTEC (2013).

De acordo com a Figura 3.9, o período compreendido do dia 27 de janeiro à 01 de fevereiro, apresenta as condições requisitadas para análise, com: aumento no número de focos do dia 27 ao 28, com intensa diminuição na passagem para o dia 29, porém um novo aumento e manutenção na quantidade de focos até o dia 01/02.

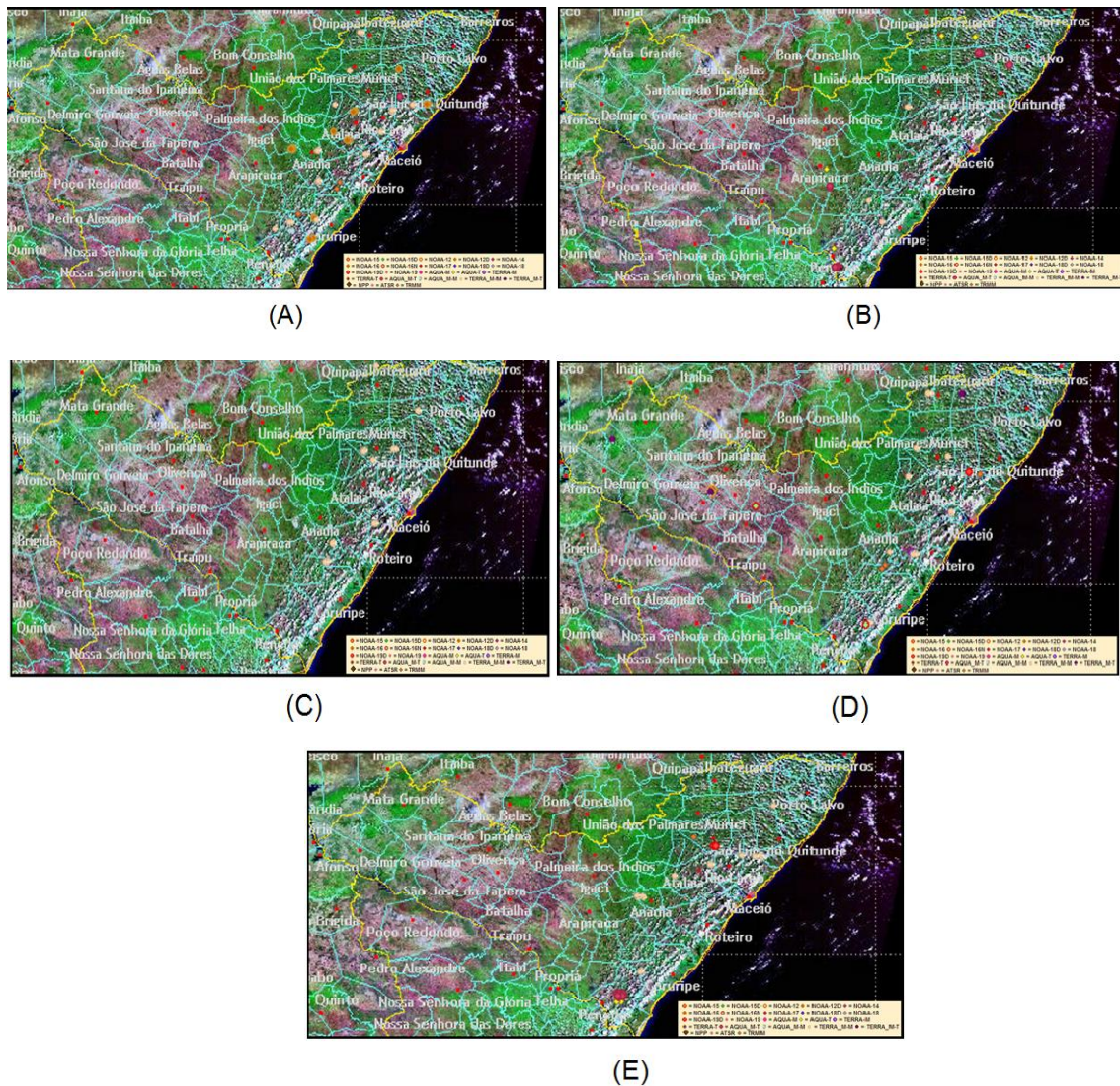
Figura 3.9 - Gráfico representativo ao número de focos diários detectados por satélites em órbita polar no Estado de Alagoas de 01 de janeiro à 01 de fevereiro de 2013.



Fonte: adaptado SIG QUEIMADAS, INPE/CPTEC (2013).

As Figuras 3.10, representam a localização e o satélite de detecção dos focos de queimadas no período compreendido das 12 horas do dia 27 de janeiro às 12 horas do dia 01 de fevereiro de 2013. A escolha do período de diário de coleta de focos e consequentemente de simulação pelo modelo, ser do período das 12 horas de um dia até as 12 horas do dia seguinte, ou seja, devido ao fato das queimadas no Estado de Alagoas serem no período noturno, iniciando comumente as 19 hora local, e também devido ao fato de ser o período de maior umidade relativa do ar e ventos fracos, no qual seria uma condição melhor para o controle do fogo.

Figura 3.10. Focos de queimadas observados das 12 horas às 12 horas do dia seguinte nos dias: (A) 27 de janeiro ao dia 28 de janeiro (51 focos), (B) 28 de janeiro ao dia 29 de janeiro (24 focos), (C) 29 de janeiro ao dia 30 de janeiro (26 focos), (D) 30 de janeiro ao dia 31 de janeiro (32 focos), (E) 31 de janeiro ao dia 01 de fevereiro (34 focos), no Estado de Alagoas.



Fonte: SIG QUEIMADAS, INPE/CPTEC (2013)

Cálculo a quantidade de emissão de CO e PM_{2,5} - Os poluentes escolhidos para análise foram novamente o monóxido de carbono como gás traço e a implantação de um aerossol poluente, o Material particulado (PM_{2,5}). O PM_{2,5} é preferencialmente emitidas por processos de combustão. Geralmente as partículas finas e ultrafinas são compostas por material carbonáceo, metais compostos orgânicos e íons sulfatos, nitratos e amoníacos. Quando a combustão apresenta ausência de chamas libera várias vezes mais partículas finas que a combustão com chamas.

Os cálculos da quantidade de CO emitido, foram utilizados dessa vez a equação para Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa, devido à queima de biomassa, baseado no “*Estimation of Greenhouse Gas Emissions from Fire*” contida nas Orientações de 2006 do IPCC para Inventários Nacionais de Gases do Efeito Estufa, Volume 4: Agricultura, Ambiente e Outros Usos do Solo (IPCC, 2006).

Equação IPCC (2006):

$$L_{fire} = A \times M_B \times C_f \times G_{EF} \times 10^{-3} \quad (3.5)$$

Onde:

L_{fire} = quantidade de Poluente para emissão por queimada (toneladas para cada: CO₂, CO, CH₄, N₂O, e NO_x, etc.)

A = Área queimada (ha)

M_B = biomassa, combustível, disponível para combustão (tons/ha)

C_f = Fator de Combustão (adimensional)

G_{EF} = Fator de Emissão (g/kg de biomassa queimada)

Sendo os valores utilizados para o estudo presentes na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Valores utilizados na Equação 3.5, para dados de entrada no “Biomass Burning Emission Input” para queimadas da palha da cana-de-açúcar.

Variável	Valor	Fonte Bibliográfica
$G_{EF}[CO]$ [g/kg]	65 ± 14	França et al., 2012
$G_{EF}[PM_{2,5}]$ [g/kg]	2,6 ± 1.6	França et al., 2012
M_B [Tons/ha]	20	Lara et al., 2001
C_f [Adimensional]	0,8	Figueiredo et al., 2010

L_{fire} = quantidade de Gases do Efeito Estufa para emissão por queimada (toneladas para cada: CO₂, CO, CH₄, N₂O, e NO_x, etc.); A = Área queimada (ha); M_B = biomassa, combustível, disponível para combustão (tons/ha); C_f = Fator de Combustão (adimensional); G_{EF} = Fator de Emissão (g/kg de biomassa queimada).

A variável utilizada com área queimada em hectares (A), foi utilizada com a área do modelo, com resolução de 5 km, ou seja, 25km².

Inicialização das queimadas - Em Alagoas, como já mostrado na Figura 3.8, a queima da cana coincide com período seco, com baixas precipitações no Estado, sendo esse entre setembro a março. Essa característica indica piores condições de dispersão já que impossibilita a chamada deposição úmida, agravando seus efeitos na qualidade do ar., todavia, as queimadas costumam acontecer no período do dia onde é visto a maior umidade no ar, por questões relacionadas a saúde e controle da queimada.

Para tanto, o BBEI, foi configurado para as maiores emissões de poluentes nas horas entre 19:00 (22Z) às 7:00(10Z). De acordo com as afirmações do tópico 2.2.1.3 (Descrição de uma queimada), é mostrado na figura 3.12, padrão de entrada de emissão do CO e PM_{2,5} durante o processo da queima da palha da cana.

Na situação de diminuição das condições necessárias para a manutenção das chamas, logo a queima entra em um estágio mais “frio”, no qual é denominada fase de brasas, há uma grande emissão de compostos incompletamente oxidados, como o CO (Freitas et al., 2005). Sendo também a fase de brasa a maior responsável pela emissão do material particulado (Ward et al., 1992). Devido à importância dos estágios das queimadas em termo do poluente que é emitido, foi convencionado que o estágio de chamas ocorre entre 17Z à 21Z (emissões em maiores quantidades de CO₂, e menores quantidade de CO e material particulado), e no estágio de brasas ocorre entre 21Z à 11Z (emissão em menor quantidade de CO₂, e em maior quantidade de CO e material particulado). Na Figura 3.11 é demonstrado graficamente a variação temporal da emissão de CO e PM_{2,5}.

O BBEI define as quantidades de emissão horária baseado na equação 3.6:

$$Emiss\tilde{a}o_x = Peso_{hr} \times L_{fire} \times (dx \times dy) \quad (3.6)$$

Onde:

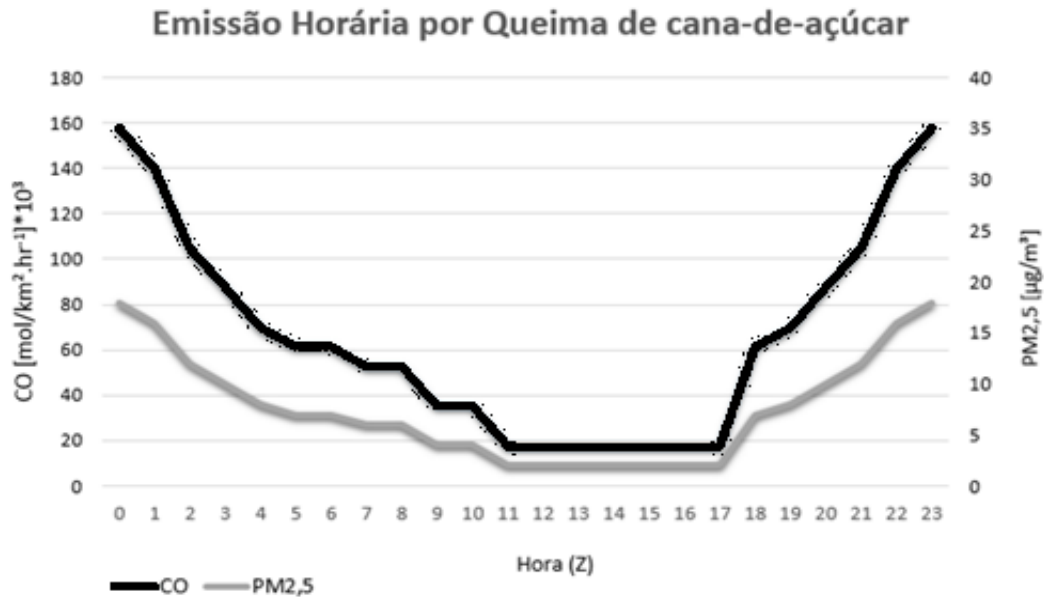
$Emiss\tilde{a}o_x$ = Emissão de determinado poluente (X) no horário correspondente

$Peso_{hr}$ = Peso de emissão em determinado horário

L_{fire} = Quantidade de Poluente para emissão por queimada (equação 3.5)

$dx \times dy$ = Resolução do modelo

Figura 3.11 - Variação horária das entradas das emissões de queima de biomassa do modelo WRF/Chem, para CO e PM_{2,5}.



3.3 Dados de qualidade do ar por Sensoriamento Remoto

Um método de analisar a concentração de poluentes na camada atmosférica é através de instrumento que realizam sondagens a bordo de satélites. Um sensor capaz disso é o AIRS. O AIRS é um instrumento cujo objetivo é apoiar a pesquisa de clima e melhorar a previsão do tempo. Lançado em órbita da Terra em maio de 2002, é um dos seis instrumentos a bordo do satélite AQUA, parte do EOS-NASA. O instrumento juntamente com o AMSU-A (*Advanced Micro Sounding Unit*) representa o sistema de sondagem atmosférica mais avançado já implantado no espaço. Juntos, esses instrumentos observam a água global e ciclos de energia, variação e tendências climáticas e a resposta do sistema climático para o aumento dos gases estufa.

AIRS usa tecnologia de infravermelho de ponta para criar mapas em 3 dimensões do ar e da superfície de temperatura, vapor de água, e as propriedades das nuvens. Com 2.378 canais espectrais, AIRS tem uma resolução espectral mais de 100 vezes maior do que os sensores IR anteriores, e fornece informações mais precisas sobre os perfis verticais de temperatura atmosférica e umidade. AIRS também pode medir gases traço efeito estufa, como o ozônio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano.

A medição das concentrações de monóxido de carbono na atmosfera é baseado na radiação a comprimentos de onda específicos associados a absorção por concentrações de

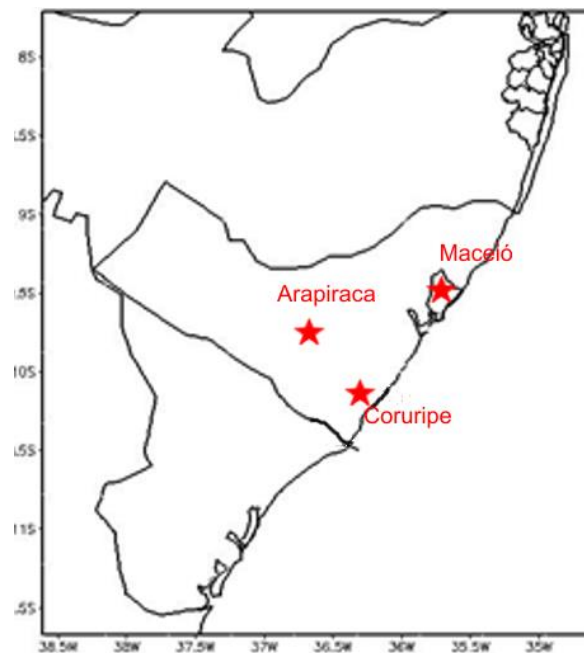
monóxido de carbono. O AIRS é sensível ao CO na troposfera média a alturas entre 2 e 10 quilômetros, com um pico de sensibilidade em uma altitude de aproximadamente 5 quilômetros. Essa região da atmosfera da Terra também é propícia para o transporte de longa distância da poluição que é levada para esta altitude.

3.4 Dados Meteorológicos

Afim de fazer uma análise da atmosfera durante a fase COMPLETA, serão feitas análises de dados meteorológicos e de cartas sinóticas.

Serão selecionados dados de estações meteorológicas automáticas do INMET de direção e velocidade do vento, temperatura e umidade do ar nas cidades de Maceió, Coruripe e Arapiraca (Figura 3.12). Sendo que para a direção e velocidade do vento serão avaliadas estatisticamente para verificar a qualidade das simulações do modelo WRF/Chem.

Figura 3.12 – Localização das cidades onde estão as estações automática do INMET, no Estado de Alagoas.



Fonte: Autor, (2013)

O estudo estatístico será realizado com base no Coeficiente de Correlação de Pearson, que realiza o cálculo de uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação de Pearson é normalmente representado pela letra **r** e a sua fórmula de cálculo é:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Sendo o grau de Correlação representado pela tabela 3.3.

Tabela 3.4 – Representação do grau de correlação linear de Pearson.

Coefficiente de Correlação (positivo ou negativo)	Correlação
$r = 1$	Perfeita
$0,8 \leq r < 1$	Forte
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca
$0 < r < 0,1$	Ínfima
0	Nula

Além da análise de dados, serão observado também na fase COMPLETA, cartas Sinóticas de altos níveis do CPTEC/INPE e de superfície da Diretoria de Hidrologia e Navegação – DHN, bem como imagens de satélite no canal do Infravermelho, também disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, para assim caracterizar a atmosfera durante o período de estudo na fase, e assim justificar a ocorrência de queimadas no estado de Alagoas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados estimados durante as três fases de teste da implementação do programa de pré-processamento químico do modelo WRF/Chem, bem como análises sobre emissão, concentração e dispersão dos poluentes durante as três fases: **INICIAL, INTERMEDIÁRIA e COMPLETA.**

4.1 Fase INICIAL²

Essa fase de teste trata das primeiras simulações realizadas para avaliar as emissões e dispersão de poluentes associados a queima de cana-de-açúcar utilizando o modelo WRF/Chem. Vale destacar que neste teste as emissões não levam em consideração a biomassa e nem o efeito que ela causaria na atmosfera em termos de convecção, ou seja, apenas está sendo considerado que numa dada localidade está sendo emitido um dado poluente numa dada taxa de emissão (saindo da superfície).

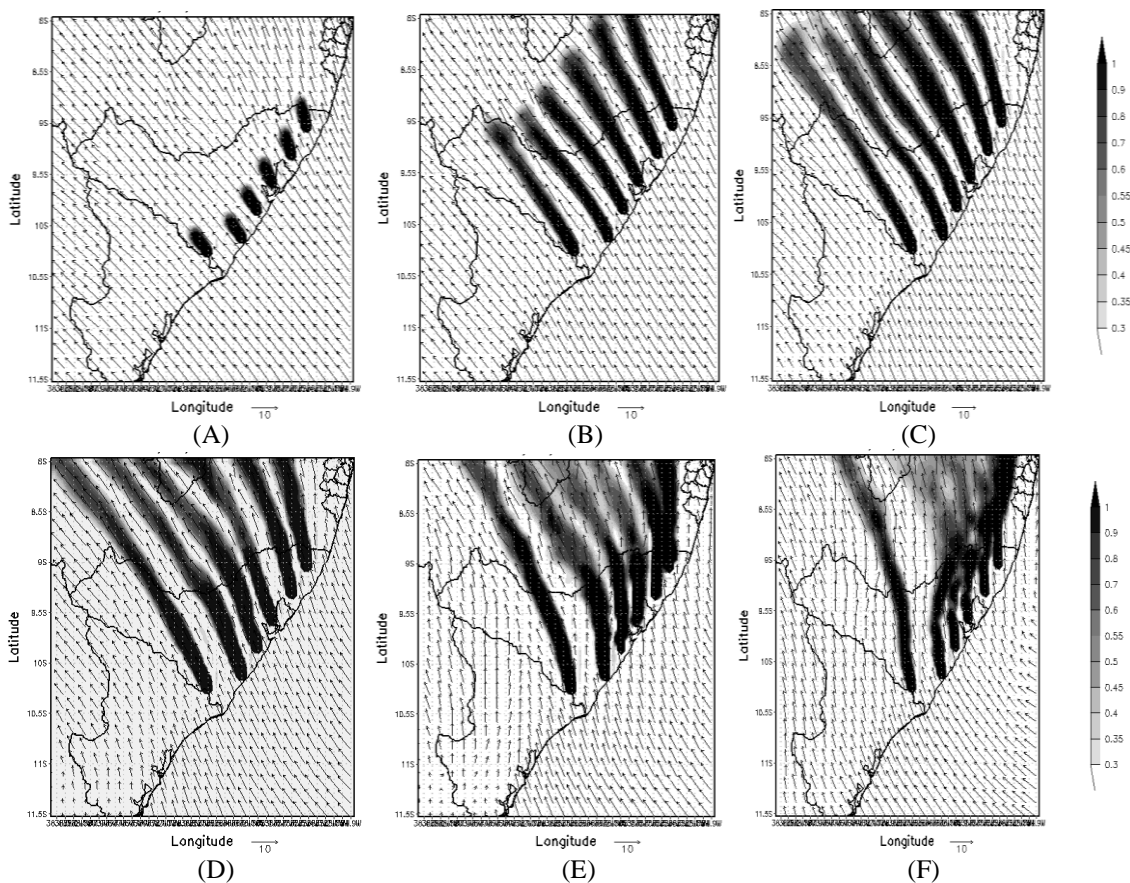
A Figura 4.1 mostra a concentração de CO, emitidas por focos de queimadas no litoral alagoano, cuja simulação foi iniciada às 12Z do dia 21 até às 12Z do dia 22 de maio de 2011. As emissões foram configuradas de forma constante, de modo que em todas as horas a quantidade emitida era a mesma, visto que não foram feitas considerações em relação a tempo de queima e emissão, adotando assim sempre valores máximos, mesmo distante da fonte de queimada.

Na análise da evolução temporal e espacial da dispersão de CO no Estado de Alagoas, verificou-se que o gás segue a direção e velocidade do vento de sudeste. É perceptível a mudança na direção do vento durante a análise, junto com uma variação na direção da dispersão de CO, seguindo o vento de sul. Sendo adicionalmente possível notar a presença do poluente até 250 km de distância em comparação ao ponto de emissão, afetando os Estados vizinhos, como Pernambuco e Paraíba.

² Esta etapa do trabalho foi publicada em: MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.: Estudo da dispersão de poluentes no Estado de Alagoas, simulando queimadas no litoral do Estado. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Gramado - RS. 2013.

Considerando a dispersão vertical das emissões, vale destacar a configuração do modelo WRF/Chem. Para os primeiros testes, os resultados sobre a dispersão do poluente, tiveram as rodadas configuradas com um mecanismo químicos simples, onde nesse só seriam geradas informações de seis gases traços (SO_2 , CO, NO, aldeídos, HCHO e ORA_2). Neste mecanismo, o gás traço de interesse (CO) no estudo estava presente, porém ele não leva em consideração informações de queima de biomassa, portanto, o modelo fazia apenas a emissão do poluente de uma fonte qualquer, sobre superfície.

Figura 4.1 - Representação da concentração do CO emitido nos seis pontos de emissão no dia 21 de maio de 2011 às (A) 13Z, (B) 17Z e (C) 20Z, e no dia 22 de maio de 2011 às (D) 00Z, (E) 07Z e (F) 12Z, respectivamente.

