

## COMPORTAMENTO DO VENTO E ASPECTOS GEOMÓRFICOS QUE CONDICIONAM A MOVIMENTAÇÃO DA PLUMA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE PIRAPORA – MGS

**Elizene Veloso Ribeiro\***  
Instituto Federal de Minas Gerais

**Vilma Lúcia Macagnan Carvalho\*\***  
Universidade Federal de Minas Gerais

**Adolf Heinrich Horn\*\*\***  
Universidade Federal de Minas Gerais

**Wallace Magalhães Trindade\*\*\*\***  
Instituto Federal de Minas Gerais

**Resumo:** As plumas de poluição atmosférica originadas nas áreas industriais respondem por considerável parte dos compostos que penetram na atmosfera. A movimentação destes poluentes é condicionada por variáveis que incluem as propriedades do material emitido, condições meteorológicas e características da superfície. Este trabalho apresenta uma análise do comportamento da pluma de poluentes atmosféricos emitidos no distrito industrial de Pirapora, mesorregião Norte de Minas Gerais. A metodologia inclui o estudo da direção e velocidade dos ventos; levantamento da extensão e direção da pluma com imagens de satélite e avaliação da influência da geomorfologia baseado em levantamentos de campo e dados da Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. Os dados estatísticos do comportamento do vento mostram que predominam ventos de nordeste (NE, estes direcionam o deslocamento da pluma para sudoeste (SW). O relevo influencia na dispersão por meio de dois corredores geomorfológicos (NE-SW) e (E-W), estes são delimitados por barreiras orográficas nas cotas médias de 600 m e 800 m, respectivamente. Verificou-se no quadrante oeste (W) a extensão máxima da pluma com 128,5 km, sendo este quadrante o de maior risco ambiental devido à deposição e acúmulo de poluentes transportados por ventos de leste (E). As imagens de satélite associadas à direção dos ventos e feições do relevo permitiram a identificação das áreas com maior possibilidade de degradação da qualidade do ar e acúmulo de material particulado. Estes resultados são importantes no direcionamento dos estudos de contaminação nos compartimentos ambientais receptores (solo e vegetação) e poderão subsidiar ações de gestão ambiental, bem como auxiliar na tomada de decisões por parte dos gestores públicos.

**Palavras chave:** Material Particulado, Unidades geomorfológicas, Imagens de satélite, Rosa dos Ventos, Risco Ambiental.

### BEHAVIOR OF THE WIND AND GEOMORPHIC FEATURES CONTROLLING THE MOVEMENT OF POLLUTANTS RELEASED INTO THE ATMOSPHERE BY THE INDUSTRIAL DISTRICT OF PIRAPORA, MINAS GERAIS, BRAZIL

**Abstract:** Air pollution plumes emanating from industrial areas account for a significant proportion of compounds released into the atmosphere. The trajectory followed by the pollutants are subject to variables that include the properties of the material released, the weather conditions and surface characteristics. This paper presents an analysis of the upward movement of plumes of atmospheric particles emitted by the industrial district of Pirapora-MG. The methodology includes the study of wind direction and speed; mapping the extent and direction of the plumes in motion by satellite imaging; and assessment of the geomorphological conditions based on field surveys and SRTM data. The regional history of atmospheric dynamics is characterized by winds from the northeast (NE) which funnel the plumes to the southwest (SW). Geomorphology controls dispersion through two geomorphological corridors (NE-SW) and (E-W), bounded by orographic barriers averaging 600m and 800m in size. The maximum reach of the plume was 128.5 km into the western quadrant (W). This quadrant was exposed to the highest level of environmental risk due to the deposition of pollutants carried by winds from the east (E). The satellite images associated with wind direction and relief features allow for identification of the areas with the highest possibility of air quality degradation and accumulation of particulate matter. These results will be important to the management of studies on contamination in environmental compartments of receptors (soil and vegetation) and may subsidize environmental management programs as well as assist in decision-making by public officials.