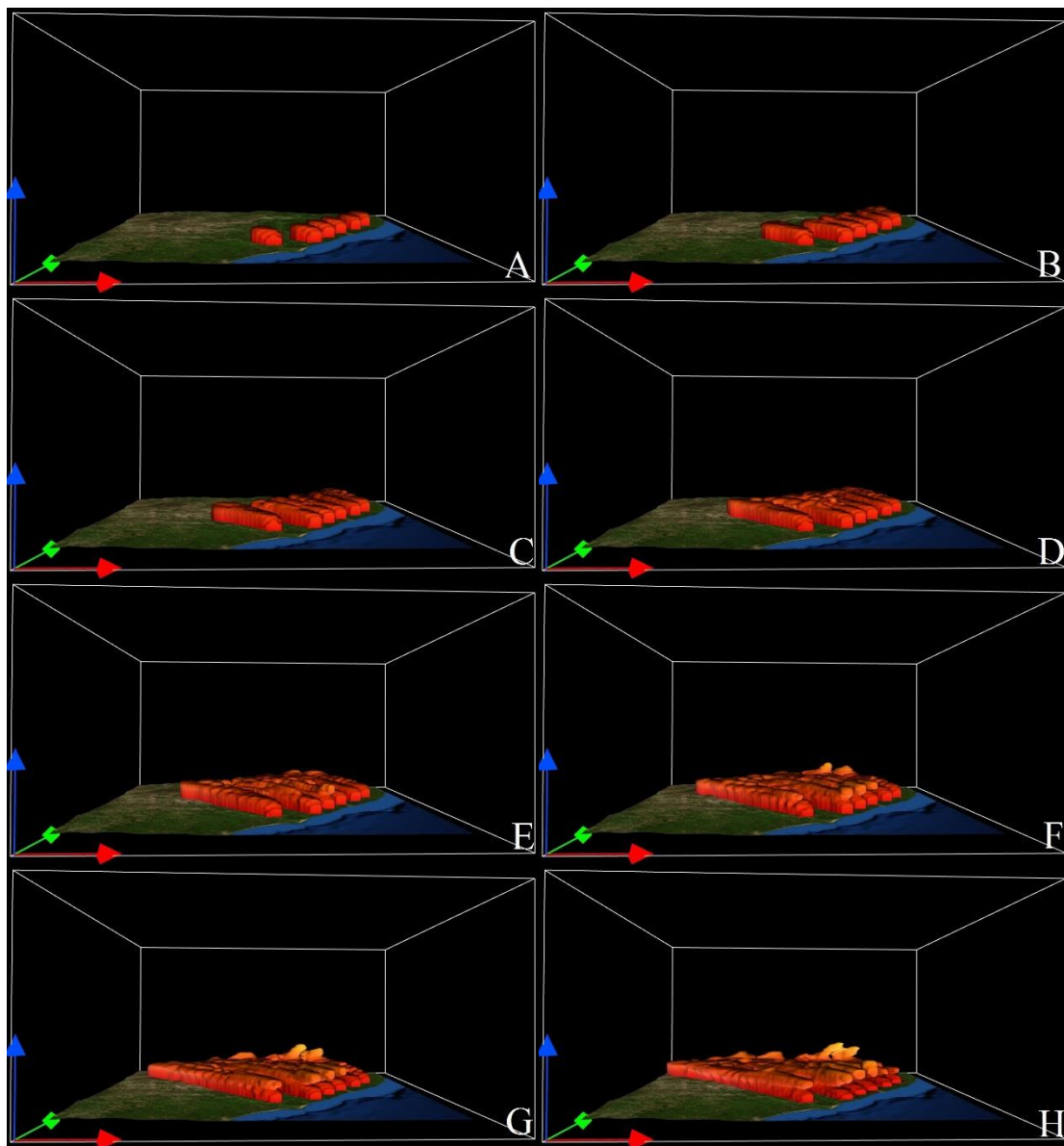


Fonte: Autor (2012)

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 mostram a dispersão vertical e horizontal do poluente CO para os seis focos de emissões analisados. Como as emissões não tiveram o padrão de queima de biomassa em sua configuração, a variação vertical esteve ligado a estrutura temporal da CLP, para a análise da dispersão vertical serão considerados alguns conceitos sobre Camada Limite Planetária. É possível notar diferenças com relação à dispersão horizontal do CO, nos seis focos de queimadas, todavia pode-se observar que houve variação vertical. Portanto, é possível analisar que para os primeiros horários o mesmo não é observado, de fato, o padrão de queima

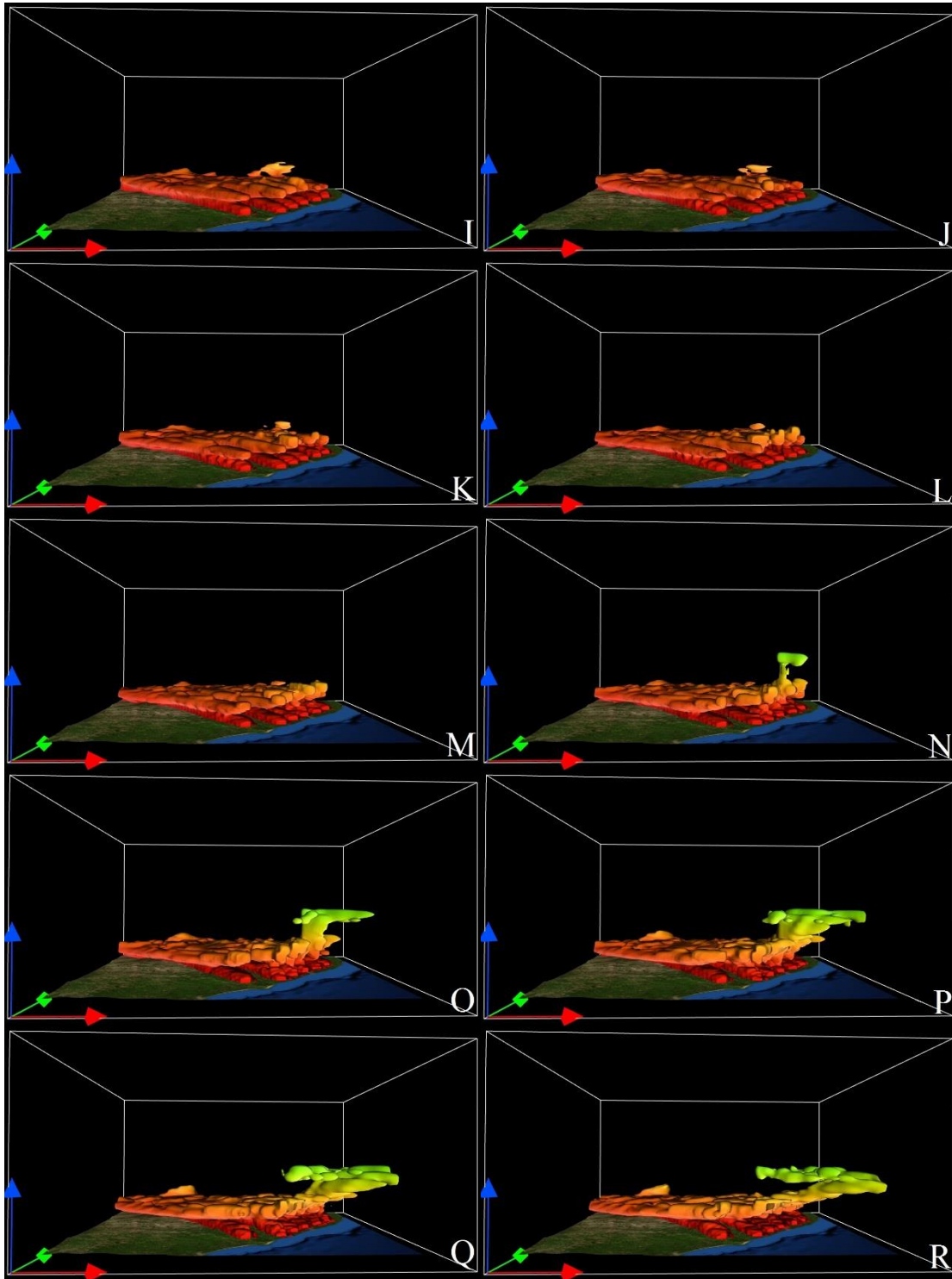
de biomassa, isto é, a dispersão se dá principalmente na horizontal, associado ao vento em superfície. Analisando a altura do poluente nas primeiras horas, é possível ver o início das emissões em um período convectivo (13Z ou 10:00 hora local), caracterizado por turbulência térmica na camada diurna, porém as emissões estão próximas a superfície caracterizando a dispersão muito mais associada ao movimento horizontal.

Figura 4.2 - Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 21 de maio de 2011 às (A) 13Z, (B) 14Z, (C) 15Z, (D) 16Z, (E) 17Z, (F) 18Z, (G) 19Z, e (H) 20Z, respectivamente.



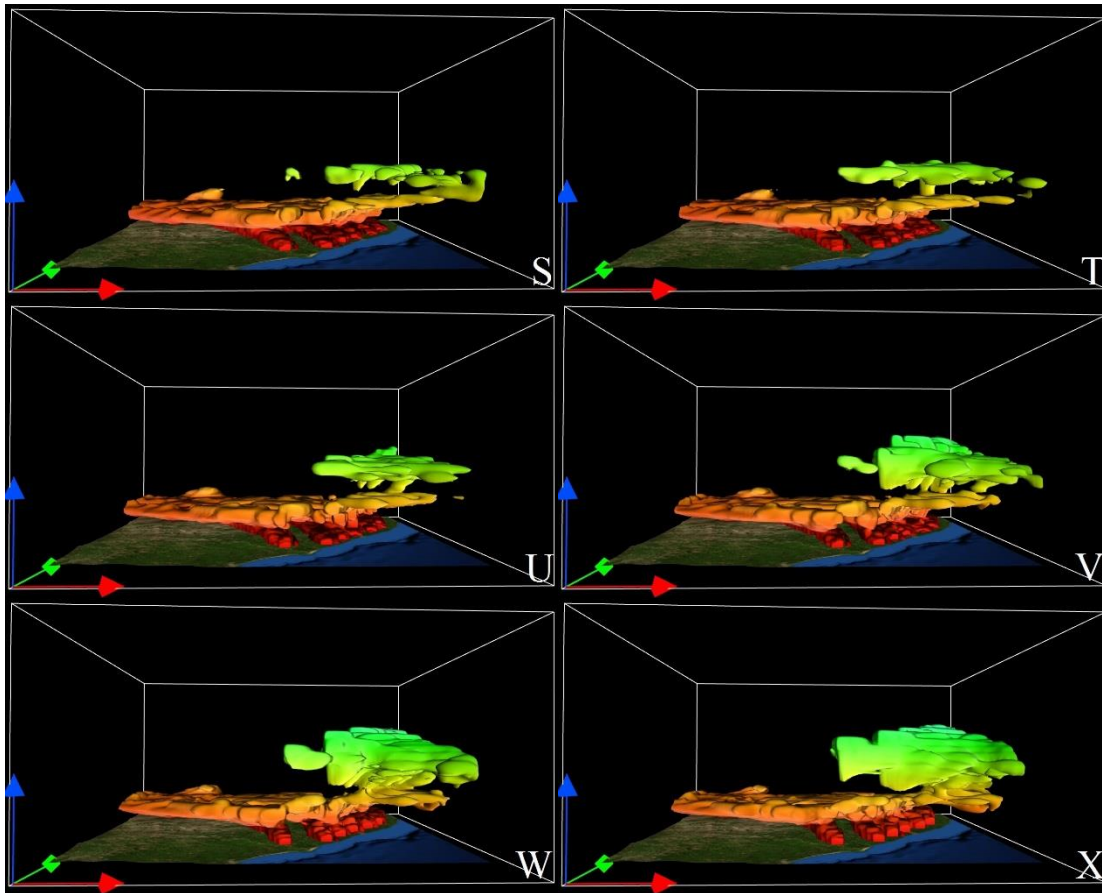
Fonte: Autor (2012)

Figura 4.3. Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 21 de maio de 2011 às, (I) 21Z e (J) 22Z, (K) 23Z, (L) 00Z, (M) 01Z, (N) 02Z, (O) 03Z e (P) 04Z, (Q) 05Z e (R) 06Z, respectivamente.



Fonte: Autor (2012)

Figura 4.4 - Dispersão vertical e horizontal das emissões de CO nos 6 focos de queimadas do dia 22 de maio de 2011 às (S) 07Z (T) 08Z (U) 09Z, (V) 10Z, (W) 11Z e (X) 12Z, respectivamente.



Fonte: Autor (2012)

A partir das 21Z, 18:00 hora local, (Figura 4.3I), se observa, uma pequena concentração do gás ascendendo, porém aprisionado dentro de uma Camada Limite Estável (noturna). A acumulação do CO próximo a superfície devido a pouca reatividade do gás e provavelmente a baixa velocidade do vento, fez com que mesmo com pouca atividade convectiva na CLP neste período (noturno), o CO emitido passasse a ter uma ascensão devido a sua característica química. Nas Figuras 4.3O, 4.3P, 4.3Q, 4.3R, 4.4S e 4.4T apresentam a ascensão do CO verticalmente. É possível observar a altura máxima da CLP estável (noturna) limitado pela camada de inversão, camada essa que aprisiona o poluente próximo a superfície.

A partir das 09Z do dia 22 de maio, 06:00 hora local, (Figura 4.4U), com o nascer do sol no início do dia, e incidência de radiação solar, é possível ver o poluente emitido atingindo maiores alturas, devido a aquecimento diurno da superfície, é caracterizado um padrão de convecção térmica e maior altura do topo da CLP, permitindo o poluente de ascender verticalmente, padrão esse observado até a última hora de análise, 12Z (Figura 4.4X).

4.2 Fase INTERMEDIÁRIA³

Para a a segunda fase de evolução nos resultados, **INTERMEDIÁRIA**, foram tomadas considerações afim de tornar mais reais as simulações referente as queimadas no Estado de Alagoas. Estas considerações se definiram em: implantação de focos de queimadas obtidos por sensoriamento remoto no Estado de Alagoas; definição da quantidade de CO emitida durante um processo da queima da palha da cana-de-açúcar, junto à confirmação das quantidades emitidas de CO com base em estudos referentes ao processo de queima palha de cana-de-açúcar.

Observa-se no princípio das emissões de CO dos focos de queimadas no Estado de Alagoas para todos os dias de análise, que a grande maioria estão próximas ao litoral alagoano. Essa observação já é esperada para o Estado devido às variações das condições climáticas, principalmente de temperatura e umidade relativa do ar no litoral em comparação ao interior do Estado. É visto ainda a existência de focos mais intensos, como o encontrado no litoral norte do Estado (8,97° S; -35,59°W), o que sugere a maior quantidade de queimadas no litoral norte em comparação a outras localidades da área de estudo.

Para os dias 01 e 02 de novembro de 2011 é observado o mesmo padrão de dispersão de CO para às 13 horas (Figuras 4.5B e 4.6E), onde o gás traço, em concentrações de 1500 ppbv, está sendo carregado até o Estado de Sergipe a cerca de 110 km da fonte de emissão. Porém, às 19 horas (Figuras 4.5C e 4.6F) nos dois dias, o vento se altera para um padrão zonal, sentido Leste-Oeste, o que direciona o CO em concentrações de 500 ppbv também para o interior de Alagoas, próxima a 500 ppbv, ultrapassando 200 km de distância da fonte (Figuras 4.5C e 4.6F). Na primeira hora do dia 02/11/11(Figura 4.6D), percebe-se este padrão zonal do vento atuando sobre Alagoas, e com isso a concentração de CO que é emitida no litoral norte do Estado se desloca em direção ao interior do Estado (Figura 4.5 e 4.6).

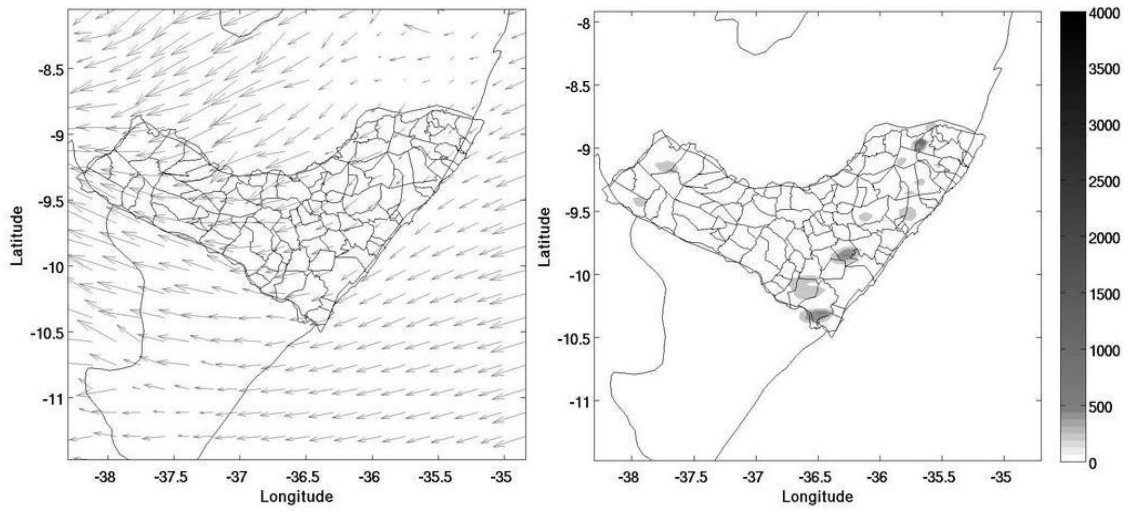
No dia 03 de novembro de 2011 (Figura 4.7), o padrão zonal do vento se soma aos ventos alísios com as direções dos ventos mudando do sentido para o noroeste, no sul do Estado, principalmente às 19Z. As concentrações de CO são bem correlacionadas ao padrão do vento nesse dia, onde é possível notar altas concentrações de CO a pouco menos que 100 km da fonte de emissão (próximas a 3000 ppbv) no litoral norte do Estado tanto a 01Z e 13Z (Figuras 4.7G e 4.7H), as quais estão associado à diminuição dos ventos naquela região, o que acarretou em pouca dispersão do poluente. As concentrações próximas as fontes de emissões foram

³ Esta Etapa do trabalho foi publicada em: MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.; GOMES, H. B.; MOURA, M. A. L.: Estudo da dispersão de monóxido de carbono (CO) emitido através da queima de cana-de-açúcar, no Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, p. 488-499, 2013.

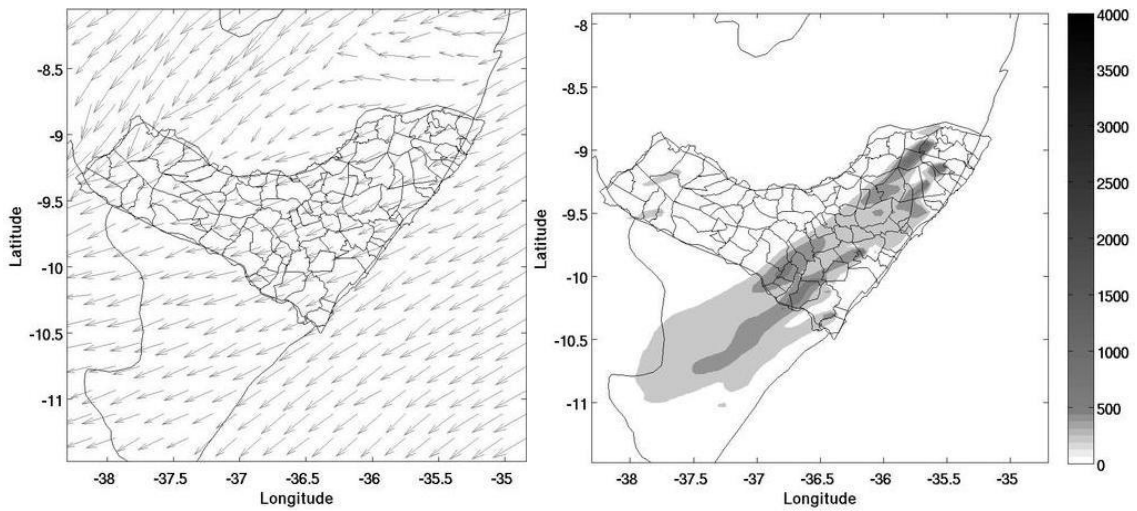
observadas chegando ao valor entre 3500 e 4000 ppbv. Essas estimativas de concentração de CO corrobora com o próximo a queimadas de cana-de-açúcar, como por exemplo Mariano (2010) e CETESB (1997/98), ambos para o Estado de São Paulo. É possível analisar uma região de confluência de ventos até o Sertão de Alagoas, que faz com que o poluente emitido naquela região seja rapidamente disperso para fora do Estado (Figuras 4.5B) enquanto ao final do dia é possível observar o aumento no padrão dos alísios. Isso faz com que a dispersão agora se dê em direção ao Estado de Pernambuco (Figuras 4.7I).

No dia 04 de novembro de 2011 pode-se observar focos menos intensos de queimadas a 01Z (Figura 4.9J), onde as regiões com maiores concentrações de CO (litoral norte) possuem valores máximos de concentração, porém no campo de direção dos ventos para o mesmo horário pode-se comprovar que os vetores dos ventos estão menos intensos, justificando assim a pouca dispersão da concentração de CO (Figura 4.8J). Das 13Z do dia 04 às 01Z e 13Z do dia 5 (Figuras 4.8K, 4.9M e 4.9N) o vento assume o padrão de alísios, de Sudeste para Noroeste, porém sem intensidade suficiente para uma dispersão significativa do poluente, e acarretando altos valores de concentração próximos as fontes das queimadas (Figuras 4.8K, 4.9M e 4.9N). Às 19Z do dia 04/11/11 (Figura 4.8L), os ventos alísios se tornam intensos sobre o território de Alagoas, fazendo com que o material poluente que anteriormente estava em altas concentrações, se disperse em direções aos Estados mais ao norte, (Pernambuco e Paraíba), com cerca de 150 km da sua fonte de emissão (-8°S ; $-35,5^{\circ}\text{W}$), e em concentrações de 200 a 800 ppbv (Figura 4.8L).

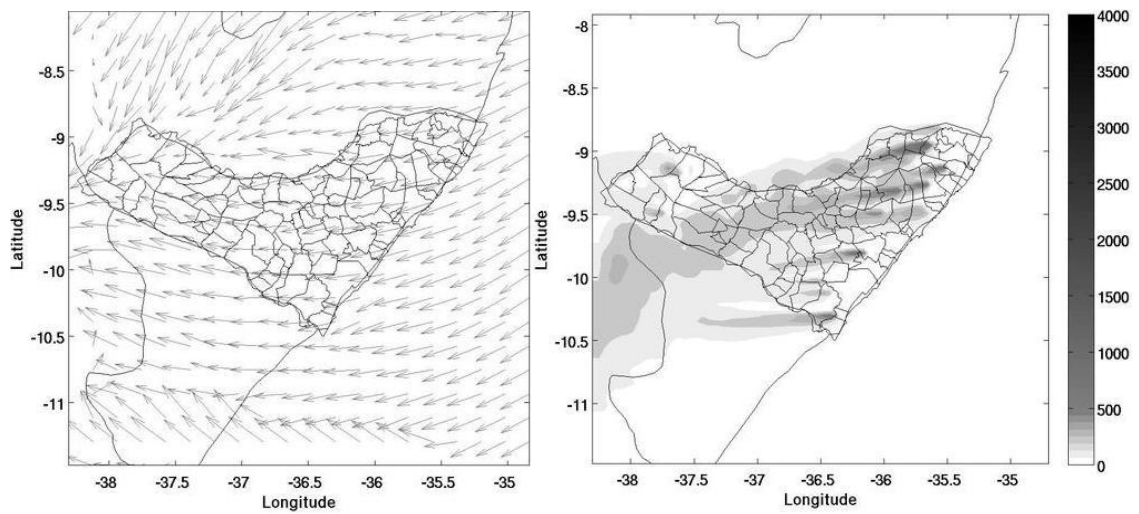
Figura 4.5 - Concentração de CO e direção do Vento às (A) 01Z, (B) 13Z e (C) 19Z do dia 01 de novembro de 2011.



(A) 01Z do dia 01/11/2011

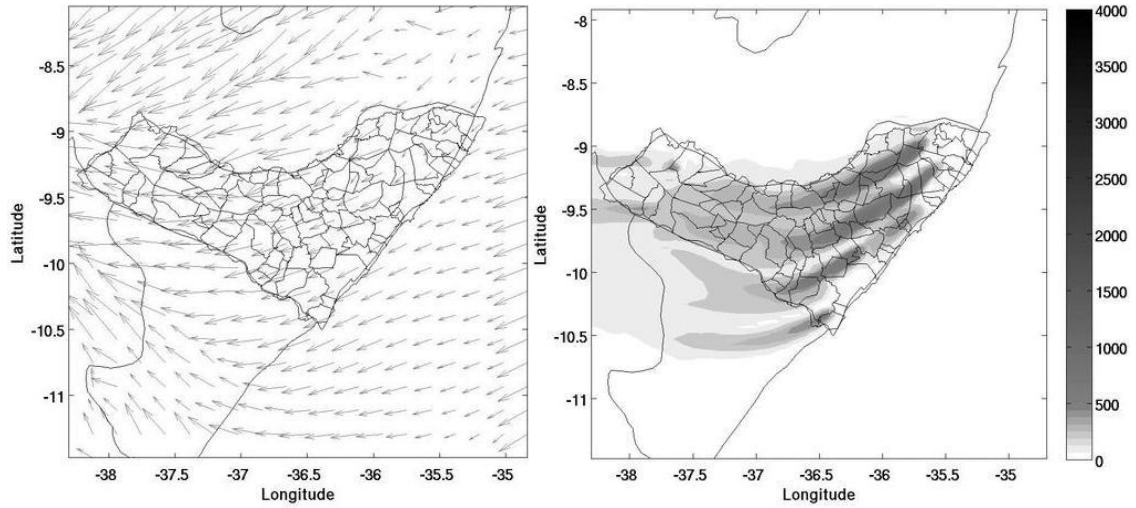


(B) 13Z do dia 01/11/2011

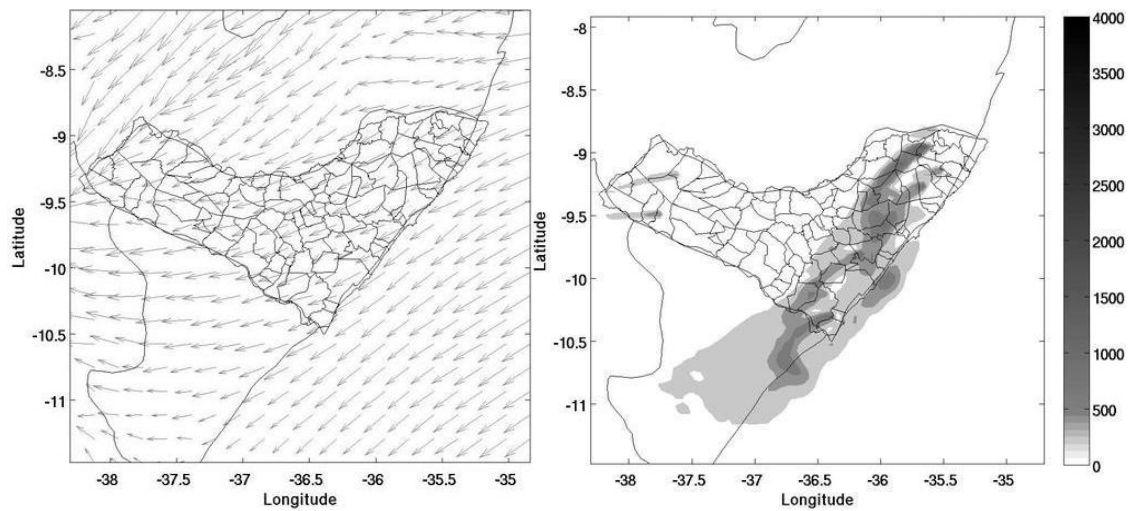


(C) 19Z do dia 01/11/2011

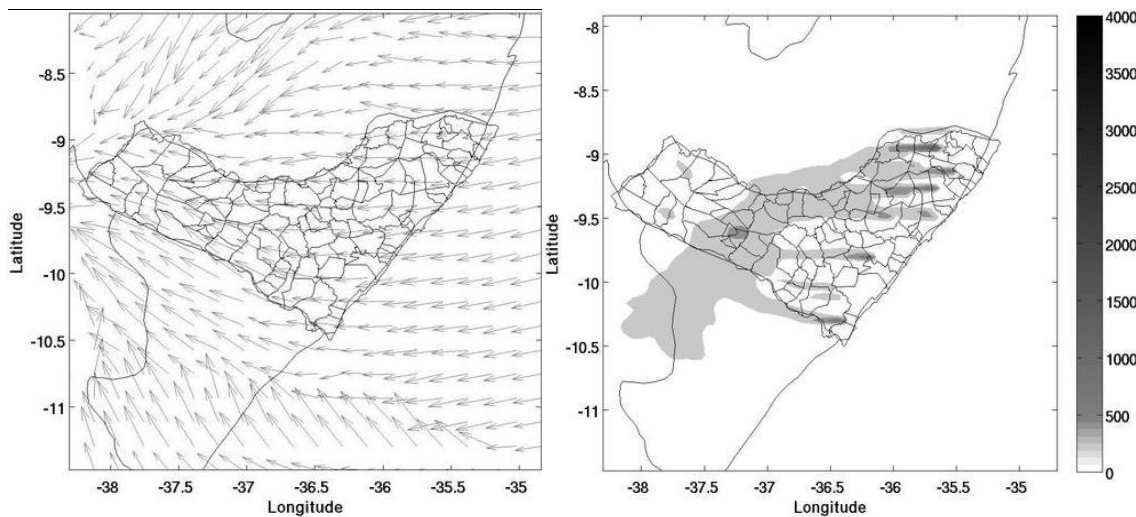
Figura 4.6 - Concentração de CO e direção do Vento às (D) 01Z, (E) 13Z e (F) 19Z do dia 02 de novembro de 2011.



(D) 01Z do dia 02/11/2011

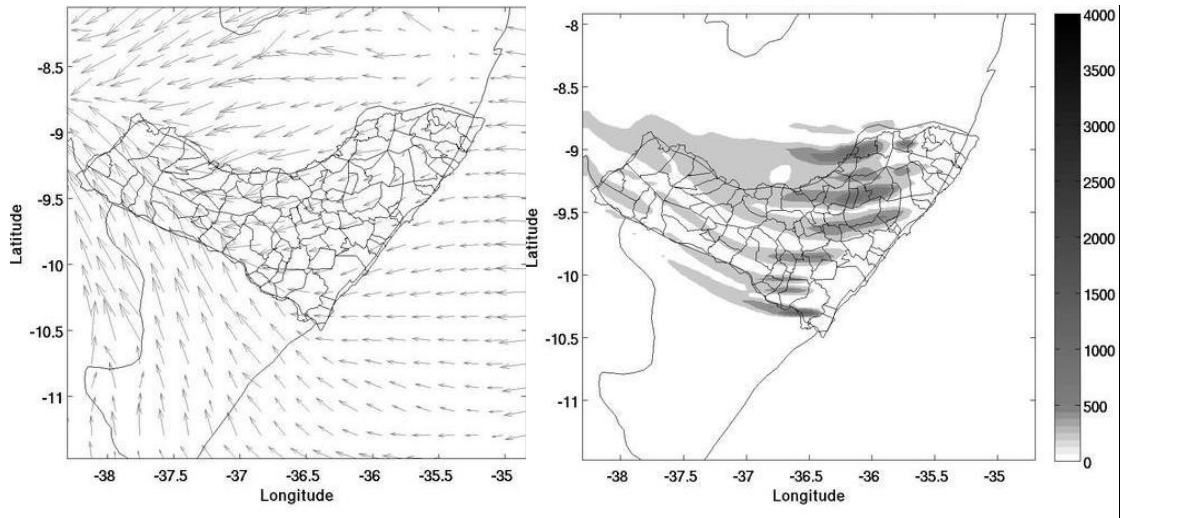


(E) 13Z do dia 02/11/2011

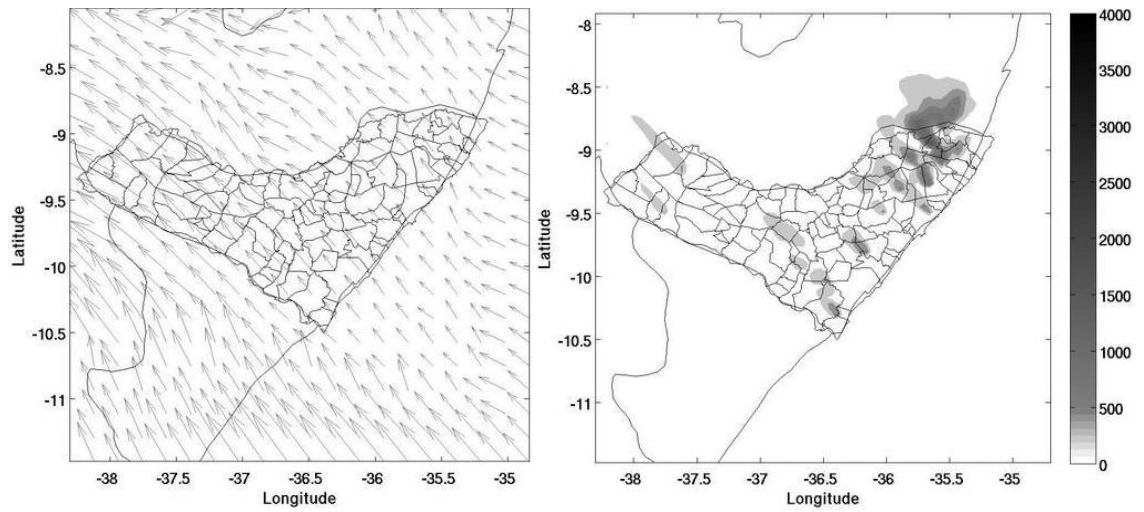


(F) 19Z do dia 02/11/2011

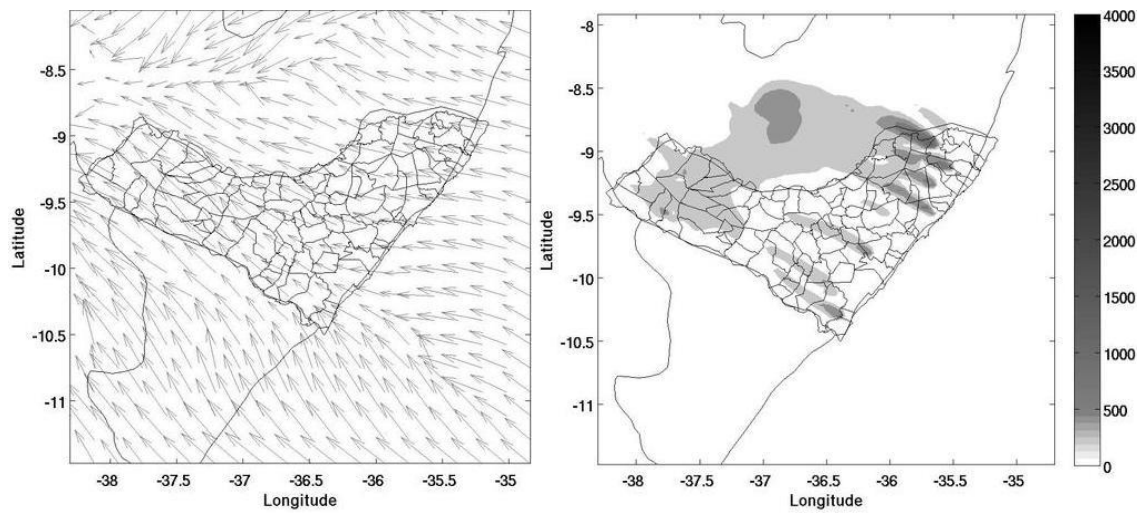
Figura 4.7 - Concentração de CO e direção do Vento às (G) 01Z, (H) 13Z e (I) 19Z do dia 03 de novembro de 2011.



(G) 01Z do dia 03/11/2011

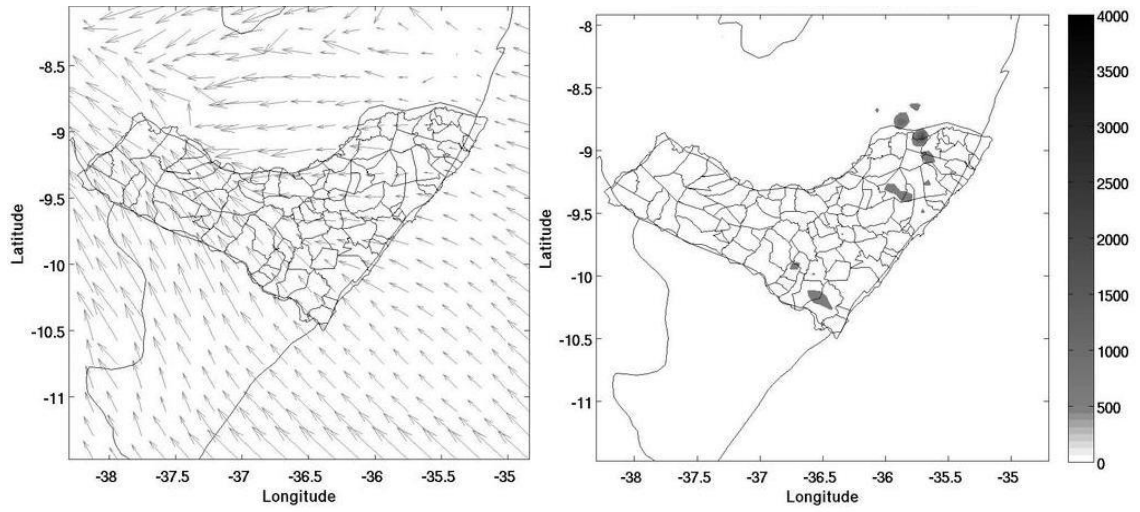


(H) 13Z do dia 03/11/2011

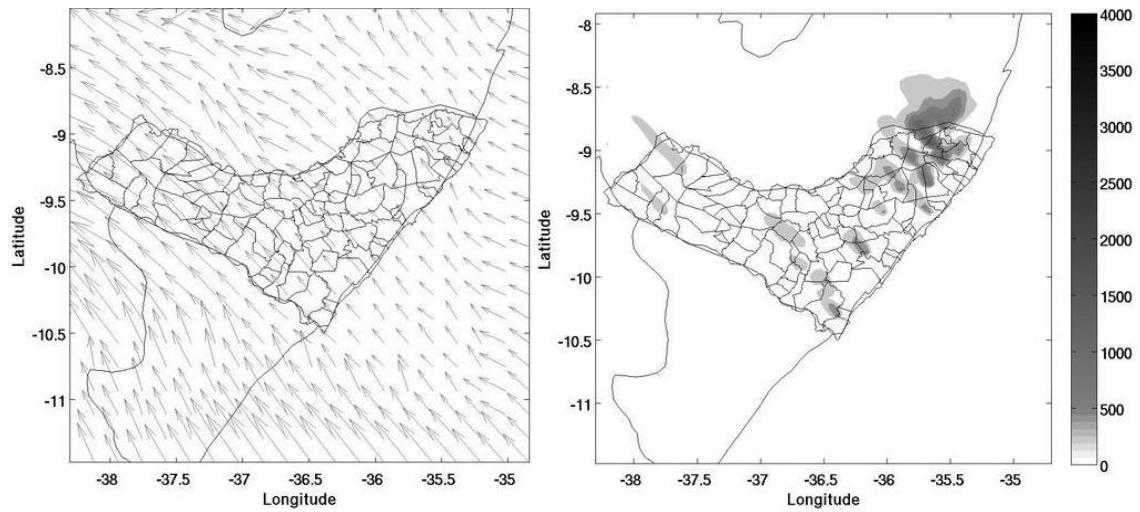


(I) 19Z do dia 03/11/2011

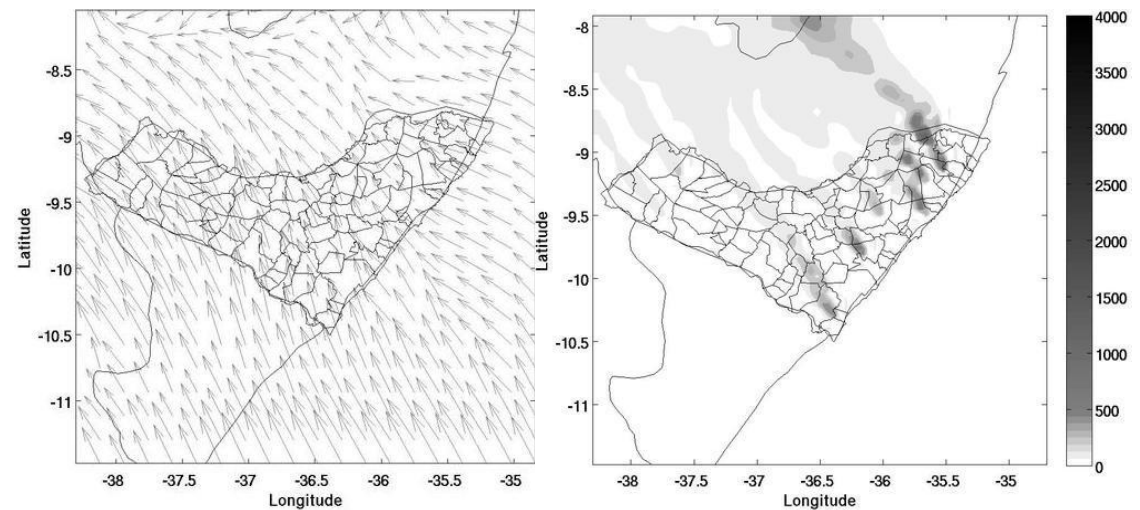
Figura 4.8 - Concentração de CO e direção do Vento às (J) 01Z, (K) 13Z e (L) 19Z do dia 04 de novembro de 2011.



(J) 01Z do dia 04/11/2011

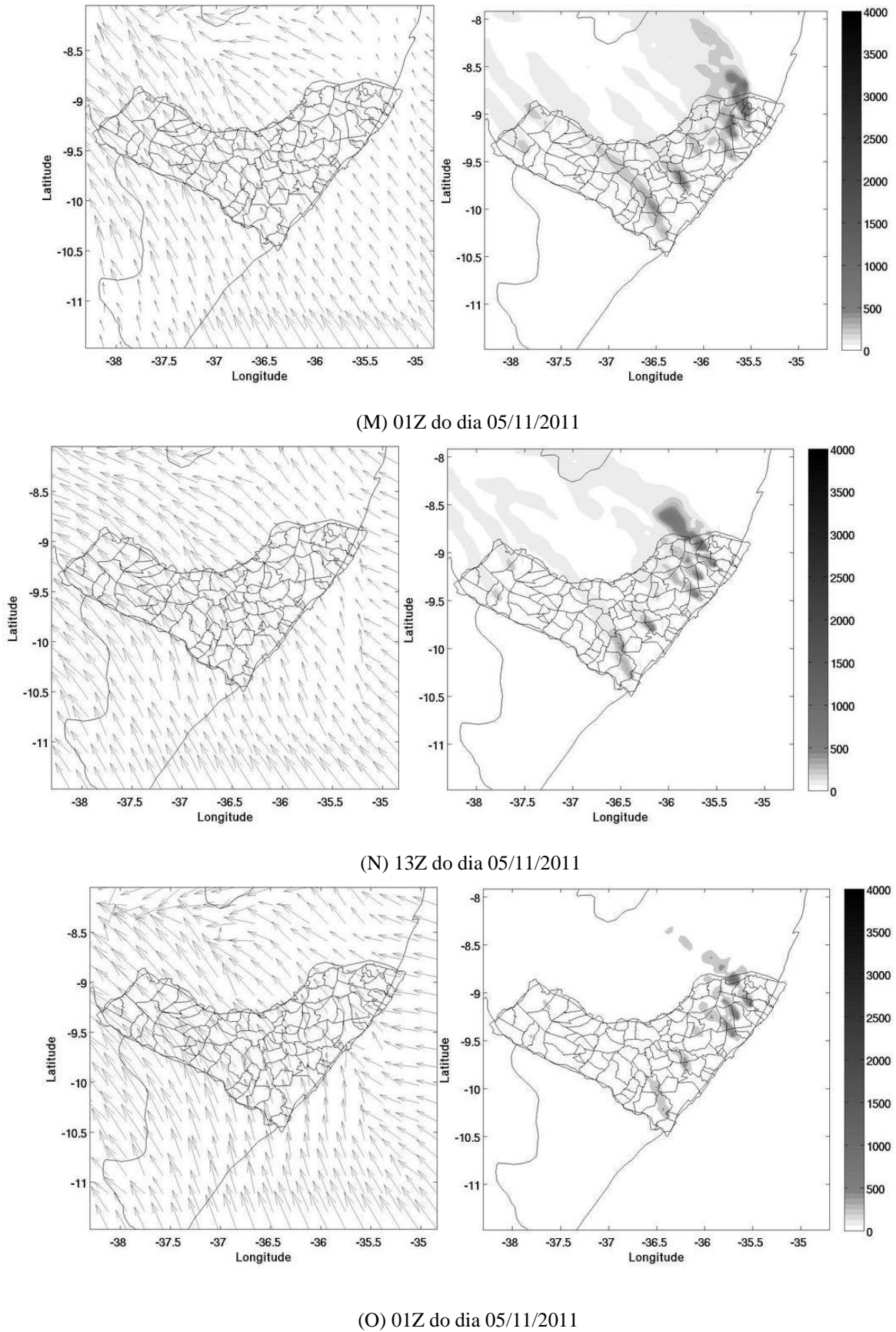


(K) 01Z do dia 04/11/2011



(L) 19Z do dia 04/11/2011

Figura 4.9 - Concentração de CO e direção do Vento às (M) 01Z, (N) 13Z e (O) 19Z do dia 05 de novembro de 2011.



4.1 Fase COMPLETA

Já na fase final da pesquisa utilizou-se o pré-processador BBEI de forma completa, junto com análise do período de estudo para a dispersão dos poluentes CO e PM_{2,5}, ou seja, será feita a análise de gás traço e aerossol, ambos emitidos na queima da palha-de-açúcar. Esta fase será amplamente discutida no sentido de validar as simulações.

4.1.1 Dados Meteorológicos

A principal motivação para a escolha do período de estudo, entre 28 de janeiro a 01 de fevereiro de 2013, foi o aumento considerável no número de focos no Estado de Alagoas, detectados pelos satélites, como observado na Figura 3.7.

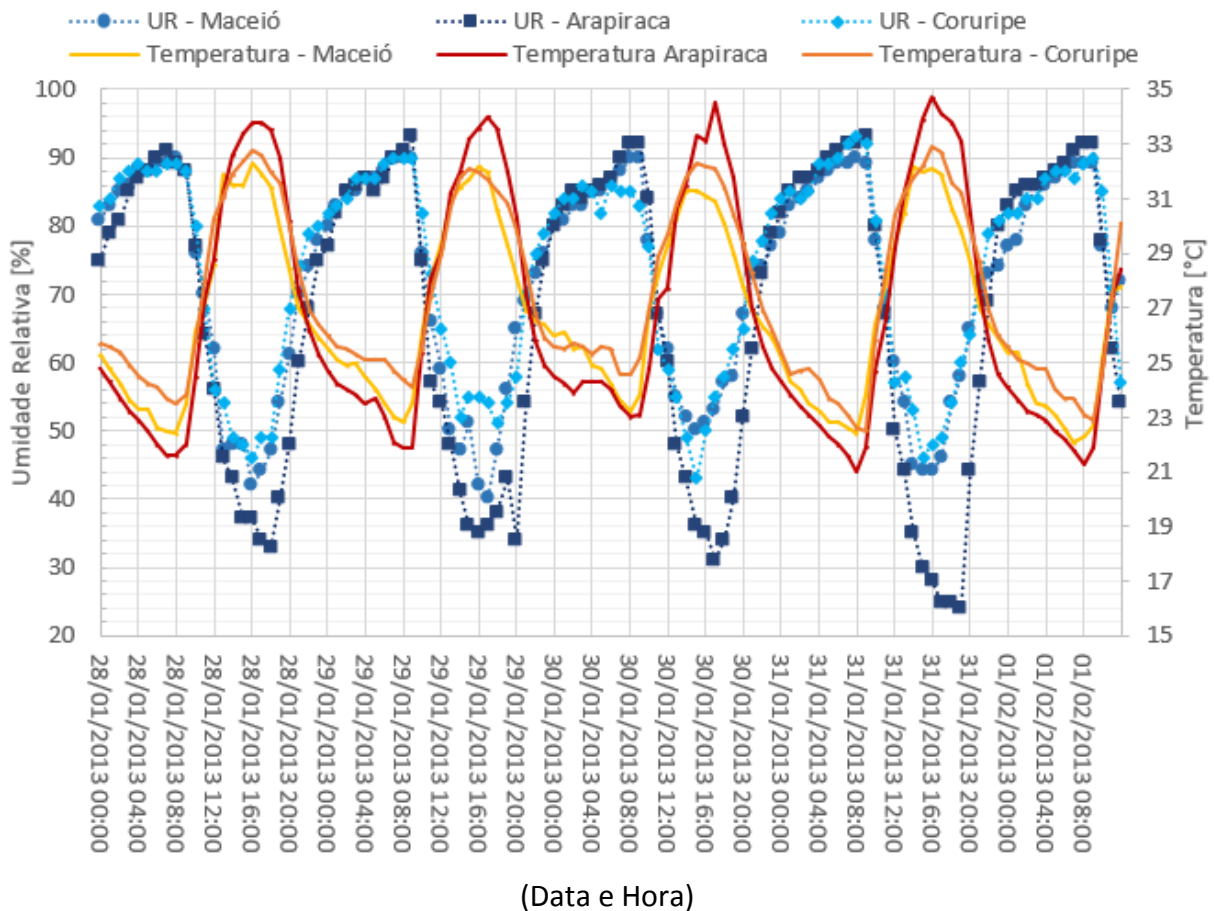
Ao fazer uma análise dos dados de estações automáticas do INMET, para três localidades distintas no Estado de Alagoas, são selecionados dados de Umidade Relativa, Temperatura, Direção e Velocidade do Vento, para municípios aonde são observadas ou sofrem da influência de queimadas de canaviais durante o período, sendo eles: Maceió, Arapiraca e Coruripe (Figura 3.12).

Observa-se um padrão contrário na figura 4.10 entre as duas variáveis, justificando assim o horário de queima da palha de cana-de-açúcar no Estado, no período ao final da noite. Já que a alta temperatura do ar associada à baixa umidade, que são elementos essenciais para a ocorrência de rápida propagação de incêndios, ou seja, e possível maior controle sobre o mesmo.

Nota-se que as maiores temperaturas, bem como as menores UR ocorrem no município de Arapiraca para todos os dias de análise. Isso ocorre em função da sua localização no Agreste alagoano. Também é perceptível observar a amplitude térmica e de umidade, maiores na cidade de Arapiraca (Agreste) do que nas cidades localizadas ao litoral do estado. Maceió e Coruripe, possivelmente associado as condições de localização e relevo, devido a mesorregião do agreste ser a transição entre litoral e semiárido, ou seja, durante o dia maiores temperaturas com menores UR, e por conseguinte com menores temperaturas maiores UR. Por este motivo as queimadas no Estado ocorrem no período ao final do dia. As temperaturas máximas e mínimas nas cidades do litoral se demonstram no decorrer dos cinco dias bem próximas umas das outras, porém em Arapiraca é observado uma diferença próxima de 1°C a mais para temperatura máxima e mínima, essa diferença de temperatura deve ser em função ao fator termorregulador do Oceano Atlântico, que controla a temperatura e umidade próximo ao litoral.

Figura 4.10 – Dados de Umidade Relativa (%) e Temperatura (°C) do ar, obtidos das estações do

INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para os municípios de Maceió, Arapiraca e Coruripe.



Fonte: adaptado INMET

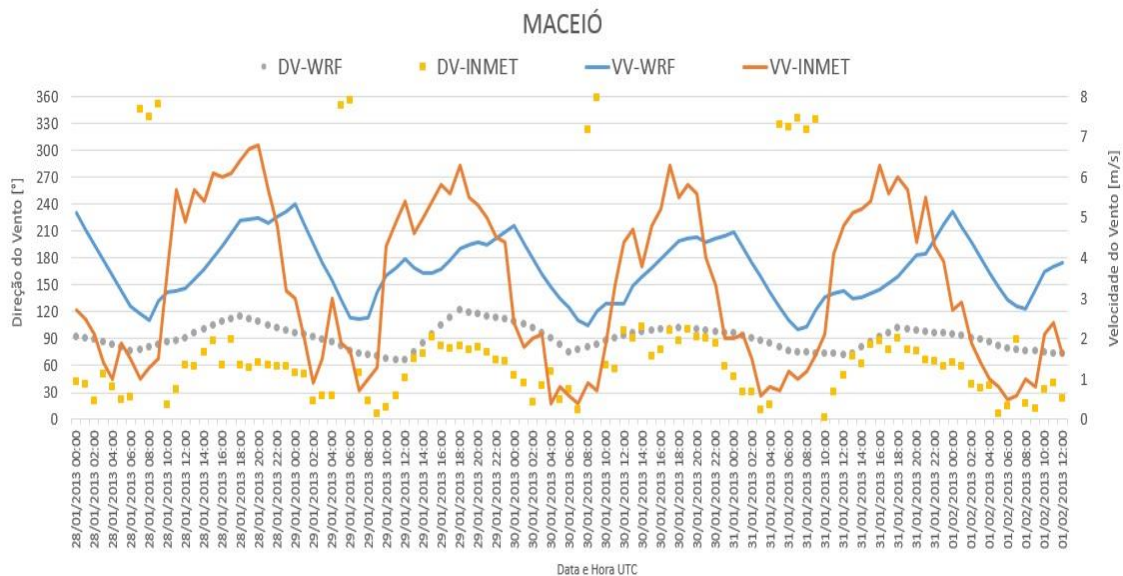
A velocidade e direção do vento é fator que mais interfere na propagação e intensidade de um incêndio, assim como é o principal responsável pela dispersão dos poluentes emitidos durante a queima. Durante o período de estudo, os dados das estações para Maceió, Coruripe e Arapiraca (Figura 4.11a, 4.12b, 4.12c, respectivamente) se mostraram com ventos dentro da normal climatológica do INMET para período para as Regiões (em média 3,5 m/s) e direção de Nordeste e Leste, conforme o passar dos dias.

As velocidades do vento nas 3 localidades estão influenciadas diretamente pela localização das estações. De acordo com os dados das figuras 4.11 e 4.12, são observados os valores máximos de velocidade do vento em Arapiraca, localizado no agreste do estado, onde a estação está localizada em uma altitude maior, e conseqüentemente menores velocidades foram observadas no litoral, onde as estações estão relativamente mais próximas do nível médio do mar. Esta influência da altitude de medição na velocidade horizontal é confirmada por Dutra (2001), que diz que as camadas mais baixas de ar tendem a sofrer maiores efeitos de atrito que

as superiores, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura. Para o caso de Coruripe, de acordo com informações específicas referente a localização, foi descoberto que estação está localizada dentro da Usina Coruripe, sofrendo influência nos dados de materiais e equipamentos do local.

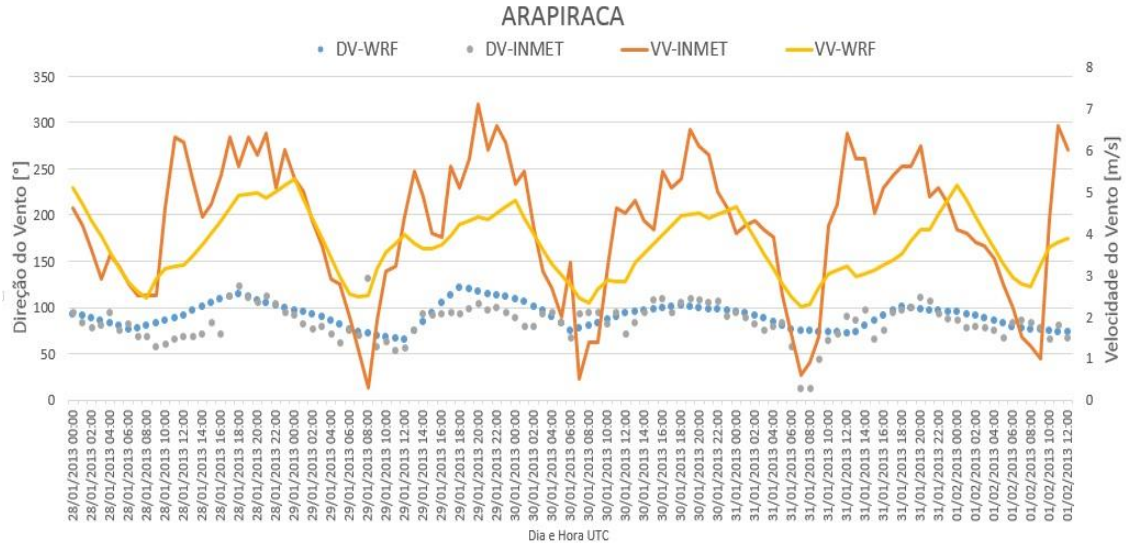
Devido então ao fator localização e somado ao fato do modelo trabalhar em função de uma área (grade do modelo) em comparação a estação de monitoramento de dados de velocidade e direção do vento, para uma análise estatística foi observado coeficientes de correlação fraco para as cidades localizadas no litoral e moderado para Arapiraca.

Figura 4.11 – Dados de direção (°) e velocidade (°C) do vento, obtidos das estações INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para o município de (A) Maceió.

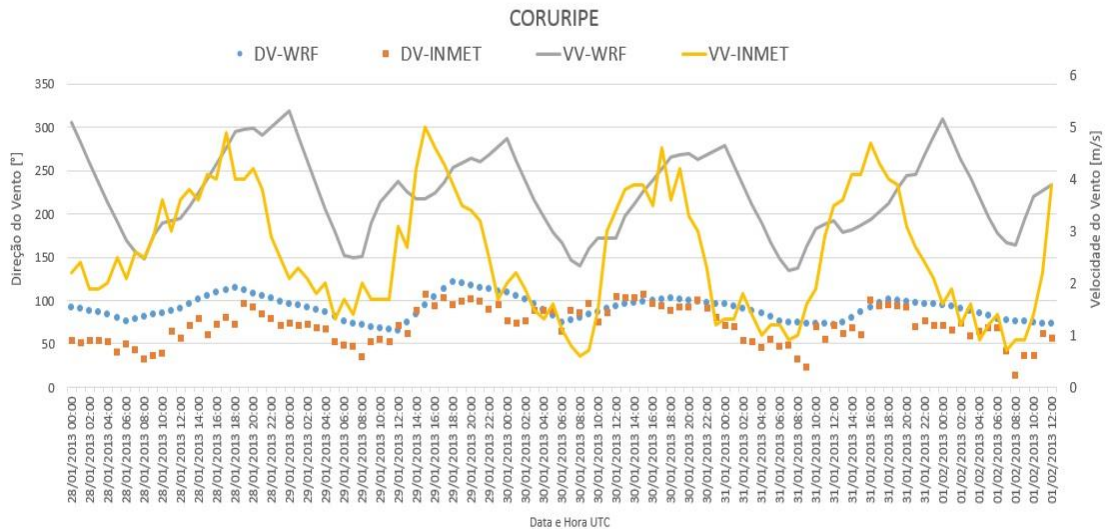


(A)

Figura 4.12 – Dados de direção (°) e velocidade (°C) do vento, obtidos das estações INMET das 00 UTC do dia 28 de janeiro às 12 UTC dia 01 de fevereiro de 2013, para os municípios de (B) Arapiraca e (C) Coruripe.



(B)



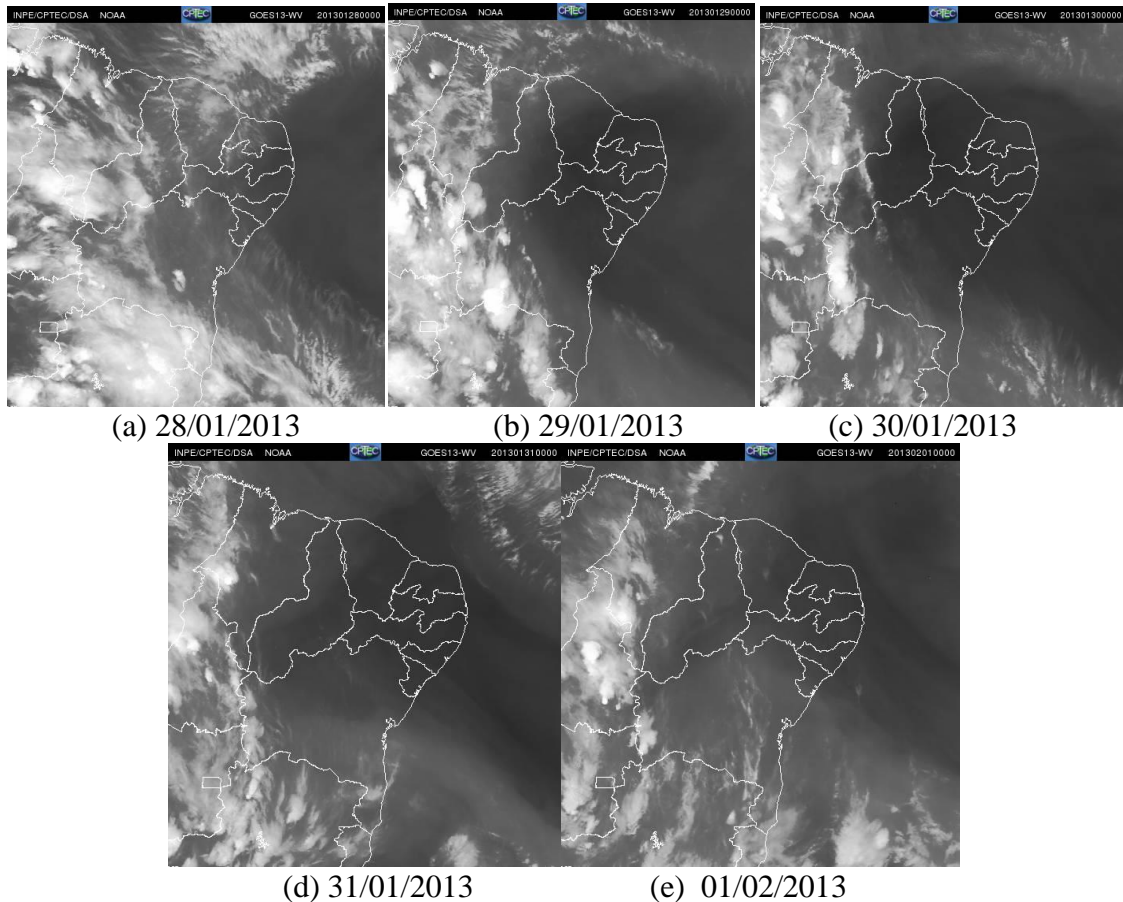
(C)

4.2.1 Análise Sinótica

No período escolhido para a análise neste estudo, do dia 28 de janeiro a 1 de fevereiro de 2013, é observado um padrão estável na atmosfera sobre o Estado de Alagoas. Essa configuração já era esperada, visto que as queimadas promovidas nos canaviais no Estado são realizadas no período de ausência de chuvas. Na Figura 4.13, imagens do satélite GOES-13 no canal do vapor, observa-se a ausência de nebulosidade sobre o Estado de Alagoas, todavia existe

uma intensa nebulosidade aos arredores do Estado, entre a região Noroeste de Alagoas, Sul da Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo.

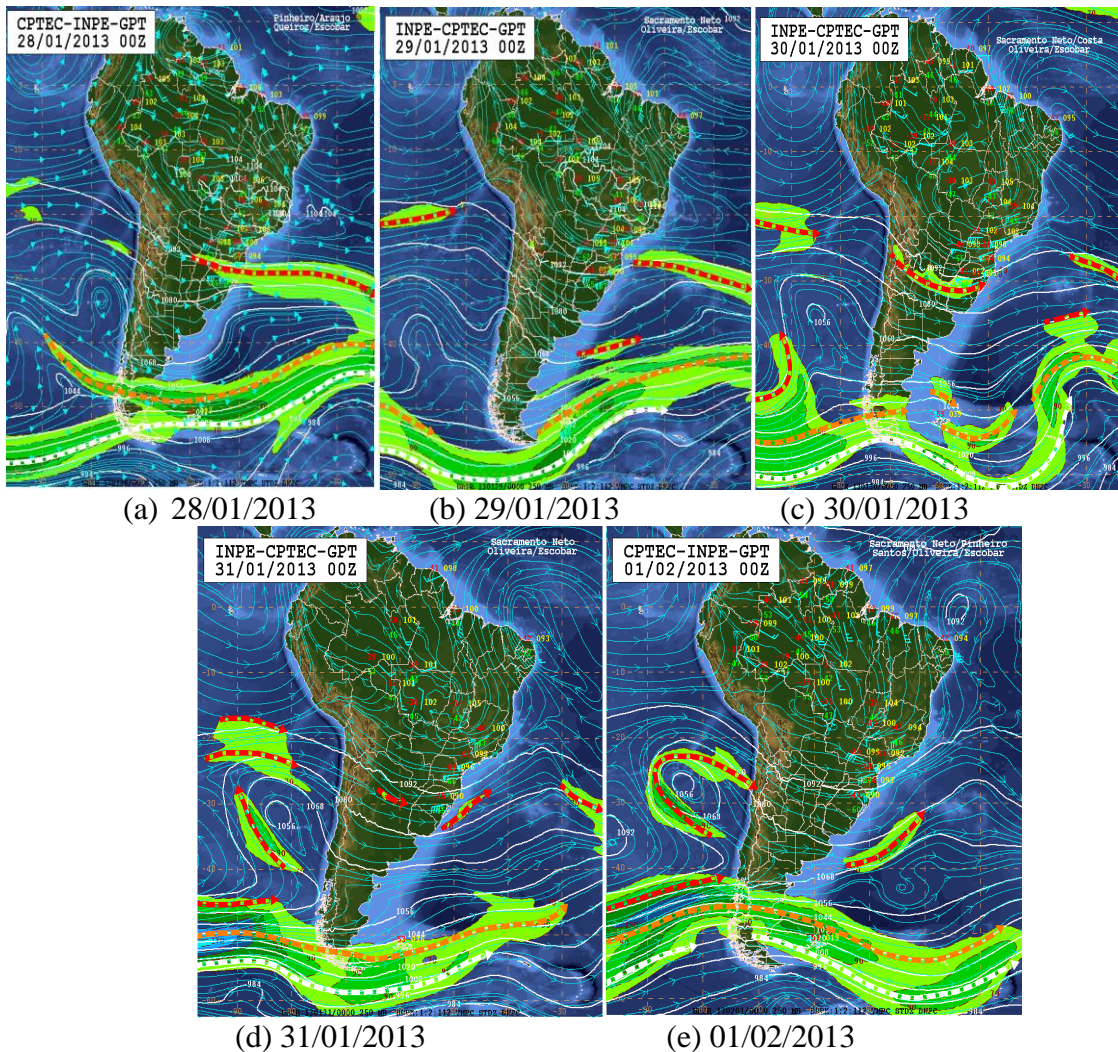
Figura 4.13 - Imagens do satélite GOES-13 no canal vapor d'água para às para 00Z dos dias (a) 28/01/2013, (b) 29/01/2013, (c) 30/01/2013, (d) 31/01/2013 e (e) 01/02/2013.



Fonte: adaptado CPTEC/INPE.

Em geral, ao observar das cartas sinóticas de 250 hPa de 00Z para os mesmos dias (Figura 4.14), percebe-se que essa nebulosidade nos Estados em volta de Alagoas está associada a um cavado atuando em altos níveis que mantém o padrão sinótico associado à presença da Zona de Convergência da América do Sul (ZCAS) em superfície, justificando assim a nebulosidade sobre o Sudeste e Sul da Bahia influenciando na nebulosidade precipitante da região norte do Brasil. Porém esse sistema não atua no Estado de Alagoas.

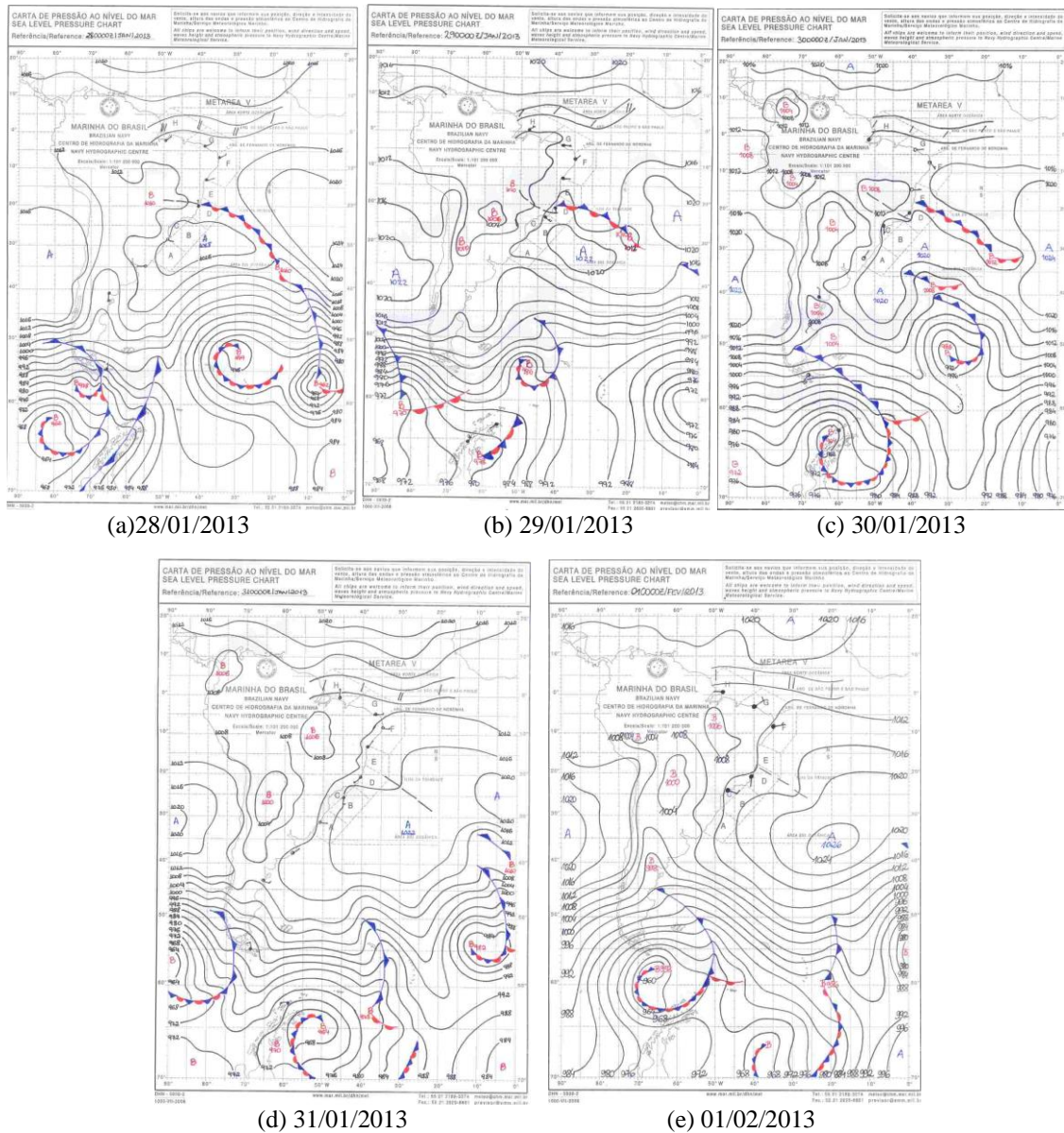
Figura 4.14 - Carta Sinótica do nível de 250hPa para às para 00Z dos dias (a) 28/01/2013, (b) 29/01/2013, (c) 30/01/2013, (d) 31/01/2013 e (e) 01/02/2013.



Fonte: CPTEC/INPE.

Em superfície, de acordo com as cartas de pressão ao nível do mar da Marinha do Brasil, na Figura 4.15 (nos dias 28, 29 e 30 de janeiro, a, b e c, respectivamente), pode ser observar a crista de um anticiclone, próximo ao NEB, com seu centro fora da imagem, este sistema dá suporte a ZCAS em superfície que atua no Sudeste do Brasil e Sul da Bahia. Esse padrão de crista justifica a pouca atividade do vento e a direção do vento de Nordeste e Leste próximo a superfície, como é mostrado na Figura 4.10. A partir, do dia 31 de janeiro (Figura 4.15d e 4.15e), a costa do NEB, passa a ser influenciada pela crista do anticiclone pós-frontal (Alta Subtropical do Atlântico Sul), que não altera significativamente em mudanças na direção e velocidade do vento sobre o Estado de Alagoas, conforme observado nos dados da Figura 4.11 e 4.12.

Figura 4.15 - Carta de pressão ao Nível do Mar para 00 UTC dos dias (a) 28/01/2013, (b) 29/01/2013, (c) 30/01/2013, (d) 31/01/2013 e (e) 01/02/2013.



Fonte: Diretoria de Hidrologia e Navegação – DHN

4.3.3 Monóxido de Carbono (CO)

Foi feita uma simulação previa para o dia 27, que serviu de concentração de fundo para o dia 28. Onde foram registrados 51 focos para esse dia 27, (figura 3.10).

A Figura 4.16, mostra a dispersão do CO relacionado a intensidade do vento horizontal. De acordo com a localização dos focos foram separadas por regiões de análise, sendo: A ao norte, B ao sul e C região central do Estado e os pontos mais distante atingido pela pluma em (D)

entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco (E) entre o Sertão de Alagoas e Bahia e (F) no Estado de Sergipe.

Na região A, que engloba o município de Maceió parte do norte do Estado, com base na figura 4.16a, há grande quantidade de focos e, conseqüentemente, é observada alta concentração de CO (3000 ppbv) associado ao foco próximo localizado a NE. Devido a direção do vento de NE os poluentes emitidos seguem a sua direção, justificando a concentração presente sobre a cidade de Maceió, com poluentes originados do foco presente em São Luiz do Quitunde (figura 3.10), que dista cerca de 50 km. O modelo registrou para essa localidade uma intensidade do vento sobre a superfície entre 4-5 m/s (2,7 m/s pela estação do INMET) e mais próximo à costa entre 7-8 m/s. Isso gerou um rápido deslocamento da pluma quando emitida e/ou concentrada próxima ao litoral, porém, quanto mais se adentrava no o continente mais altos era os valores presente de CO na atmosfera, na ordem de 2500 ppbv.

Na região B, região do município de Coruripe e Penedo ao Sul do Estado, principal região canavieira de Alagoas, foram observados 12 focos de queimadas, o que justificou a alta concentração de CO (figura 3.10a). A pluma do gás emitido nessa região associado ao vento de Nordeste, alcança o Estado de Sergipe, (em concentração de 1000-500 ppbv) ultrapassando uma distância maior que 200 km dos pontos de emissão.

No ponto C, região de Arapiraca, é observado um grande área com a presença de CO. Isso foi possível devido à pouca reatividade do CO e ao número de fontes emissoras do poluente que permitiu concentrar na atmosfera, associado a intensidade do vento que carrega os poluentes próximos ao ponto A para o C. Uma explicação para esse fato seria com relação a acumulação do CO, que foi disperso de focos do ponto A, devido à maior velocidade do vento próximo ao litoral (7-8 m/s) e estagnado no ponto B com menor velocidade (registrado pelo modelo 5-6 m/s de Leste; pela estação do INMET em Arapiraca 4,6 m/s de Leste). No ponto D, é o ponto mais distante que a pluma alcança na hora de análise 00Z (21:00h). Mesmo com a baixa velocidade do vento a massa de ar ao adentrar no continente, transporta o gás traço que é pouco reativo para maiores distancias, cerca de 200 km, embora sendo em baixas concentrações (500 ppbv), alcançando o máximo no ponto a oeste do Estado de Alagoas, chegando até os Estados da Bahia e Pernambuco.

Ao analisar a última hora de rodada do dia 28 (Figura 4.16b), quadro C, o período em que teoricamente já teria terminado a fase de chamas, ou seja, as queimadas já estariam na sua fase de brasas, visto que o fogo é intenso, porém dura pouco tempo, dependendo do tamanho do

talhão, e cessa após a queima total da palha seca (Zancul, 1998). É possível notar na figura 4.16b concentrações mais altas, em termos gerais, em comparação ao mostrado na figura 4.16a, período este que representaria a fase de chamas. Ainda, há uma pequena mudança no padrão do vento, pois no litoral apresenta direção predominante de nordeste, porém no continente o padrão do vento assume um escoamento zonal, de leste. Tanto o modelo quanto à estação do INMET para este período, para a região C (Arapiraca) registraram essa mudança na direção do Vento (figura 4.12B).

Ainda com base na figura 4.16b, o quadro A, mostra que as dispersões dos poluentes estão bastante influenciadas pela direção e velocidade do vento vindos do Oceano Atlântico, de direção NE e velocidade do vento 7-8 m/s. Com isso, as emissões da circunvizinhas a cidade de Maceió (precisamente a NE, N e W da cidade), estão muito mais deslocadas para as vizinhanças do que propriamente sobre a cidade, mas observa-se um pequeno ponto com concentração entre 1.500 e 2.000 ppbv. Porém, são observadas concentrações maiores em cidades vizinhas à Sudoeste de Maceió (entre 2.500 – 3.000 ppbv). No quadro C, vemos uma grande área com presença demasiadamente grande do poluente, associado a vários focos espalhados na região de Arapiraca. Possivelmente os incêndios nesta região entraram na fase de brasas, onde é emitido grande quantidade de CO e baixa velocidade do vento, acumulando o referido poluente na região. Ainda no quadro B pode-se notar um ponto com maior concentração, com valor de 4.000 ppbv (valor de concentração máxima igual ao observado nas simulações para emissões noturnas de cana-de-açúcar em Vedrasco, 2006), na cidade de Penedo, ao sul do Estado de Alagoas, fato este ligado a grande quantidade de focos de queimadas na região mencionada, ver figura 3.10, onde a direção predominante do vento faz com que os transportes de poluentes ocasionem altas concentrações nesta região. Para cidades entre a fronteira de Alagoas e Sergipe são observadas altas concentrações que afetam drasticamente a qualidade do ar. O ponto E da figura 4.16b observa-se que a distância percorrida pelo poluente ultrapassou os limites da figura em questão, chegando provavelmente no Estado da Bahia em pequenas concentrações (100 a 500 ppbv), distância essa que ultrapassa 300 km de distância.

Na região A, ao norte do Estado na figura 4.16c, as emissões estão sob influência de um vento de nordeste, onde próximo ao litoral tem uma velocidade média de 7-8 m/s, fazendo com que o CO rapidamente seja transportado assim que emitido. Ao analisar as concentrações na parte continental, pode-se observar que próximo a 9° S e 36 W, os ventos, assim como as concentrações fazem um "contorno", com uma situação de próxima a calmaria, este fato

possivelmente está associado a chamada serra da Borborema, na divisa entre Alagoas e Pernambuco. Para tanto, devido a velocidade do vento para o período de início das queimadas, não é observado áreas com grandes concentrações afastadas da fonte de emissão.

Já na região B, ao sul do Estado, é observado basicamente o mesmo padrão dos demais pontos, todavia, são encontrados mais focos aglomerados nesse ponto, mais precisamente no município de Penedo (Figura 3.10b). Os poluentes emitidos ao sul do Estado, ao seguirem o padrão do vento continental (de Leste, tanto para o modelo quanto para a medição da estação do INMET no município de Arapiraca), na região do Agreste até o Sertão, ocorre a soma das concentrações dos pontos A e B, que estão baixas (entre 100 – 500 ppbv), associado a pouca reatividade e ao tempo de permanência do monóxido de carbono na atmosfera, faz com que seu transporte resulte além dos limites do Estado, sendo detectado concentrações no sertão pernambucano (Ponto D, entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco), com mais de 300 km de distância percorrida.

Para às 12Z do mesmo dia (Figura 4.16d), foi observado, assim como no dia anterior, alteração na atividade do vento, basicamente em todo o Estado velocidade de 5-6 m/s (As estações de Maceió, Arapiraca e Coruripe, registraram: 5,6; 4,4; e 3,1 m/s, respectivamente). No quadro A, durante o período de brasas dos incêndios, a pluma emitida ao norte percorre uma distância cerca de 100 km, do município de Porto Calvo (-9,1° S e -35,5° W) até região próxima à capital alagoana (Maceió, -9,5°S e -35° W), apresentando uma concentração de até 2.000 ppbv na região.

Para a Região B, pode-se destacar os focos presentes nas cidades de Arapiraca e Penedo. O primeiro localizado em 10°S e 36,5W, apresenta dois focos que contribuem para a dispersão do CO associado a vento oriundos de Nordeste que alcança o Estado do Sergipe. Os focos localizados no extremo Sul do Estado, na cidade de Penedo, é o principal contribuinte para o aumento da concentração no Ponto F, que está a mais 200 km dos focos em Penedo. Em cidades mais próximas à Penedo no Estado de Sergipe (visto que, a mesma é fronteira com o Estado vizinho), foram observadas altas concentrações a pelo menos 50 km dos focos de Penedos, entre 1.500-2.000 ppbv.

Na Figura 4.16e, pode-se observar pouca atividade do vento sobre o território de Alagoas, principalmente na região litorânea área onde está presente a maior parte dos canaviais no Estado. Esse padrão de ventos fracos sobre o continente possivelmente poderia estar ligado ao fenômeno de brisa, que durante o resfriamento radiativo no período noturno, faz com que os

ventos próximos ao litoral soprem no sentido continente-oceano. Essa configuração faz com que a dispersão de CO ocorra de maneira lenta e mantenha altas concentrações nas proximidades das fontes, como observado nos focos ao norte do Estado (quadro A da figura 4.14), próximo ao norte da cidade de Maceió, bem como nas queimadas próximas a Coruripe (10° S e $36,4^{\circ}$ W), quadro B (Figura 3.10c). Nessa última são observadas concentrações de 4000 ppbv devido à pequena velocidade do vento. Ao observar o deslocamento da pluma até o Ponto D, novamente, mesmo com a baixa atividade do vento às 05Z a pluma se desloca novamente para o sertão alagoano, sendo possível observar um padrão de circulação diário, bem como uma característica de dispersão, do litoral ao interior do Estado.

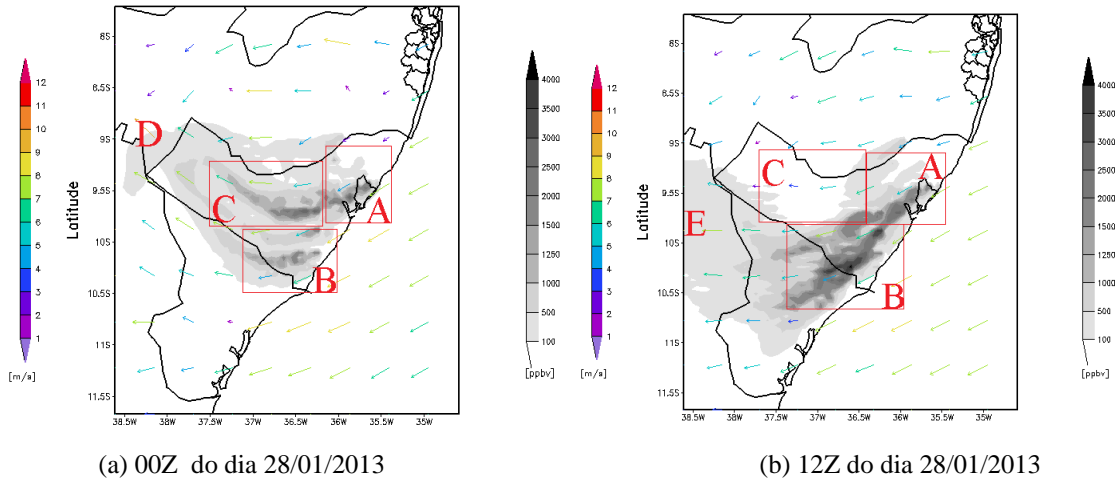
Já no período de brasas (Figura 4.16f), os ventos adquirem uma maior de velocidade sobre o continente (entre 5-6 m/s), passando a soprar de leste. Nas estações do INMET foram registradas velocidades do vento às 12Z para Maceió de aproximadamente 4,4 m/s, Arapiraca de 4,4 m/s e Coruripe de 3,4 m/s, com direção de Leste, assim como na medição das estação (figura 4.11A, e 4.12B e C). No quadro A se observa a concentração do CO (100-500 ppbv) em uma grande extensão territorial, possivelmente devido ao encontro de plumas de focos diferentes e sua pouca reatividade na atmosfera. No quadro B, se observa que as emissões do foco localizado próximo a Coruripe (10° S e $36,4^{\circ}$ W) se dispersaram, mesmo com concentrações altas próximas aos focos de queimadas (4000 ppbv), e em pontos que estão mais distantes dos focos de queimadas (10° S; $36,6^{\circ}$ W), à aproximadamente 50 km da fonte.

Fazendo uma comparação entre as figuras 3.10d e 4.16g, é possível observar focos isolados no sertão alagoano, conforme informações do IBGE referente a produção agrícola municipal de 2010 (Figura 3.3), essa região possui áreas com produção de cana. A presença deste foco no Sertão do Estado, o que poderia justificar para esse caso concentrações transportadas até o sertão pernambucano, cerca de 150 km do foco de emissão (Ponto D). Novamente o padrão de ventos se repetem fracos durante a madrugada como na análise do dia anterior. Por essa razão as concentrações de CO são altas próximo as fontes de emissão. Com base na Figura 3.10d, são observados focos no litoral norte do Estado, afastados um ao outro (Quadro A da figura 4.16g). Sendo que na região B, próximos as coordenadas, 10° e $10,5^{\circ}$ S; 36° e $36,5^{\circ}$ W, focos são próximos um do outro. Isso justificaria a alta concentração na região (3500-4000 ppbv). Esse range de valores estão em conformidade aos encontrado nas medições realizadas por Mariano (2010) com sistema LIDAR em pontos próximos as queimadas, bem como aos valores que a CETESB 1999/98, divulgou como concentrações máxima durante ao período de queimadas.

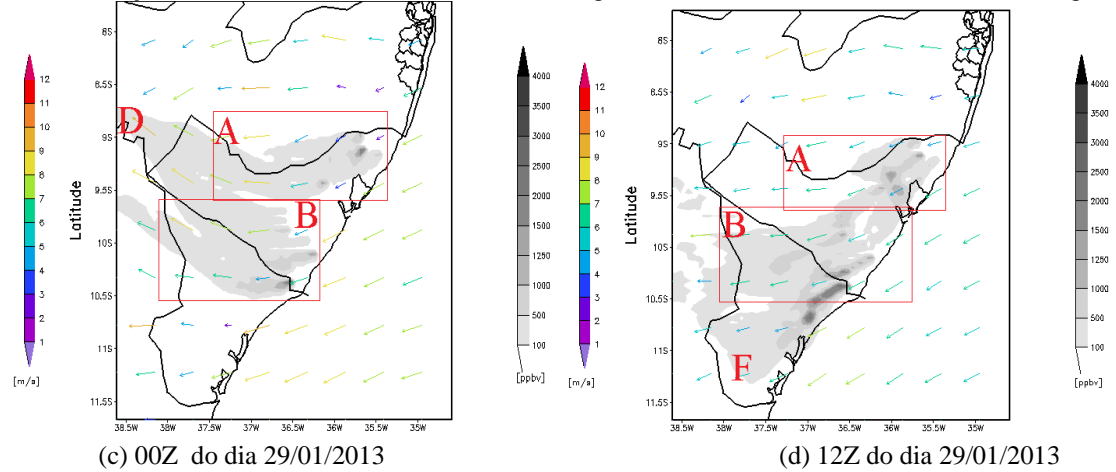
Para às 12Z (9:00 hora local), figura 4.16h, o padrão zonal do vento se faz presente novamente. Nesse horário é observado concentrações em todos os Estados vizinhos de Alagoas (Bahia, Sergipe e Pernambuco). As emissões dos focos na região A (norte do Estado), devido à ventos predominantes de leste, direcionam a dispersão do litoral norte para o agreste alagoano e para cidades localizadas na divisa dos Estados Alagoas e Pernambuco. As emissões dos focos quadro B (região sul do Estado), devido ao vento no litoral de nordeste e dentro do continente de leste, faz com que o poluente CO chegue até o Estado de Sergipe, se deslocando por mais de 150 km do foco original de emissão, na coordenada 10°S; 36,3°W, que ainda, possui alta concentração do CO, com valores de entre 2000-2500 ppbv, durante a fase de brasas. O Ponto D (entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco) o poluente CO está diretamente associado ao foco no Sertão de Alagoas, essa fonte, rapidamente dispersa suas emissões, como é observado na figura 4.14h. As regiões mais áridas, com elevada temperatura e baixa umidade relativa do ar, como é esperado para regiões como sertão alagoano, são as mais susceptíveis à propagação dos focos de incêndio.

No dia 1º de fevereiro as 3Z (00:00 hora local), figura 4.16i, e com base na figura 3.10e, os focos de queimadas se mostraram em maior número apresentam em aglomerados no Estado de Alagoas, principalmente, em Penedo (10,3°S; 36,5°W, extremo sul do Estado) e Anadia (9,7°S; 36,3° W, ao centro do Estado). Já para o litoral Norte (Quadro A), os focos estão próximos, porém, não tanto numerosos quanto nos dois municípios citados. Isto faz com que as emissões de CO de diferentes focos se encontrem, observando concentrações relativamente altas em algumas áreas (2.000-2500 ppbv, sobre a cidade de Maceió, oriundas de focos à NE da cidade), apesar da intensidade do vento sobre o continente estar baixa (2-3 m/s modelo; 2,1 m/s estação, Figura 4.10), para esta região (Quadro A). Ainda, mesmo com a baixa atividade do vento, são registradas concentrações de CO novamente fora do Estado, chegando até o sertão pernambucano. No Quadro B, se observa a grande concentração de CO causada pelos focos no município de Penedo. Mesmo com concentrações de 4000 ppbv sobre a localidades dos focos, essas emissões se deslocam, com concentrações consideráveis (2000-2500 ppbv) para o Estado de Sergipe, associado ao vento próximo ao litoral (com velocidade de 6-7 m/s), demonstrando que, conforme o tamanho da queimada, afetará não só localmente, como também distante da fonte. É possível observar que concentrações oriundas de Penedo chegam até o Estado da Bahia, ultrapassando um deslocamento de 200 km.

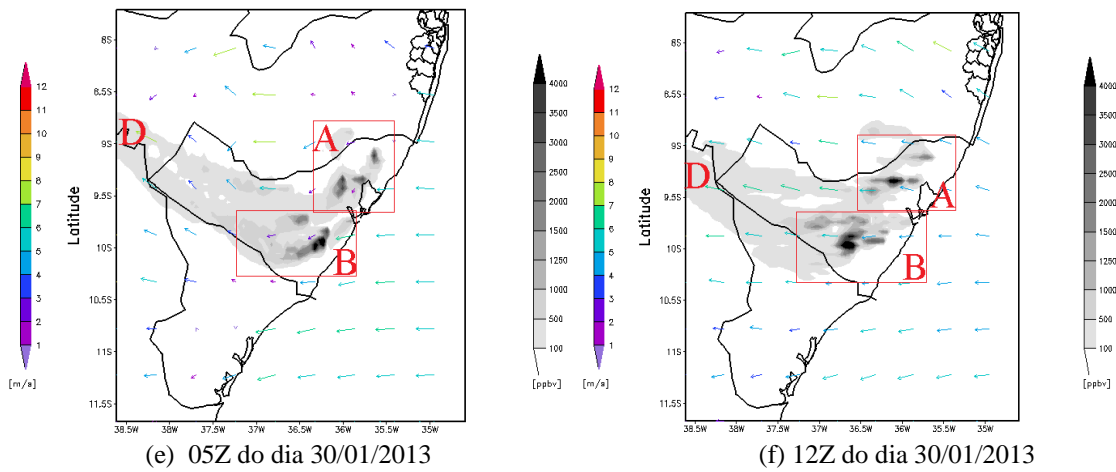
Figura 4.16 - Dispersão e Concentração de Monóxido de carbono do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013 em Alagoas.



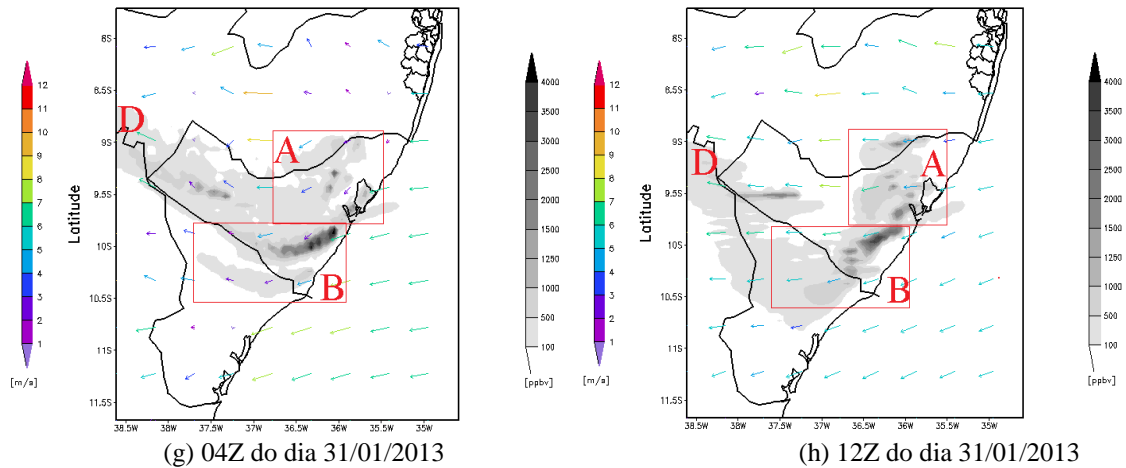
Quadros: (A) norte do Estado (Região de Maceió), (B) Sul do Estado (Região de Coruripe), (C) Região de Arapiraca e Concentração mais afastada (D) entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco (E) entre o Sertão de Alagoas e Bahia.



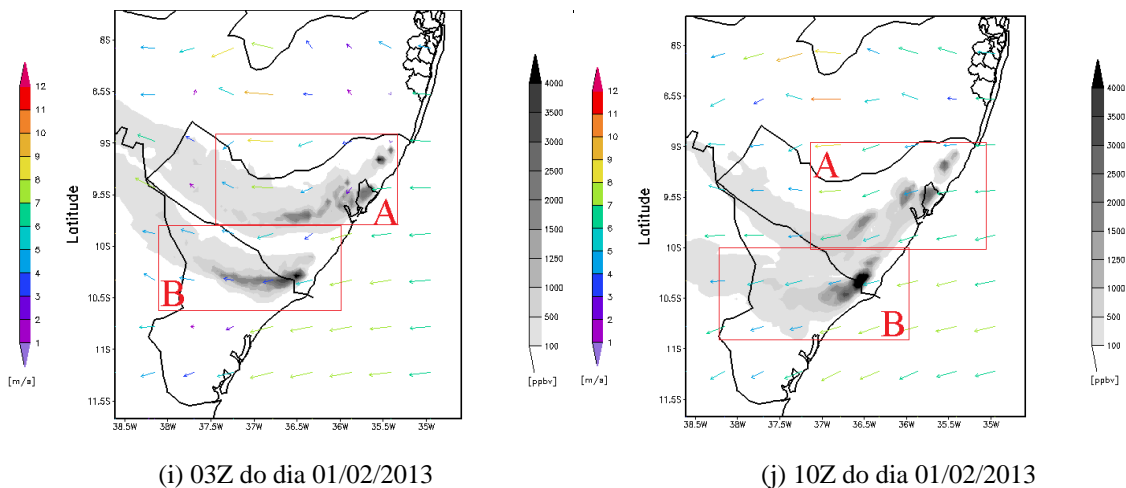
Quadros: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado e Concentração mais afastada (D) entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco (F) no Estado de Sergipe.



Quadros: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado e Concentração mais afastada (D) entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco.



Quadros: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado e Concentração mais afastada (D) entre o Sertão de Alagoas e Pernambuco



Quadros: (A) Norte do Estado e (B) Sul do Estado
Fonte: Autor, (2013).

4.3.4 Material Particulado Fino

Neste tópico será analisado os aerossóis (partículas sólidas) emitidos em queimadas de cana-de-açúcar, considera-se que o material particulado terá padrões diferentes aos gases como no caso do CO, visto que as partículas sólidas emitidas ascendem positivamente devido à alta temperatura das queimadas, e a partir disso seguem a direção do escoamento do ar (advecção) ou se depositam na superfície pela chamada deposição seca, ou seja, pela ação da gravidade. A deposição úmida não terá grande importância tendo em vista que os dias estudados não apresentaram precipitação. Outra consideração importante é em relação ao tamanho do material, pois quanto menor for seu diâmetro, mais fácil e por mais tempo se dará seu transporte horizontal e vertical, bem como sua capacidade de ser inalada.

De acordo com a figura 4.17a, os mesmos 4 regiões serão analisadas com relação a emissão, dispersão e concentração às 00Z (21:00 hora local) do dia 28 de janeiro de 2013. Percebe-se que o $PM_{2,5}$ emitido nos 3 quadros de análise (A na região Norte de Alagoas, B na região Sul e C na região Central), apresentam valores altos muito próximos as fontes de emissão e tem pouca capacidade de dispersão, o que já era esperado para análise de partículas sólidas. Em grande parte, as concentrações estiveram próximas a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e diminuindo conforme se afastavam das fontes de emissões. Já na área D na região Oeste de Alagoas, se observa a dispersão máxima do $PM_{2,5}$, emitido possivelmente pelos focos localizados nas proximidades do quadro B. Esse material foi observado a 150 km da fonte de emissão com concentração de $5 - 7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na última hora de análise do dia 28/01/2013, (figura 4.17b), período em que teoricamente já passou a fase de chamas e as queimadas estão na fase de brasas pois de acordo com Ward et al., (1992), o estágio de brasa é o responsável pela emissão da maior parte do material particulado durante a queimada. O material particulado emitido nessa fase final da queimada segue o sentido da direção do vento de nordeste no litoral, isto faz com que o emitido na queimada, seja disperso horizontalmente devido à maior velocidade dos ventos próximos à costa do Estado. A região B destacada, que engloba a divisa de Alagoas com o Estado de Sergipe, mais especificamente a cidade de Penedo, mostra que existe um foco que atinge concentrações de $PM_{2,5}$ de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Valor abaixo ao encontrado por Matsuda (2009), para média de $PM_{2,5}$ durante o período de queima nas plantações de cana, de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porém idêntico à encontrada em Lara et al. (2005), ambos estudos com medições do poluente. Esse ponto é o responsável pelas concentrações que atingem o Estado vizinho (Região E), que são perceptíveis à uma distância de aproximadamente 200 km da fonte.

Na Figura 4.17c, baixa velocidade do vento baixa ao norte do estado (quadro A). Essa baixa velocidade do vento faz com o material sólido emitido no litoral norte do estado fique concentrado sobre a região, chegando próximo a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No quadro B, a atividade do vento é mais eficiente, fazendo o $PM_{2,5}$ se deslocar cerca de 100km das fontes de emissão. O município de Penedo, no extremo sul do estado, é o principal contribuinte para as emissões no período, devido a quantidade de fontes emissoras. Contudo, sua emissão tem mais influência novamente no estado de Sergipe, em razão da direção do vento (de NE) no período.

No período das 12Z (9:00 hora local), figura 4.17d, com a maior atividade do vento em todo estado, o $PM_{2,5}$ se dispersa conforme a direção (NE) e velocidade do vento (5-6 m/s). No

ponto B, nos focos do município de Penedo a extensão horizontal da dispersão do material sólido fino emitido que chega até Sergipe é superior a 50 km e com concentrações de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No quadro A, ao norte do estado, é verificado que os poluentes não emitidos com a mesma intensidade do extremo sul. Próximo a 9°S e $35,5^\circ \text{W}$ é observado sobre os focos altas concentrações, porém, com o deslocamento do vento essas concentrações vão diminuindo, o qual está associado a velocidade do que espalha o aerossol.

As 2:00 hora local (05Z), do dia 30 de janeiro de 2013 é perceptível altas concentrações de aerossol próximo aos focos de queimada (Figura 4.17e). Esse padrão fica bem formado devido à pouca velocidade do vento (2-3 m/s), que mantém o poluente estagnado, limitando seu transporte. Em ambos quadros (A e B) são vistas concentrações de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre os focos de queimadas.

Para o período final das queimadas, às 12Z (9:00 hora local) do dia 30/01/2013 (Figura 4.17f) é possível notar a mudança na direção do vento, que adquiriu um padrão zonal, bem como houve um aumento em sua velocidade (5-6 m/s), modificando significativamente o destino da pluma e concentração, tendo respectivamente, um deslocamento de leste para oeste, que influencia diretamente na dispersão das concentrações, e com isso, os valores de concentração dos focos é diminuído. No quadro B, coordenada 10°S ; $36,6^\circ\text{W}$, é localizada as maiores concentrações ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

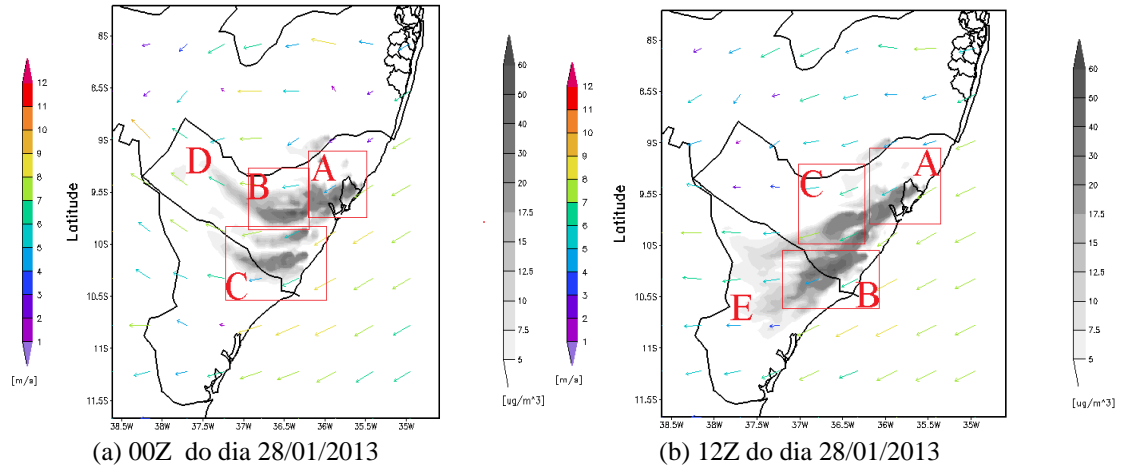
Ao analisar o $\text{PM}_{2,5}$ às 04Z (1:00 hora local), é visto que mesmo em focos de emissões de queimadas isolados, as concentrações não atingem valores tão significativos ($30\text{-}40\mu\text{g}/\text{m}^3$) quando se considera focos próximos um do outro (figura 4.15g). No quadro A, os focos ao norte do estado estão isolados um ao outro, portanto caracterizando baixas concentrações próximo a fonte. Já no quadro B, onde há aglomerados de focos em um curto espaço, é possível ver claramente maiores concentrações ($60\mu\text{g}/\text{m}^3$) e assim a união entre plumas de diferentes ocasionando alta concentração estendida numa região de mais de 100 km de extensão.

Às 12Z (9:00 hora local), figura 4.17h, com a maior atividade do vento nota-se que os focos isolados no quadro A praticamente não tem concentrações significativas, o que demonstra a eficiência da atividade do vento na dispersão do $\text{PM}_{2,5}$. No ponto B, observa-se uma grande área entre focos aproximados com alta concentração de material particulado ($40\text{-}50\mu\text{g}/\text{m}^3$), porém com a velocidade do vento mais acentuado no período matutino (6 m/s), a concentração se apresenta menor valor, comprovando novamente a influência do vento na dispersão e concentração do material.

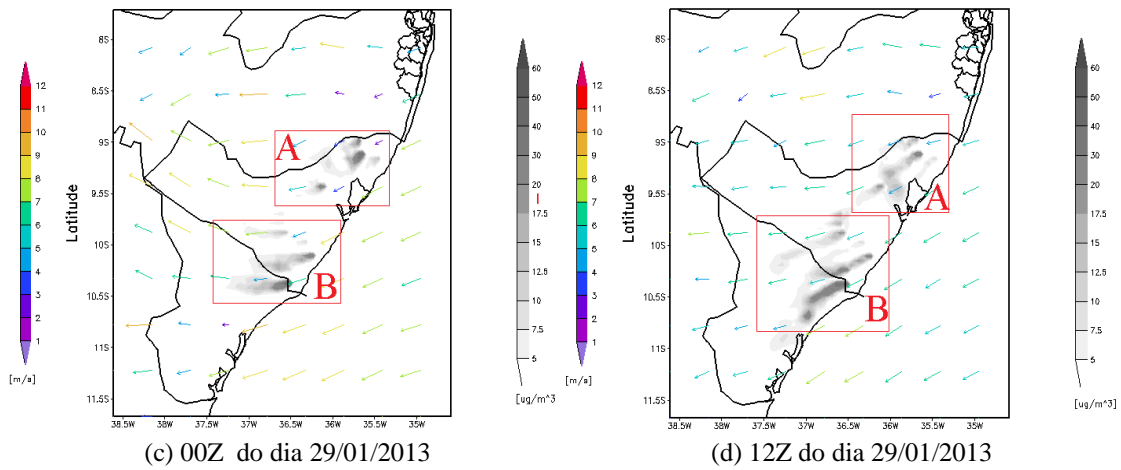
Na Figura 4.17i, no dia 01 de fevereiro as 03Z (meia-noite local), é possível notar dois padrões diferentes nos quadros A e B. No quadro A, nota-se que a pouca atividade do vento (pelo modelo 2-3 m/s; pela estação INMET Coruripe: 1,6 m/s) para o horário, fez com que o material permaneça em altas concentrações próximo aos focos de queimadas, mesmo que os focos não estejam tão próximos quantos no Quadro B (região de Maceió). No quadro A, é visto que a concentração sobre a localidade se faz presente em altas concentrações em consequência da união entre plumas de diferentes localidades (Figura 3.10e). Já mais ao centro, em Anadia (9,7°S; 36,3° W), foi constatado um padrão de maior deslocamento da pluma, a qual está associado à maior número de focos em um pequeno espaço territorial, assim como visto no quadro B. Neste quadro, devido à grande quantidade de focos sobre Penedo e, mesmo com a pouca atividade do vento no horário, é possível observar a pluma do material se dispersar para o estado de Sergipe. Este fato se deve a grande emissão diretamente ligado a quantidade de biomassa queimada e, conseqüentemente, a maior emissão de $PM_{2,5}$ para atmosfera. Assim, é possível observar altas concentrações emitidas até 150 km de distância das fontes.

Para às 10Z (7:00 hora local), figura 4.17j, foi observada as concentrações se deslocando para um sentido à sudeste do seu foco. Isso se deve ao fato da mudança na direção do vento que assumiu uma direção de Nordeste. No quadro A, são observadas concentrações $PM_{2,5}$ emitido em 4 localidades bem definidas, com um padrão de deslocamento da pluma de nordeste. Todavia, é visto o deslocamento dessas localidades em pequenas quantidades, alcanças o litoral sul do estado, próximo ao quadro B. No quadro B, próximo à cidade de Penedo, observa-se que os focos aglomerados em uma mesma localidade, gerou uma extensa pluma de $PM_{2,5}$, com sua concentração, próxima aos focos de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e nos arredores em torno $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, numa distância de quase 100 km dos focos.

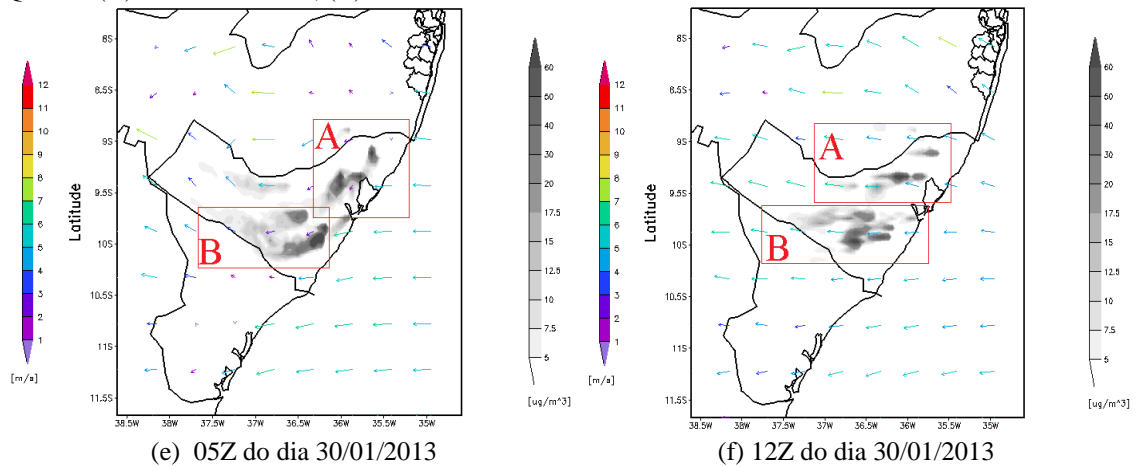
Figura 4.17 - Dispersão e Concentração de Material Particulado Fino do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013 em Alagoas.



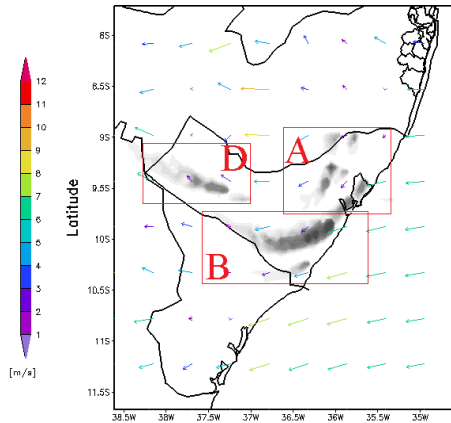
Quadro: (A) Norte do Estado (Região de Maceió), (B) Sul do Estado (Região de Coruripe), (C) Região Central (Arapiraca), (D) Oeste do Estado e (E) no Estado de Sergipe.



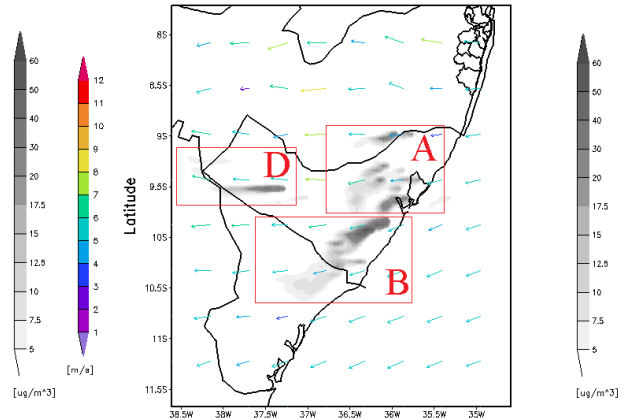
Quadro: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado.



Quadro: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado

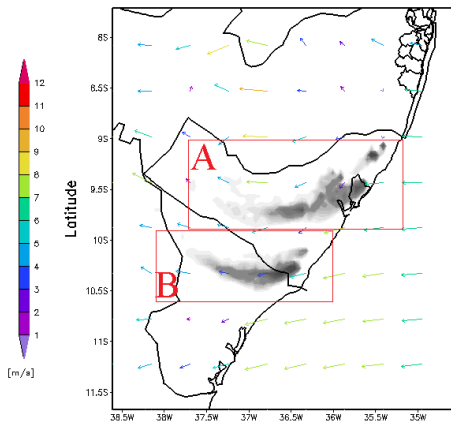


(g) 04Z do dia 31/01/2013

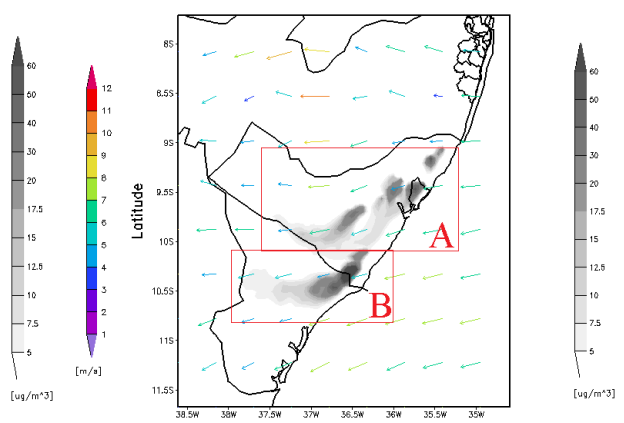


(h) 12Z do dia 31/01/2013

Quadro: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado e (D) Oeste do Estado



(i) 03Z do dia 01/02/2013



(j) 10Z do dia 01/02/2013

Quadro: (A) Norte do Estado, (B) Sul do Estado

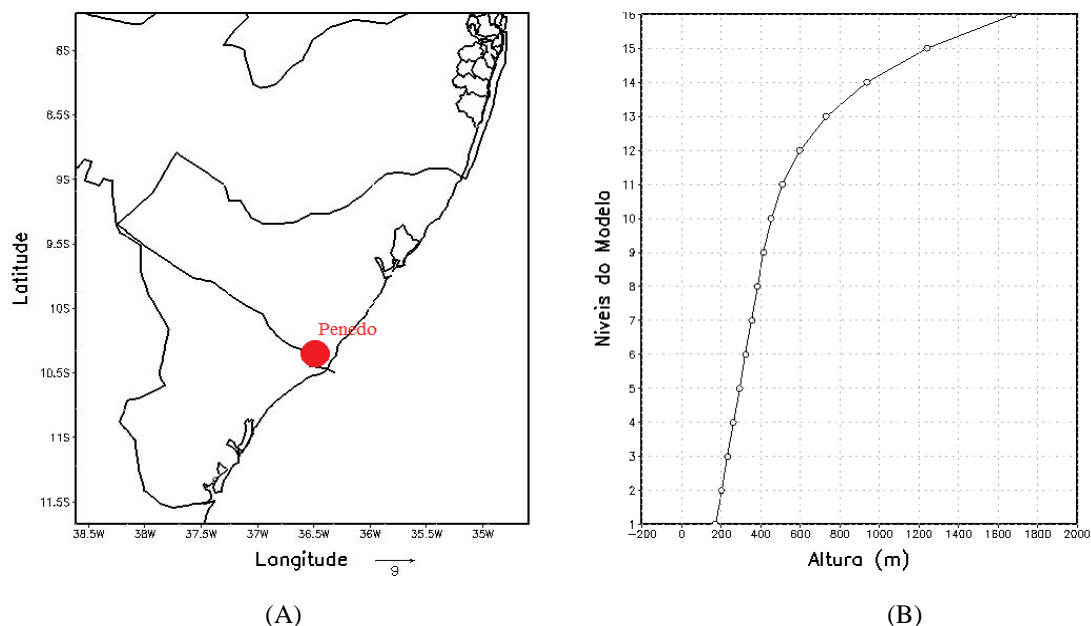
Fonte: Autor, (2013).

4.3.5 Contribuição da Queimada na Convecção “*Plume Rise*”

Nesta seção será realizada uma análise referente a ascensão da pluma no dia 28 de janeiro de 2013 no município de Penedo (Figura 4.18A). A altura da pluma de CO e PM_{2,5} serão analisadas com e sem o mecanismo de ascensão da pluma (*Plume Rise*).

Na figura 4.18 está sendo mostrado a localização do município de Penedo, assim como a altura dos níveis verticais do modelo para efeito de comparação da ascensão da pluma.

Figura 4.18 - (A) localização no Estado de Alagoas do município de Penedo (-10.3S, -36.58W), e (B) Relação entre os níveis do modelo e altura vertical (metros).



Fonte: Autor, 2013

A evolução no tempo de emissão de CO e PM_{2.5} associado com o mecanismo de elevação da pluma é mostrada Figuras 4.19Be 4.20B, já sem o mecanismo, nas 4.19A e 4.20A, respectivamente, para um ponto fixo no modelo que representa o processo em ponto de grade, com queimadas simultâneas no município de Penedo.

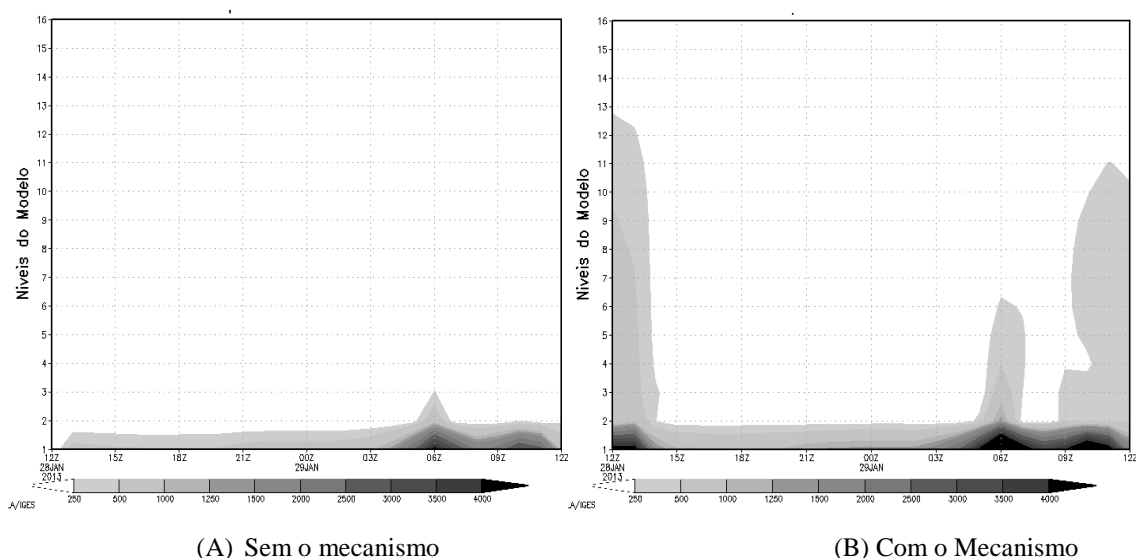
Freitas et al. (2007), realizaram uma comparação dos resultados do modelo com e sem o mecanismo de *plume rise*, ambos para o CO. Foi demonstrado a importância deste mecanismo na simulação de CO ao longo de toda a troposfera, incluindo a CLP. Sem o mecanismo de ascensão da pluma a troposfera livre simulada durante a queimada é muito limpa, enquanto o CO na CLP é superestimado. Esta característica que os autores afirmam não estar de acordo com os dados de sensoriamento remoto observados para região amazônica.

As maiores concentrações se mantiveram próxima a camada superficial, já que durante a noite, a estabilidade atmosférica limita o aumento da pluma em cerca de 100 metros da superfície (Figura 4.19A e 4.20A). Com a evolução da queimada e, conseqüentemente com o início das emissões foi observado o aprisionamento da pluma até 200 metros de altura, obtendo um pequeno aumento as 06:00Z (3:00 hora local), no horário de maior emissão de CO.

A ascensão da pluma de CO com a inclusão do mecanismo “*plume rise*” (Figura 4.19B), foi analisado ao término das emissões do dia anterior (entre 12Z e 15Z 27/01), durante o período de instabilidade atmosférica (causado pelo aquecimento diurno da superfície). Observa-se a

presença de concentração de CO (figura 4.19B) em níveis verticais mais altos em comparação ao uso sem o mecanismo de ascensão. Porém a concentração mantém-se próxima à superfície (200 metros). No início do ciclo das emissões (por volta das 03Z), foi constatado novamente ascensão vertical da pluma de CO para alturas superiores a 300 metros durante o período estável da camada. Com o início do dia e aquecimento da superfície pela radiação e, conseqüentemente, com o aumento da CLP foi possível observar que a pluma de CO ascendeu verticalmente a pelo menos 500 metros de altura.

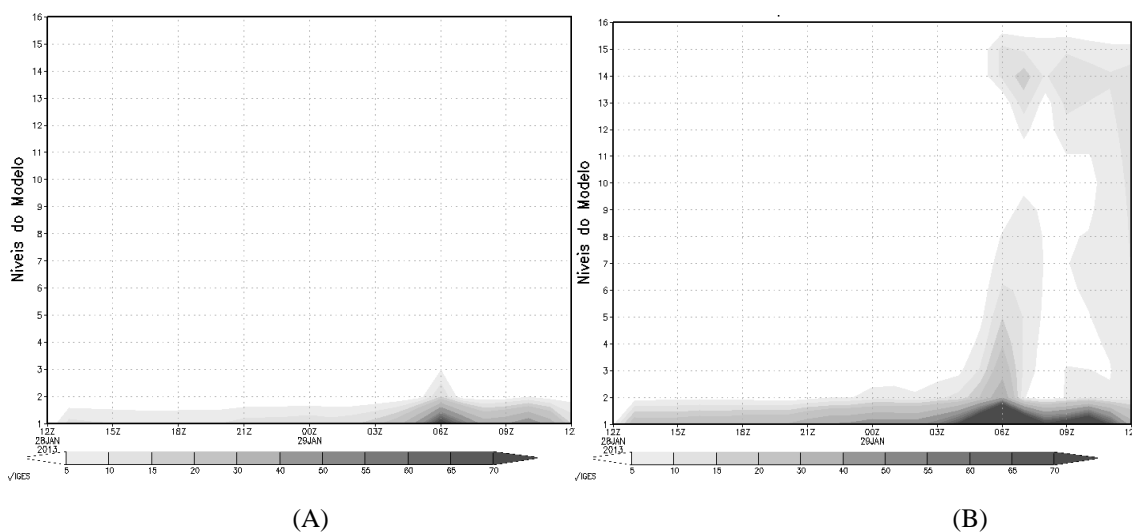
Figura 4.19 – Ascensão da pluma de CO na caixa de grade durante o dia 28 de janeiro de 2013 (A) sem o mecanismo e (B) com o mecanismo.



Fonte: Autor, 2013.

Para o $PM_{2.5}$ (Figura 4.20B) a configuração de ascensão é mais notável. Assim como para o CO sem a ascensão da pluma a distribuição de $PM_{2.5}$ não alcança alturas maiores que 200 metros. Todavia, a ascensão vertical da pluma de $PM_{2.5}$ com a presença do mecanismo de ascensão é possível observar alcance alturas maiores. Durante a noite, a estabilidade atmosférica limita o desenvolvimento da pluma a pouco mais de 200 metros (21Z até 00Z). Com início das emissões e devido ao empuxo positivo a pluma ascende a uma altura de próxima à 1,3 km (06Z). Na parte da manhã o aquecimento superficial provoca a subida da pluma que atinge uma altura de 1,7 km com uma camada de injeção de poluente nesta altura.

Figura 4.20 – Ascensão da pluma de PM_{2,5} na caixa de grade durante o dia 28 de janeiro de 2013 (A) sem o mecanismo e (B) com o mecanismo.



Fonte: Autor, 2013.

Freitas et al. (2007), explicaram que devido ao resfriamento por radiação e o eficiente transporte de calor por convecção, há um rápido decaimento na temperatura das emissões das queimadas. Ainda, com a interação entre a pluma e o ambiente, são produzidos turbilhões que arrastam ar mais frio do ambiente na pluma, o que a dilui e reduz a flutuabilidade. A característica dominante é um fluxo forte para cima, com aumento de temperatura em relação a temperatura do ambiente. A altura final (camada de injeção) da pluma é controlada pela estabilidade termodinâmica do ambiente e a liberação de calor da superfície pelo fogo.

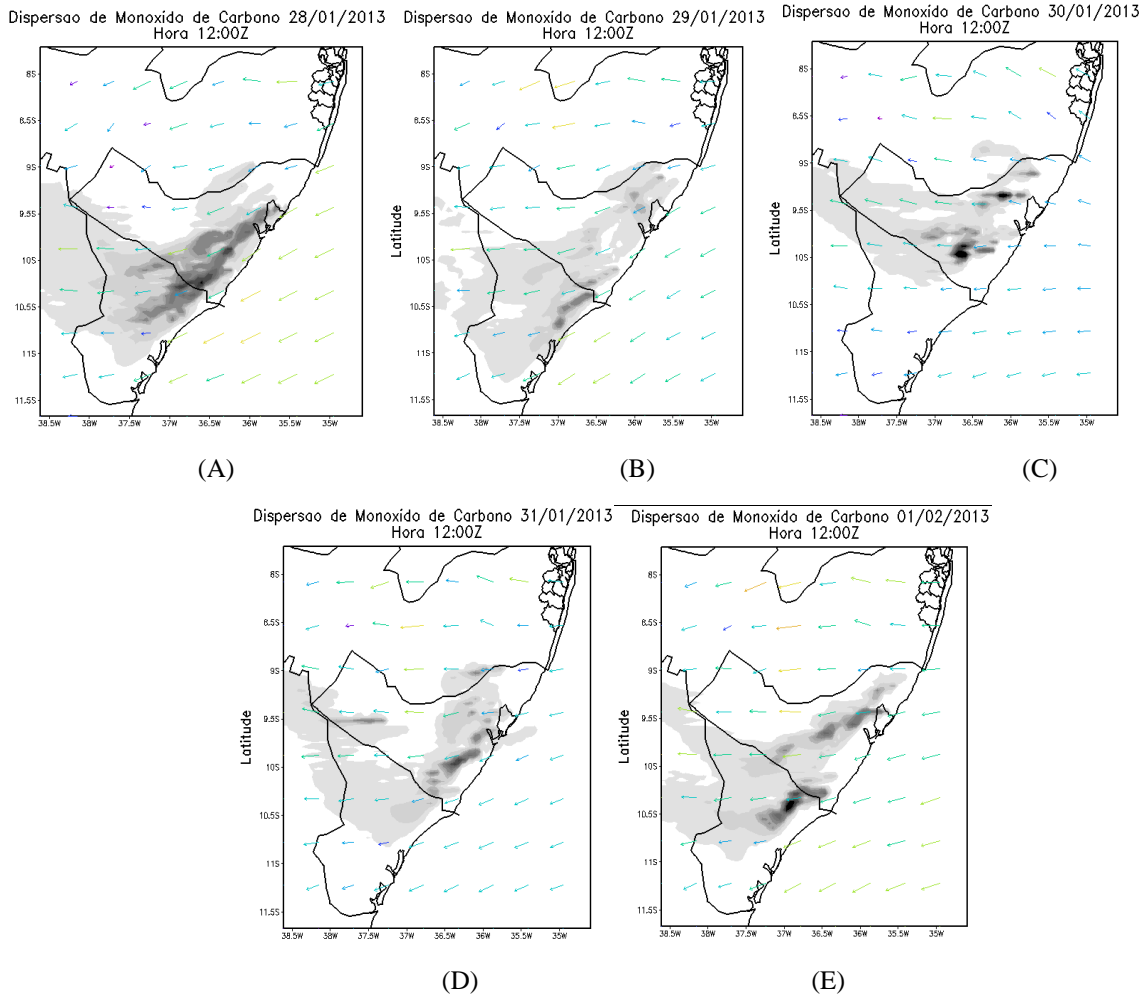
Considerações a respeito das emissões, principalmente referente a resolução espacial (tamanho da área queimada) e variação temporal (período do dia em que está sendo realizado a queima), são as principais variáveis que ditarão a ascensão vertical da pluma, (Val Martin et al., 2012). De acordo com os autores, é difícil realizar uma incorporação avançada do mecanismo de *plume rise* em modelos atmosféricos.

4.3.6 Sensoriamento Remoto

Para uma análise referente ao transporte do gás Monóxido Carbono foi comparado a saída final de cada dia de análise do modelo WRF/CHEM no estado de Alagoas (Figura 4.19), à dados de sondagem do sensor *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)* presente no satélite AQUA, e faz parte da aplicação GIOVANNI (*Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure*) desenvolvida pela GES DISC: (*Goddard Earth Sciences, Data and Information Services Center*) (Figura 4.20).

É possível notar um bom desempenho do modelo para representar o transporte do poluente emitido no estado Alagoas.

Figura 4.21 - Última imagem de saída do modelo para os 5 dias de análise. Do dia 28 de janeiro à 1 de fevereiro, respectivamente.



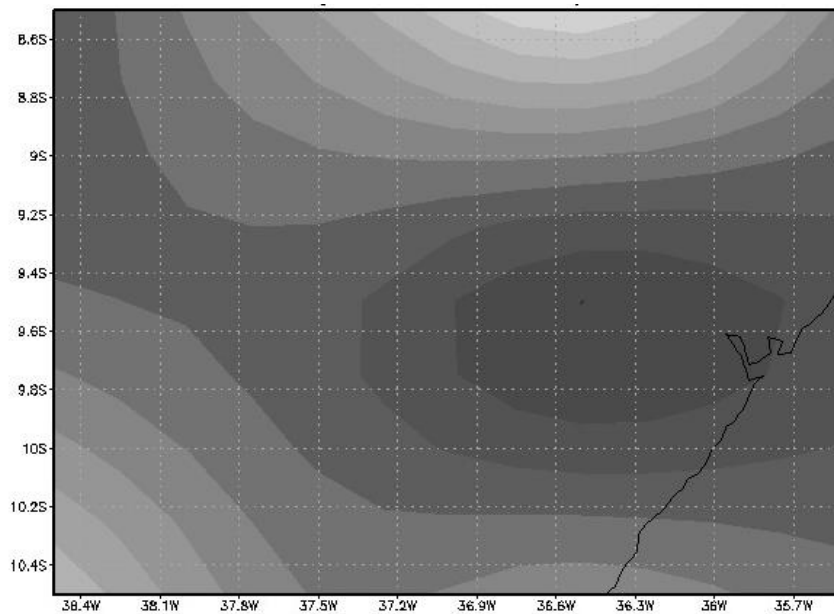
Fonte: Autor (2013).

Observa-se o transporte do CO, se dando no sentido de Nordeste-Oeste (próximo ao litoral) e Leste-Oeste (dentro do continente), nas imagens finais de simulação do dia 28 de janeiro a 1 de fevereiro (Figura 4.21). Fazendo as emissões migrar do litoral de Alagoas para Sertão do estado, Bahia e Sergipe. Associado a variação temporal do padrão da direção e velocidade do vento a 10 metros da superfície.

Na Figura 4.21, mostra um padrão no transporte simulado pelo modelo e as maiores concentrações de CO na parte central do litoral de Alagoas ($9,5^{\circ}$ S; $36,4^{\circ}$ W), devido à maior intensidade do vento na costa sul do Estado, os poluentes emitidos pela queima de biomassa apresentaram esse padrão de dispersão, que fez com que os poluentes emitidos na queimada tivessem maior dispersão na região onde havia maior velocidade do vento. Isso pode ser

comprovado com o total ascendente de CO apenas sobre Alagoas do, obtido com o sensor AIRS, do dia 28 de janeiro a 1 de fevereiro (Figura 4.22). É visto as concentrações conforme a direção do vento predominante, de Nordeste, onde também foram representados pelo modelo e pelos dados observados do INMET, para as estações de Maceió, Coruripe e Arapiraca. Devido à dificuldade de obtenção desse tipo de informações para uma pequena área como o Estado de Alagoas, visto que a obtenção destas informações depende da região exata que o satélite passa pela região, e assim, sendo necessário fazer uma concentração acumulada para todos os dias em questão.

Figura 4.22 - Total ascendente de CO na camada atmosférica do dia 28 de janeiro ao dia 1 de fevereiro de 2013.



Fonte: adaptado NASA; Autor (2013).

CONCLUSÃO

A implementação do Biomass Burning Emission Input, para o tratamento das emissões ocasionadas pela queima da palha de cana-de-açúcar, foi possível realizar o estudo baseado na dispersão e concentração dos poluentes CO e PM_{2,5}, através do modelo WRF/Chem.

Foram encontradas concentrações máximas de 4000 ppbv de CO e 60 µg/m³ de PM_{2,5}. Em estudos bibliográficos mostraram que as concentrações máximas de CO e PM_{2,5} próximas aos focos de queimadas são em torno 3500-4000 ppbv (Mariano, 2010; Vedrasco, 2006; CETESB, 1999) e entre 60-90 µg/m³ (Matsuda, 2009; Lara et al., 2005; CETESB, 1999).

Com a intensidade do vento foi possível observar o transporte destes poluentes por quilômetros de distância do ponto inicial de emissão. Mas também a quantidade de focos próximos um ao outro e a natureza do poluente, gás ou aerossol. O CO, apresentou influência na atmosfera dos estados vizinhos à Alagoas em concentrações entre 100-500 ppbv para um deslocamento superior a 300 km, e para localidades mais próximas, entre 2000-2500 ppbv à pelo menos 100 km da fonte. O modelo se aproximou ao transporte do poluente CO, conforme os dados de qualidade do ar de sondagem atmosférica (AIRS). O gás obteve um deslocamento de acordo com a direção do vento predominante no período, de Nordeste. E, assim sendo observado as maiores concentrações ao Sul do Estado de Alagoas.

Para o PM_{2,5}, considerações diferentes são observadas, devido a sua característica de poluente sólido, seu processo de permanência na atmosfera é mais curto, condicionado ao processo de deposição seca. Foi analisado o transporte de PM_{2,5}, em localidades que havia grande quantidade de focos de queimadas próximos, e assim se deslocando por distância superior à 100 km, numa concentração entre 30-40 µg/m³.

A utilização do *Plume Rise* gerou resultados mais realistas em termo de dispersão vertical, onde o efeito da ascensão da pluma foi considerado nas simulações.

Foi possível observar que as emissões sobre os focos de queimadas realmente apresentam uma ascensão vertical próximo aos focos. Foi observada à altura de injeção de para PM_{2,5}, a cerca de 1,7 km da superfície. Os resultados mostrados nestes estudos entram em acordo com as afirmações de Freitas et al. (2007) para a representação vertical ocasionado pela queima de biomassa.

Contudo, o BBEI demonstrou ser uma ferramenta valiosa para descrever as emissões por queima de biomassa, servindo como fonte de emissão ao modelo WRF/Chem.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, I.J.; HASS, H.; MEMMESHEIMER, M.; EBEL, A.; BINKOWSKI, F.S.; SHANKAR, U. Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications. **Atmospheric Environment** 32 (17), 2981–2999. 1998.
- AKAGI, S. K.; YOKELSON, R. J.; WIEDINMYER, C.; ALVARADO, M. J.; REID, J. S.; KARL, T.; CROUNSE, J. D.; WENBERG, P. O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, **Atmos. Chem. Phys.**, 11, 4039–4072, 2011.
- AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C.; LEAL, B. G., E GONÇALVES SILVA, J. B. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. **Acta Sci. Technol.** Maringá, v. 30, n. 1, 87-91 p. 2008.
- ANDREAE, M. O. Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In. **Global Biomass Burning: Atmospheric, Climate and Biospheric Implications (J. S. Levine, Ed.)**, MIT Press, Cambridge, MA, 3-21 p. 1991.
- ANDREAE, M. O., MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochemical Cycles**, 15, 4, 955–966, 2001.
- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon, **Science**, 303, 1337-1342. 2004.
- ARBEX, M. A.: Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara –SP. **Tese de doutorado em Medicina, Universidade de São Paulo**, 188p. 2001.
- ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F.; SALDIVA, P. H. N. Queima da biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2. 2004.
- ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES CLIMÁTICOS – 1991 A 2010 - **Volume Alagoas. Centro universitário de estudos e pesquisas sobre desastres.** Universidade Federal de Santa Catarina. 51 p. 2011.
- BINKOWSKI, F.S., and SHANKAR, U.: The regional particulate matter model, 1. Model description and preliminary results. **Journal of Geophysical Research** 100, 26191–26209. 1995.
- BLECK, R.; BENJAMIN, S.; LEE, J.; AND MACDONALD, A. E.: On the Use of an Adaptive, Hybrid-Isentropic Vertical Coordinate in Global Atmospheric Modeling, **Mon. Weather Rev.**, 138, 2188-2210, 2010.

BOND, T. C.; STREETS, D. G.; YARBER, K. F.; NELSON, S. M.; WOO, J.-H.; KLIMONT, Z. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, **J. Geophys. Res.**, 109, D14203, doi: 10.1029/2003JD003697, 2004.

BOSSO, A. de A.; e MACHADO, M. L.: Álcool da Cana ou do Milho?. **Revista Ciências do Ambiente**, v. 2, n 1. 2006

BRASIL - CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Dispõe sobre o meio ambiente. Capítulo VI, art. 225. Brasília, DF. 1988 Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legilei.html>>. Acesso em: 17 de Out de 2012.

BRASIL – Resolução CONAMA n.003 de 28 de junho de 1990. Estabelece padrões de qualidade do ar, previstas no PRONAR – **Programa Nacional de Controle de Qualidade do ar. Diário Oficial da União**, Brasília - DF, Seção 1:15937. 22 de agosto de 1990.

BRASSEUR, G., HAUGLUSTAINE, D., WALTERS, S., RASCH, P., MÜLLER, J.-F., GRANIER, C., and TIE, X.: MOZART, a global chemical transport model for ozone and related chemical tracers, 1: Model description, **J. Geophys. Res.**, 103(D21), 28265–28290, 1998

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Departamento de Qualidade Ambiental. **Resumo dos estudos em locais influenciados diretamente pelas queimadas de cana.** São Paulo, CETESB; 1999.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2008.** São Paulo: CETESB; 2009.

CHAPMAN, E. G.; GUSTAFSON JR., W. I.; EASTER, R. C.; BARNARD, J. C.; GHAN, S. J.; PEKOUR, M. S.; FAST, J. D. Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources, **Atmos. Chem. Phys.**, 9, 945-964, doi: 10.5194/acp-9-945-2009, 2009.

CHANG, J.S., BINKOWSKI, F.S., SEAMAN, N.L., MCHENRY, J.N., SAMSON, P.J., STOCKWELL, W.R., WALCEK, C.J., MADRONICH, S., MIDDLETON, P.B., PLEIM, J.E., LANSFORD, H.H.: The regional acid deposition model and engineering model. **State-of-Science/Technology, Report 4**, National Acid Precipitation Assessment Program, Washington, DC. 1989.

CHATFIELD, R., VASTANO, J., SINGH, H., AND SACHSE, G.: A general model of how fire emissions and chemistry produce African/oceanic plumes (O₃, CO, PAN, smoke), **J. Geophys. Res.**, 101, D19, 24279–24306, 1996.

CHATFIELD, R., GUO, Z., SACHSE, G., BLAKE, D., and BLAKE, N.: The subtropical global plume in the Pacific Exploratory Mission Tropics A (PEM-Tropics A), PEM-Tropics B, and the Global Atmospheric Sampling Program (GASP): How tropical emissions affect the remote Pacific, **J. Geophys. Res.**, 107(D16), doi:10.1029/2001JD000497, 2002.

CHEN, F., K.; MITCHELL, J.; SCHAAKE, Y.; XUE, H.; PAN, V.; KOREN, Y.; DUAN, M. EK, AND BETTS, A.: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. **J. Geophys. Res.**, 101, 7251-7268, 1996.

CHIN, M., ROOD, R., LIN, S.-J., MULLER, J.-F., and THOMPSON, A.: Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties, **J. Geophys. Res.**, 105(D20), 24671–24688, doi: 10.1029/2000JD900384, 2000.

CHOU, M. D., SUAREZ, M. J., HO, C. H., YAN, M. M. H., AND LEE, K. T.: Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models, **J. Clim.**, 11, 202–214, 1998

CORREIA, M. D.; E SOVIERZOSKI, H. H. Situação atual do ecossistema Manguezal da costa do Estado de Alagoas, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, n. 2, (Manguezais do Brasil). 2010.

COSTA, R. S. Avaliação do desempenho do modelo de mesoescala MM5 na simulação de eventos de precipitação extrema no Estado de Alagoas. **Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 153 p. 2006.

CRUTZEN, P. J. AND ANDREAE, M. O.: Biomass burning in the tropics: Impact on Atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, **Science**, 250, 1669–1678, 1990.

DOCKERY, D. W., AND POPE III, C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. **Annu. Rev. Public. Health**, v.15, 107-32 p. 1994.

ELETROBRÁS. INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS. – UFAL. Estado de Alagoas: atlas eólico. cap. 1, 1-12 p. 2008. Disponível em: <http://www.desenvolvimentoeconomico.al.gov.br/minaseenergia/mapaeolico/ATLAS_EOLICO_AL_cap01.pdf/view>. Acesso em: 14 jan. 2013.

ELSON, D. Atmospheric pollution: causes, effects and control policies. Oxford, **Basil Blackwell Limited**. 93-157 p. 1987.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos/Carlos Cesar Ronquim. **Documentos** 77. ISSN 0103-78110, Embrapa Monitoramento. Campinas - SP, dezembro de 2010

FAST, J. D.; GUSTAFSON, W. I. JR.; EASTER, R. C.; ZAVERI, R. A.; BARNARD, J. C.; CHAPMAN, E. G.; GRELL, G. A., AND PECKHAM, S. E. Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model, **J. Geophys. Res.**, 111, d21305. 2006.

FERREIRA, R. V. Geomorfologia da região de Japaratinga, AL. **Dissertação de Mestrado em Geociências - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, 86 p. 1999.

FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; ROMÃO, R.; LA SCALA JR, N. Research Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil, **Carbon Balance and Management**, 5:3, 7p. 2010.

FOTOGRAFIAS AÉREAS. Plantação de Cana de Açúcar (Canavial), Barra do Camaragibe, Alagoas. Disponível em: <<http://www.fotografiasaereas.com.br/banco-de-imagens/agronegocios/plantacao-de-cana-de-acucar-canavial-barra-do-camaragibe-alagoas-1/>>. Acesso em: 06 de Jan de 2014.

FRANÇA, D. A.; LONGO, K. M.; NETO, T. G. S.; SANTOS, J. C.; FREITAS, S. R.; RUDOFF, B. F. T.; CORTEZ, E. V.; ANSELMO, E.; AND CARVALHO JR., J. A.: Pre-Harvest Sugarcane Burning: Determination of Emission Factors through Laboratory Measurements, **Atmosphere**, 3, 164-180; doi:10.3390/atmos3010164, 2012.

FRANÇA, D. A.: Emissões Associadas à Queima da palha da Cana-de-açúcar no Estado De São Paulo E Seus Impactos Na Qualidade Do Ar, **Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, 2013.

FREITAS, S.; LONGO, K.; DIAS, M. S.; DIAS, P. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G.; RECUERO, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, n. 1-2. 2005.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ANDRAE, M. Impact of including the plume rise of vegetation fires in numerical simulations of associated atmospheric pollutants. **geophys. Res. Lett.** 33, 117808, doi: 10.1029/2006gl026608. 2006.

FREITAS, S. R. LONGO, K. M.; CHATFIELD, R.; LATHAM, D.; SILVA DIAS, M. A. F.; ANDRAE, M. O.; PRINS, E.; SANTOS, J. C.; GIELOW, R.; CARVALHO JR, J. A. Including the sub-grid scale plume rise of vegetation fires in low-resolution atmospheric transport models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 3385-3398 p. 2007.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 188-207. 2009a.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDRAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; AND 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.**, 9, 2843– 2861, doi:10.5194/acp-9-2843-2009, 2009b.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ALONSO, M. F.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; GRELL, G.; STOCKLER, R.; MELLO, R. F.; SÁNCHEZ GÁCITA, M. S.: PREP-CHEM-SRC – 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models, **Geosci. Model Dev.**, 4, 419–433, doi:10.5194/gmd-4-419-2011, 2011.

GHAN, S. J.; AND. EASTER, R. C. Corrigendum to “Impact of cloud-borne aerosol representation on aerosol direct and indirect effects” published in *Atmos. Chem. Phys.*, 6,4163–4174, 2006. **Atmos. Chem. Phys.**, 6, 4163–4174, 2006

GHAN, S. J. AND EASTER, R. C.: Impact of cloud-borne aerosol representation on aerosol direct and indirect effects, **Atmos. Chem. Phys.**, 6, 4163-4174, doi: 10.5194/acp-6-4163-2006, 2006.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, 36:2086-2097, 2008.

GODDISH, T. Air quality. Fourth edition. Lewis Publishers. **A CRC Press Company**. Boca Raton London New York Washington, D.C. 506 p. 2004.

GONÇALVES, J. F. A.; AZANIA, C. A. M.; AZANIA, A. A. P.: Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar. Grupo Cultivar – Artigos Técnicos. Disponível em:<
<http://www.grupocultivar.com.br/site/content/artigos/artigos.php?id=983>>

GRELL, G., EMEIS, S., STOCKWELL, W., SCHOENEMEYER, T., FORKEL, R., MICHALAKES, J., KNOCHE, R., and SEIDL, W.: Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign, **Atmos. Environ.**, 34(9), 1435–1453, 2000

GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophys. Res. Lett.**, 29, 2002.

GRELL, G.; PECKHAM, S.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S.; FROST, G.; SKAMAROCK, W., AND EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model, **Atmos. Environ.**, 39(37), 6957–6975, 2005.

GRELL, G.; FREITAS, S. R.; STUEFER, M.; FAST, J. Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts, **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, 10, 30613–30650, 2010.

GUSTAFSON JR., W. I.; CHAPMAN, E. G.; GHAN, S. J.; EASTER, R. C.; FAST, J. D. Impact on modeled cloud characteristics due to simplified treatment of uniform cloud condensation nuclei during NEAQS 2004, **Geophys. Res. Lett.**, 34, L19809, doi: 10.1029/2007GL030021, 2007.

HATCH, G.E.; SLADE, R.; HARRIS, L.P.; MACDONNEL, W.F.; DEVLIN, R.B.; KOREN, H.S.; COSTA, D.; MAKEE, J. Ozone dose and effect in human and rats. A comparison using oxygen-18 labeling and broncho alveolar lavage. **Am. Rev. Respir. Crit. Care Med.**, v. 150, 676-683 p. 1994.

HOBBS, P. V.; REID, J. S.; KOTCHENRUTHER, R. A.; FERREK, R. J.; WEISS, R. Direct Radiative Forcing by Smoke from Biomass Burning, **Science**, 275(5307), 1777–1778, 1997.

HOLMAN, C. Sources of air pollution. In: Holgate, S. T.; Samet, J. M.; Koren, H. S.; Mainard, R. L., Ed. Air pollution and health. San Diego, **Academic Press**, cap. 8, 115-48 p. 1999.

HOROWITZ, L., WALTERS, S., MAUZERALL, D., EMMONS, L., RASCH, P., GRANIER, C., TIE, X., LAMARQUE, J.-F., SCHULTZ, M., and BRASSEUR, G.: A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2, **J. Geophys. Res.**, 108(D24), 4784, doi:10.1029/2002JD002853, 2003.

IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. E.: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 113, D13103, doi: 10.1029/2008JD009944, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Vegetação do Brasil. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomas.shtm>>. Acesso em: 30 jul. 2011

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=44>. Acesso em: Jan de 2013.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.. Estado de Alagoas, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=al>>. Acesso em: 14 Jun. 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação automática (SIDRA) – Produção de cana-de-açúcar no Brasil em 2012. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 06 de Jan de 2014.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. 2012. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso constante.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Divisão de Processamento de Imagens – Monitoramento de Focos de Queimadas. 2012. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>>. Acesso constante.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Bracknell, 1996.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Agriculture, **Forestry and Other Land Use**. Vol. 4, 2006.

JACOBSON, M. Z. Strong Radiative Heating due to the Mixing State of Black Carbon in atmospheric aerosols. **Nature**, vol. 409, 695-697. 2001.

JACOBSON, M. Z. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 109, D21201, Doi: 10.1029/2004jd004945, 2004.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L.L.; MILES JR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, 54(1-3), 17-46, 1998.

JOST, H.; DRDLA, K.; STOHL, A.; ET AL.: In-situ observations of mid-latitude forest fire plumes deep in the stratosphere, **Geophys. Res. Lett.**, 31, L11101, doi: 10.1029/2003GL019253, 2004.

KAUFMAN, Y. J. Remote Sensing of Direct and Indirect Aerosol Forcing. **In: Aerosol Forcing of Climate. Ed. by R. J. Charlson and J. Heintzenberg**, John Wiley & Sons Ltd. 1995.

KOREN I.; KAUFMAN, Y.; REMER, L. A.; MARTINS, J. V. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation, **Science**, 303, 1342-1345. 2004.

KOZAREV, N.; ILIEVA, N.: Gas Pollutant Dispersion in the Atmosphere at Particular Meteorological Conditions. **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**, 46, 1, 61-66, 2011.

LANSER, D., AND VERWER, J. G. Analysis of Operator Splitting for advection-diffusion-reaction Problems from air Pollution modeling, **CWI report MAs-R9805**. 1998.

LARA, L. L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B.; VICTORIA, R. L.; FERRAZ, E. S.: Properties of aerosol from sugar-cane Burning emissions in Southeastern Brazil. **Atmospheric Environment** 39, 4627-4637. Doi: 10.11016/j.atmosenv.2005.04026. 2005.

LE CANUT, P.; ANDREAE, M. O.; HARRIS, G. W.; WIENHOLD, F. G.; ZENKER, T. Airborne studies of emissions from savanna fires in southern Africa: 1. Aerosol emissions measured with a laser optical particle counter. **J. Geophys. Res.** 101, 23615–23630. 1996.

LEVINE, J. S.; COFER III, W. R.; CAHOON JR, D. R.; WINSTEAD, E. L.: Biomass Burning: A Driver for Global Change. **Journal Environmental Science and Technology** VOL. 29, NO. 3, 1995.

LIN, Y. L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snowfield in a cloud model. **J. Clim. App. Meteor.**, 22, p. 1065-1092. 1983.

LIN, S. J., and ROOD, R. B.: Multidimensional flux-form semi Lagrangian transport schemes. **Monthly Weather Review** 124, p. 2046–2070, 1996

LIN, M.; HOLLOWAY, T.; CARMICHAEL, G. R.; FIORE, A. M. Quantifying pollution inflow and outflow over East Asia in spring with regional and global models, **Atmos. Chem. Phys.**, 10, 4221-4239, doi: 10.5194/acp-10-4221-2010, 2010.

LOBERT, J.M.; SCHARFEE, D.H.; HAO, W.M.; KUHBUSH, T.A.; SEUWEN, R.; WARNECK, P.; CRUTZEN, P.J. Experimental evaluation of biomass burning emissions: nitrogen and carbon containing compounds. In: LEVINE, J.S., **Ed. Global biomass burning**, Cambridge, The MIT Press, Cap. 36, 289-304 p. 1991.

LOBERT, J. M., AND WARNATZ, J. Emissions from the Combustion Process in Vegetation. **Fire in the Environment**, ed. by P. J. Crutzen and J. G. Goldammer. John Willey & Sons. 1993.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, P.; DIAS, P. S. Numerical modeling developments towards a system suitable to a real time air quality forecast and climate changes studies in South America, **newsletter of the international global atmospheric Chemistry Project**, Taiwan, v. 33, 12-16. 2006.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; ANDRAE, 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, **In press: ACPD/EGU MS# 2007-0167**, <<http://brams.cptec.inpe.br/papers/catt-brams-paper2.pdf>> 2007.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDRAE, 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.; SILVA DIAS, P. (Ed.). Amazonia and global change. Washington, DC, USA: **American Geophysical Union**, 2009.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDRAE, M. O.; YOKELSON, R.J.; ARTAXO, P. Biomass burning in Amazonia: Emissions, Long-range transport of smoke and its regional and remote Impacts. **In. Amazonia and global change geophysical. Monograph series 186. Copyright 2009 by the American geophysical union. 207-232. 2010.**

LOPES, M. L. A.; CARVALHO, L. R. F. Estimativas de Emissão de Gases Provenientes da Queima de cana-de-açúcar em Escala Regional. **In Proceedings of the 32^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, Fortaleza, CE, Brazil, 30 May–2 June 2009.

MALILAY J. A review of factors affecting the human health impacts of air pollutants from forest fires. **In: Background papers of Health Guidelines for Vegetation Fire Events**; 1998 Oct 6-9; Lima, Peru. Geneva: WHO, 1999.

MANGIA, C.; MOREIRA, D. M.; SCHIPA, I.; DEGRAZIA, G. A.; TIRABASSI, T., AND RIZZA, U. Evaluation of a new eddy diffusivity parameterization from turbulent Eulerian spectra in different stability conditions. **Atmospheric Environment**, 36(1), 67-76 p. 2002.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLAT, J.; OYAMA, M. D.; SAMPAIO, G. O.; DE OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**. 21, 495–516. 2008.

MARIANO, G. L. Efeitos das queimadas na atmosfera do estado de São Paulo - análise de fontes próximas e distantes através de LIDAR, **Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, 2010.

MARINHO, E.V.A.; KIRCHHOFF, V. W. J.H.: Projeto Fogo: Um experimento para avaliar os efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na baixa atmosfera. **Revista Brasileira de Geofísica**; Vol. 9 (2), p. 107-119. 1991.

MATSUDA, M. Efeitos das emissões geradas pela queima dos canaviais sobre a superfície ocular. **Tese de doutorado em Medicina, Universidade de São Paulo**, São Paulo. 124p. 2009.

MAZZOLI-ROCHA, F.; MAGALHÃES, C. B.; MALM, O.; SALDIVA, P. H. N.; ZIN, W. A. FAFFE, D. S. Comparative respiratory toxicity of particles produced by traffic and sugar cane burning; **Environmental Research**; 108, 35– 41 p. 2008.

MCKEEN, S.A., WOTAWA, G., PARRISH, D.D., HOLLOWAY, J.S., BUHR, M.P., HÜBLER, G., FEHESENFELD, F.C., MEAGHER, J.F.: Ozone production from Canadian

wildfires during June and July of 1995. **Journal of Geophysical Research** 107 (D14) 0.1029/2001JD000697. 2002.

MELLOR, G.L., and YAMADA, T.: Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Spacephysics** 20, 851–875, 1982.

MIDDLETON, P., STOCKWELL, W.R., CARTER, W.P.L.: Aggregation and analysis of volatile organic compound emissions for regional modeling. **Atmospheric Environment** 24A, 1107–1133. 1990.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Anuário estatístico da agro energia. Brasília: Mapa/ACS, 160 p. 2009. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/images/MAPA/arquivos_portal/anuario_cana.pdf>. Acesso em: dez de 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 09 de Jan de 2014.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, 1-10 p. 2002.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambient. soc.**, vol.11, n.1, 1-13 p. ISSN 1809-4422. 2008.

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basics laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci.**, USSR, 151, 1954. 163-187.

MOSCHANDREAS, D. J.; WATSON, J.; D'ABRETON, P.; SCIRE, J.; ZHU, T.; KLEIN, W., SAKSENA, S. Chapter 3: methodology of exposure modeling. **Chemosphere**, 49(9), 923-946 p. 2002.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. EARTH OBSERVATORY. EOS Project Science Office located at NASA Goddard Space flight Center. Biomass Burning. Online. 2013. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BiomassBurning/>>. Acesso: 17 de Jul de 2013

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. EARTH OBSERVING SYSTEM, DATA AND INFORMATION SYSTEM – EOSDIS. Global Fire Maps. Online. 2013. Disponível em: <http://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms/active-fire-data#tab-content-7> >. Acesso em: 17 de Jul de 2013.

NASCIMENTO, P. T. S.; e XAVIER, R. A. Análise pluviométrica do estado de Alagoas. In: Simpósio Alagoano de Gestão Ambiental, 1. Arapiraca-AL. **Anais... Arapiraca: UNEAL/CAMPUS I**, 2010, p. 11-19. 1 CD-ROM. 2010.

NTELEKOS, A. A.; SMITH, J. A.; DONNER, L.; FAST, J. D.; GUSTAFSON, W. I.; CHAPMAN, E. G.; KRAJEWSKI, W. F. The effects of aerosols on intense convective precipitation in the northeastern United States, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 135: 1367–1391. doi: 10.1002/qj.476, 2009.

NUNES, D. S. R. Mapeamento Eólico do estado de Alagoas utilizando ferramentas computacionais e dados observados. **Dissertação de mestrado em Meteorologia - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade de Alagoas**, Janeiro de 2012. 127 p. 2012.

OLIVEIRA, P. H. F.; ARTAXO, P.; PIRES, C.; DE LUCCA, S.; PROCOPIO, A.; HOLBEN, B.; SCHAFFER, J.; CARDOSO, L. F.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO flux in Amazonia. **Tellus**, 59B, 338-349, 2007.

PIELKE, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. 2^a. Ed. San Diego, California: **Academic Press**, v. 78, 2002.

PLEIM, J.E., VENKATRAM, A., YAMARTINO, R.: ADOM/TADAP Model Development Program, The Dry Deposition Module, vol, 4. **Ont. Min. of the Environment**, Canada. 1984.

PLEIM, J. E. A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary Layer. Part 1: Model description and testing. **J. Appl. Meteor. Clim.** 46, 1383-1398. 2007a.

PLEIM, J. E. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part II Application and Evaluation in a Mesoscale Meteorological Model. **J. Appl. Meteor. Climatol.** 46, 1396-1409. 2007b.

PRYOR, W.A., AND LIGHTSEY, J.W. Mechanism of nitrogen dioxide reactions: initiation of lipid peroxidation and the production of nitrous acid. **Science**, v. 214, 435-7 p. 1981.

QUINTÃO, D. S.: Calibração de sistema de radar meteorológico através de dados disdrométricos dos campos de chuva no Nordeste leste do Brasil. **Dissertação de mestrado em Meteorologia — Universidade Federal de Alagoas**, Maceió - AL, 2004.

RIBEIRO, H. Sugar cane burning in Brazil: respiratory health effects. **Rev. Saúde Pública**. vol.42, n.2, Epub Feb 29, ISSN 0034-8910. 370-376 p. 2008.

ROSEIRO, M. N. V., AND TAKAYANAGUI, A. M. M. Meio Ambiente e Poluição Atmosférica: O caso da cana-de-açúcar. **Saúde**, Vol. 30 (1-2): 76-83 p. 2004.

ROSENFELD, D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall, **Geophys. Res. Lett.**, 26 (20), 3105–3108, 1999.

ROSENFELD, D.; FROMM, M.; TRENTMANN, J.; LUDERER, G.; ANDREAE, M. O.; AND SERVRANCKX, R.: The Chisholm firestorm: observed microstructure, precipitation and lightning activity of a pyrocumulonimbus, **Atmos. Chem. Phys.**, 7, 645–659, <<http://www.atmos-chem-phys.net/7/645/2007/>>. 2007.

SALLA, D. A; e CABELLO, C.: Análise Energética de Sistemas De Produção De Etanol De Mandioca, Cana-De-Açúcar e Milho. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, vol. 25, n.2, ISSN 1808-8759, p.32-53 2010.

SALLES, V. Guia do meio ambiente: litoral de Alagoas. 3. ed. Maceió: Instituto do Meio Ambiente (IMA); **Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)**; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL). 184 p. 1995.

SAMET, J.M., AND MARK, J.U. Indoor and outdoor air pollution. **In: Fishman, A., ed. Fishman pulmonary disease and disorder**, 3.ed. New York, McGraw-Hill, 1998.

SANTOS, S. S. O Cultivo da Cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: uma análise comparativa dos efeitos da mecanização no estado de São Paulo. **Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília**. Brasília, Outubro de 2011. 103 p. 2011.

SATYENDRA, T.; SINGH, R. N.; AND SHAISHAV, S. Emissions from Crop/Biomass Residue Burning Risk to Atmospheric Quality, **International Research Journal of Earth Sciences**, Vol. 1(1), 24-30, April 2013.

SCHELL, B., ACKERMANN, I.J., HASS, H., BINKOWSKI, F.S., EBEL, A.: Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. **Journal of Geophysical Research** 106, 28275–28293. 2001.

SEILER, W. AND CRUTZEN, P. J.: Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning, **Clim. Change**, 2, 207–247, 1980.

SEINFELD, J. H.; AND PANDIS, S. H. Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change. Second edition. **John Wiley & Sons, Inc. Hoboken**, New Jersey. 1225 p. 2006.

SELAND, O.; AND IVERSEN, T. A scheme for black carbon and sulphate aerosols tested in a hemispheric scale, Eulerian dispersion model. **Atmospheric Environment**, 33(17), 2853-2879 p. 1999.

SEMARH - SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Governo do Estado de Alagoas. 2013. Disponível em: <<http://www.semarh.al.gov.br>>. Acesso em: 30 jul. 2013.

SETZER, A. W., AND PEREIRA, M. C. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. **Ambio**, v. 20, n. 1, 17 p. 1991.

SHARKEY, B. Ed. Health hazards of smoke: recommendation of the April 1997 Consensus Conference. **Technical Report 9751-2836-MTDC**. Missoula, MT: United States Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Technology and Development Center, 84 p. 1997.

SILVA, A. R. Estudo observacional do regime de vento no Estado de Alagoas, nos períodos seco e de transição seco-chuvoso. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia)**, Maceió: **Universidade Federal de Alagoas (UFAL)**, 100 p. 2009.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. G.; HUANG, X. Y.; WANG, W.; POWERS, J. G. A description of the Advanced Research WRF version 3. **NCAR Technical Note** 475, 2008.

SOUTO, M. J.; SOUTO, J. A.; PEREZ-MUNUZURI, V.; CASARES, J. J.; AND BERMUDEZ, J. L. A comparison of operational Lagrangian particle and adaptive puff models for plume dispersion forecasting. **Atmospheric Environment**, 35(13), 2349-2360. 2001.

SPORTISSE, B. Box models versus Eulerian models in air pollution modelling. **Atmospheric Environment**, 35(1), 173-178. 2001.

SLINN, S.A.; SLINN, W.G.N. Prediction for particle deposition on natural waters. **Atmospheric Environment** 14, pp. 1013–1016. 1980.

STOCKWELL, W.R., MIDDLETON, P., CHANG, J.S., TANG, X.: The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. **Journal of Geophysical Research** 95, 16343–16367. 1990.

STOCKWELL, W.R.; KIRCHNER, F.; KUHN, M.; SEEFELD, S. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. **Journal of Geophysical Research** 102, 15847–25879. 1997.

TANG, Y.; CARMICHAEL, G. R.; WOO, J. H.; THONGBOONCHOO, N.; KURATA, G.; UNO, I.; STREETS, D. G.; BLAKE, D. R.; WEBER, R. J.; TALBOT, R. W.; KONDO, Y. SINGH, H. B.; WANG, T.: Influences of biomass burning during the transport and chemical evolution over the Pacific (TRACE-P) experiment identified by the regional chemical transport model. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 108, n°. D21, 8824. 2003.

TIE, X.; MADRONICH, S.; LI, G.; YING, Z.; WEINHEIMER, A.; APEL, E.; CAMPOS, T. Simulation of Mexico City plumes during the MIRAGE-Mex field campaign using the WRF-Chem model, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4621-4638, doi:10.5194/acp-9-4621-2009, 2009.

TYBA AGÊNCIA FOTOGRÁFICA. Vista aérea de queimada em plantação de cana de açúcar - Região de Bauru - SP – Brasil. Disponível em: http://www.tyba.com.br/portugues/minha_conta/ampliacao.php?file=01-07-02-08>. Acesso em: 06 de Jan de 2014.

ULKE, A. G. New turbulent parameterization for a dispersion model in the atmospheric boundary layer. **Atmospheric Environment**, 34(7), 1029-1042 p. 2000.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Air quality criteria for particulate matter, v. 2. **Rep. EPA/600/P-95/0016F**. 1996.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: National air pollutant emission trends, procedures document, 1900–1996, **Rep. EPA-454/R-98-008**, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, 148pp. 1998.

VAL MARTIN, M.; KAHN, R. A.; LOGAN, J. A.; PAUGAM, R.; WOOSTER, M.; and ICHOKU, C.: Space-based observational constraints for 1-D fire smoke plume-rise models. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 117, D22204, Doi: 10.1029/2012jd018370, 2012

VAN BATEN, J. M., AND KRISHNA, R. Eulerian simulations for determination of the axial dispersion of liquid and gas phases in bubble columns operating in the churn-turbulent regime. **Chemical Engineering Science**, 56(2), 503-512 p. 2001.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; AND ARELLANO JR., A. F.: Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3423–3441, doi:10.5194/acp-6-3423-2006, 2006.

VEDRASCO, E. P.: Efeito dos Aerossóis de Queimadas nas Concentrações de Oxidantes Fotoquímicos. **Dissertação de mestrado em Meteorologia - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 146 p. março de 2006.

YANENKO, N. N. The Method of Fractional Steps: The Solution of Problems of Mathematical Physics in Several Variables, **springer**, New York. 1971.

YOKELSON, R.J.; SUSOTT, R.; WARD, D.E.; REARDON, J.; GRIFFITH, D.W.T. Emissions from smoldering combustion of biomass measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy. *J. Geophys. Res.* v. 102. p. 865-7, 877 p. 1997.

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.

YOKELSON, R. J.; BURLING, I. R.; URBANSKI, S. P.; ATLAS, E. L.; ADACHI, K.; BUSECK, P. R.; WIEDINMYER, C.; AKAGI, S. K.; TOOHEY, D. W.; WOLD, C. E. Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6787–6808, 2011.

ZANCUL, A. O efeito da queimada de cana-de açúcar na qualidade do ar da região de Araraquara. **Dissertação Mestrado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, São Carlos, 96 p. 1998.

ZHANG, H.; YE, X.; CHENG, T.; CHEN, J.; YANG, Y.; WANG, L.; ZHANG, R. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory, *Atmospheric Environment* 42, 8432–8441, 2008.

ZHANG, Y.: Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2895–2932, doi: 10.5194/acp-8-2895-2008, 2008.

ZHOU, Q.; AND LESCHZINER, M. A. An improved particle-locating algorithm for Eulerian-Lagrangian computations of two-phase flows in general coordinates. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(5), 813-825 p. 1999.

ZOU, L. Y.; ZHANG, W.; ATKINSON, S. The characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from burning of different firewood species in Australia. *Environmental Pollution*, 124(2), 283-289. 2003.

WANG, J., CHRISTOPHER, S. A., NAIR, U. S., REID, J. R.; PRINS, E. M.; SZYKMAN, J.; HAND, J. L.: Mesoscale modeling of Central American smoke transport to the United States: 1. “Top-down” assessment of emission strength and diurnal variation impacts, *J. Geophys. Res.*, 111, D05S17, doi: 10.1029/2005JD006416, 2006.

WARD, D.E., AND HARDY, C. Organic and elemental profiles for smoke from prescribed fires. In: Watson, J. G. ed. **Receptor models in air resources management: Transactions of an international speciality conference of the Air and Waste Management Association**; San Francisco, Pittsburg, .229-321.c1989.

WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMAN, J. B.; BABBIT, R. E.; CUMMINS, D. L.; DIAS, B.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. W. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in brazil- base-b experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13. 1992.

WARDOYO, A. Y. P. Biomass Burning: particle emissions, characteristics, and airborne measurements. **Tese de Doutorado em Filosofia - School of Physical and Chemical Sciences**, Queensland University of Technology, Queensland – EUA. 257 p. 2007.

WEINGRILL, N.: Quais as diferenças entre o álcool de cana e o de milho? **Revista Super Interessante**. Ed. 238. Abril de 2007.

WHO. **Health Guidelines for Vegetation Fire Events**, ed. Schwela, D.H., Goldammer, J.G., Morawska, L.H., Simpson, O. Geneva, World Health Organization. 1999.

WESLEY, M.L.: Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models. **Atmospheric Environment** 16, 1293–1304. 1989.

WICKER, L.J., AND SKAMAROCK, W.C.: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes. **Monthly Weather Review**130, p. 2088–2097. 2002

APÊNDICE A

LISTA DE PUBLICAÇÕES

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.: **Estudo da dispersão de poluentes no estado de Alagoas, simulando queimadas no litoral do estado.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Gramado - RS. 2013

**ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES NO ESTADO DE ALAGOAS,
SIMULANDO QUEIMADAS NO LITORAL DO ESTADO.**

MOLLMANN JUNIOR, R. A.¹, SILVA JÚNIOR, R. S.²

^{1, 2} UFAL – Universidade Federal de Alagoas – mollmann_r@hotmail.com

RESUMO: No estado de Alagoas, um dos maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil, a maneira de auxiliar na colheita da cana-de-açúcar é a prática das queimadas. Para identificar os impactos dessas queimadas na atmosfera, foram realizadas simulações computacionais para avaliar a dispersão dos poluentes emitidos em possíveis queimadas no litoral alagoano. Neste estudo é feita uma simulação de 6 focos de queimadas no litoral de Alagoas, e é analisado como os parâmetros meteorológicos influenciam na dispersão dos poluentes. Os principais resultados mostraram uma dispersão horizontal de aproximadamente 250 km e vertical de aproximadamente 5 km de altura.

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.; GOMES, H. B.; MOURA, M. A. L.:

Estudo da dispersão de monóxido de carbono (CO) emitido através da queima de cana-de-açúcar, no estado de Alagoas. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, p. 488-499, 2013.

Revista Brasileira de Geografia Física V. 06 N. 03 (2013) 488-499



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Estudo da dispersão de monóxido de carbono (CO) emitido através da queima de cana-de-açúcar, no estado de Alagoas

Ricardo Antonio Mollmann Junior¹, Rosiberto Salustiano da Silva Junior², Heliofábio Barros Gomes², Marcos Antônio Lima Moura².

¹Mestrando em Meteorologia no Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas – ICAT/UFAL, Maceió, Alagoas – Brasil. Email: mollmann_r@hotmail.com.br, ² Prof. Dr. Departamento de Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas - ICAT/UFAL, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Cidade Universitária - Maceió, Alagoas – Brasil. Email: rosibertojr@gmail.com, heliofab@gmail.com, malm@ccen.ufal.br.

Artigo recebido em 10/04/2013 e aceite em 10/09/2013

RESUMO

O estado de Alagoas é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil e faz uso da prática das queimadas para auxiliar na colheita da cana-de-açúcar. O módulo químico do modelo atmosférico WRF (WRF/CHEM – Weather Research Forecasting/CHEMistry), possibilitou as análises de concentração e dispersão do gás traço Monóxido de Carbono (CO), oriundos de focos de queimadas detectados operacionalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) presente no satélite AQUA da **National Aeronautics and Space Administration (NASA)**, entre os dias 1 a 6 de novembro de 2011. Para avaliar a dispersão foi utilizada a direção e a velocidade do vento a 10 metros de altura, no sentido de estimar o destino da pluma de gás emitida pela queimada. Verificou-se que o CO pode afetar a qualidade do ar local ao assumir altas concentrações a poucos quilômetros da fonte de emissão (cerca de 3000 ppbv). Porém, com a dispersão do gás promovida pelo vento, é possível ver concentrações próximas a 800 ppbv, pelo menos a 100 km da fonte de emissão.

Palavras-chave: queimadas, cana-de-açúcar, modelagem atmosférica, poluição atmosférica, sensoriamento remoto.

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JUNIOR, R. S.; COSTA, S. S.; MEDINA, B. L.: Estudo da Dispersão de Monóxido de Carbono emitido por queimadas na Amazônia Legal em 19 Agosto de 2010, baseado em: simulações do modelo WRF-CHEM e Sensoriamento Remoto. In: Simpósio Internacional de Climatologia, Florianópolis, 2013.

ESTUDO DA DISPERSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO EMITIDO POR QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL EM 19 AGOSTO DE 2010 BASEADO EM: SIMULAÇÕES DO MODELO WRF-CHEM E SENSORIAMENTO REMOTO.

Resumo: A Região Amazônica, apresenta um ecossistema tropical único que ainda preserva grande parte de sua floresta nativa, no entanto, vem sofrendo extensivas mudanças devido à constante presença de queimadas nessa região. O módulo químico do modelo atmosférico WRF (WRF/CHEM – Weather Research Forecasting/CHEMistry), possibilitou a análise da concentração e dispersão do gás traço Monóxido de Carbono (CO), oriundos dos focos de queimadas detectadas operacionalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelos sensores AVHRR dos satélites polares NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18 e NOAA-19; as imagens do sensor MODIS nos satélites polares da NASA: TERRA e AQUA; e as imagens dos satélites geoestacionários GOES- 12 e MSG-2, no dia 19 de Agosto de 2010. Para avaliar a dispersão foi utilizada a direção e a velocidade do vento a 10 metros de altura, no sentido de estimar o destino da pluma de gás emitida pela queimada, é ainda feita uma análise do transporte do gás traço na coluna atmosférica através de sensoriamento remoto com informações do instrumento AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) a bordo do satélite AQUA. Verificou-se que o CO pode afetar a qualidade do ar local ao assumir altas concentrações a poucos quilômetros da fonte de emissão (aproximadamente 2000 ppbv), porém com a dispersão do gás em função do vento, é possível ver concentrações próximas a 500 ppbv a pelo menos a 300 km da fonte de emissão, sendo poluente transportado a outros países da América do sul.

Palavras-chave: Queimadas, Região Amazônica, Modelagem Atmosférica, Poluição Atmosférica, Sensoriamento Remoto.

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JÚNIOR, R. S.; DORNELLES, J. R., GERMANO, A. S., MELO, A. L. B., NASCIMENTO, G. C. Efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na saúde respiratória do município de Coruripe, Alagoas. Artigo submetido ao livro Atmosfera e Sociedade. 2013.

Efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na saúde respiratória do município de Coruripe

¹Ricardo Antonio Mollmann Junior;

²Rosiberto Salustiano da Silva Júnior;

³Jefferson Rodrigues Dornelles;

⁴Alaerte da Silva Germano;

⁴Arthur Lucas Bernardo Melo;

⁴Giuliano Carlos do Nascimento;

¹mestrando em Meteorologia ICAT/UFAL; ²Prof. Dr. ICAT/UFAL;

³Fisioterapeuta, com especialização em fisioterapia cardiopulmonar;

⁴graduando em Meteorologia - ICAT/UFAL

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JÚNIOR, R. S. (2013). Análise da dispersão de monóxido de carbono (CO) emitido em um dia de queima de cana-de-açúcar no estado de Alagoas. In. Workshop internacional de Micrometeorologia de Santa Maria 2013.

Análise da dispersão de monóxido de carbono (CO) emitido em um dia de queima de cana-de-açúcar no estado de Alagoas

Ricardo Antonio Mollmann Junior¹, Rosiberto Salustiano da Silva Junior².

¹ meteorologista, mestrando em Meteorologia – Universidade Federal de Alagoas – Brasil. E-mail: mollmann_r@hotmail.com; ² Prof. Dr. depto. de Meteorologia - Instituto de Ciências Atmosféricas - Universidade Federal de Alagoas.

RESUMO

O estado de Alagoas é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil e faz uso da prática das queimadas para auxiliar na colheita da cana-de-açúcar. Com a utilização do modelo atmosférico WRF/CHEM foram apresentadas análises da concentração e dispersão do gás traço monóxido de carbono (CO), oriundo de focos de queimadas detectados operacionalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo sensor presente no satélite AQUA da NASA, durante o dia 01 de novembro de 2011. Para avaliar a dispersão foi utilizada a direção e a velocidade do vento a 10 metros de altura, no sentido de estimar o destino da pluma de gás emitida pela queimada. Verificou-se que o CO pode afetar a qualidade do ar local ao assumir altas concentrações a poucos quilômetros da fonte de emissão (cerca de 3000 ppbv). Porém, com a dispersão do gás promovida pelo vento, é possível ver concentrações próximas a 800 ppbv, pelo menos a 100 km da fonte de emissão.

MOLLMANN JUNIOR, R. A.; SILVA JÚNIOR, R. S.; COSTA, S. M. S.; MEDINA, B. L. Estudo da dispersão de monóxido de carbono emitido por queimadas na Amazônia legal em 19 agosto de 2010 baseado em: simulações do modelo WRF-CHEM e Sensoriamento Remoto. Ciência e Natura, 2013.

Estudo da dispersão de monóxido de carbono emitido por queimadas na Amazônia legal em 19 agosto de 2010 baseado em: simulações do modelo WRF-CHEM e Sensoriamento Remoto.

STUDY OF DISPERSION OF CARBON MONOXIDE EMITTED BY BIOMASS BURNING IN THE AMAZON ON AUGUST 19, 2010 BASED ON WRF-CHEM SIMULATION AND REMOTE SENSING.

R. A. Mollmann Junior ⁽¹⁾, R. S. da Silva Júnior ⁽¹⁾, S. M.S. da Costa⁽²⁾, B. L. Medina⁽²⁾

¹ Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas Maceió, Brasil, ² Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, Instituto Nacional de Ciências Atmosféricas, Cachoeira Paulista, Brasil

Resumo: A Região Amazônica, apresenta um ecossistema tropical único que ainda preserva grande parte de sua floresta nativa, no entanto, vem sofrendo extensivas mudanças devido à constante presença de queimadas nessa região. O módulo químico do modelo atmosférico WRF (WRF/CHEM – Weather Research Forecasting/CHEMistry), possibilitou a análise da concentração e dispersão do gás traço Monóxido de Carbono (CO), oriundos dos focos de queimadas detectadas operacionalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelos sensores AVHRR dos satélites polares NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18 e NOAA-19; as imagens do sensor MODIS nos satélites polares da NASA: TERRA e AQUA; e as imagens dos satélites geoestacionários GOES- 12 e MSG-2, no dia 19 de Agosto de 2010. Para avaliar a dispersão foi utilizada a direção e a velocidade do vento a 10 metros de altura, no sentido de estimar o destino da pluma de gás emitida pela queimada, é ainda feita uma análise do transporte do gás traço na coluna atmosférica através de sensoriamento remoto com informações do instrumento AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) a bordo do satélite AQUA. Verificou-se que o CO pode afetar a qualidade do ar local ao assumir altas concentrações a poucos quilômetros da fonte de emissão (aproximadamente 2000 ppbv), porém com a dispersão do gás em função do vento, é possível ver concentrações próximas à 500 ppbv a pelo menos a 300 km da fonte de emissão, com o poluente sendo transportado a outros países da América do sul.

Palavras-chave: Queimadas, Região Amazônica, Modelagem Atmosférica, Poluição Atmosférica, Sensoriamento Remoto.