**Keywords:** Particulate Matter, Geomorphologic Units, Satellite Images, Compass, Environmental Risk.

### COMPORTAMIENTO DEL VIENTO Y ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS QUE CONDICIONAN EL MOVIMIENTO DE LA PLUMA DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DEL POLÍGONO INDUSTRIAL DE PIRAPORA – MG

**Resumo:** Las plumas de polución atmosférica originadas en las áreas industriales son responsables de una parte considerable de los compuestos que penetran en la atmósfera. El movimiento de estos contaminantes está condicionado por variables que incluyen las propiedades del material emitido, las condiciones meteorológicas y las características de la superficie. Este trabajo presenta un análisis del comportamiento de la pluma de contaminantes atmosféricos emitidos en el Polígono Industrial de Pirapora, Mesorregión Norte de Minas Gerais. La metodología incluye el estudio de la dirección y velocidad de los vientos; el padrón de la extensión y dirección de la pluma con imágenes de satélite y la evaluación de la influencia de la geomorfología, basada en recogida de datos de campo y de la Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. Los datos estadísticos del comportamiento del viento muestran que predominan vientos del noreste (NE, que dirigen el desplazamiento de la pluma hacia el sudoeste (SW). El relieve influye en la dispersión por medio de dos corredores geomorfológicos (NE-SW) y (E-W), que están delimitados por barreras orográficas en las cotas medias de 600 y 800 m, respectivamente. Se verificó en el cuadrante oeste (W) la extensión máxima de la pluma, con 128,5 km, siendo este cuadrante el de mayor riesgo ambiental debido al depósito y acumulación de contaminantes transportados por vientos del este (E). Las imágenes de satélite, asociadas a la dirección de los vientos y formas del relieve, permitieron la identificación de las áreas con mayor posibilidad de degradación de la calidad del aire y acumulación de material de partículas contaminantes. Estos resultados son importantes para la orientación de los estudios de contaminación en los compartimentos ambientales receptores (suelo y vegetación) y podrán contribuir en acciones de gestión ambiental, así como ayudar en la toma de decisiones por parte de los gestores públicos.

**Palabras clave:** Material con partículas contaminantes, Unidades geomorfológicas, Imágenes de satélite, Rosa de los Vientos, Riesgo Ambiental.

\*Doutora em Geografia. Professora Efetiva do Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG. Av. Prof. Mário Werneck, 2590 - Burity - CEP: 30575-180 - Belo Horizonte/MG - Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5670-4275>. E-mail: elizene.ribeiro@ifmg.edu.br.

\*\*Doutora em Geografia. Professora Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos, 6.627 - Pampulha - CEP: 31270-901 Belo Horizonte/MG - Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-3164>. E-mail: vlmc@ufmg.br.

\*\*\*Doutor em Geologia. Professor Titular do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos, 6.627 - Pampulha - CEP: 31270-901 Belo Horizonte/MG - Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2866-1471>. E-mail: hahorn@ufmg.br.

\*\*\*\*Doutor em Geografia. Professor Efetivo do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - IFNMG/Campus Pirapora. Av. Doutor Humberto Mallard, 13550 - Santos Dumont - CEP: 39274-140 - Pirapora/MG - Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5458-1619>. E-mail: wallace.trindade@ifnmg.edu.br.

## Introdução

A degradação da qualidade do ar apresenta-se como um dos marcantes problemas ambientais na atualidade, principalmente nas áreas urbanas e industriais, devido ao crescente aumento da emissão de compostos gasosos e material particulado à atmosfera.

A visibilidade dos poluentes na atmosfera é um dos aspectos que chama atenção para essa temática ambiental. Para Stern (1986, 43), devido à fração visível, o material particulado e a fumaça ganharam a primeira e mais universal preocupação dos programas de limpeza da poluição do ar.

A origem dos poluentes atmosféricos pode ser natural ou antrópica. No que diz respeito às emissões decorrentes das atividades humanas, essas têm, dentre as suas características específicas, escalas espaciais e temporais. Assim, a localização concentrada das fontes de emissão, o volume de material liberado e a continuidade do processo são fatores que podem dificultar a dispersão/diluição e resultar em quadros de poluição.

Quando emitidos, os poluentes são transportados, diluídos e modificados química ou fisicamente na atmosfera e, finalmente, alcançam algum receptor, onde eles prejudicam a saúde, as características, ou alguma outra parte do ambiente (DE NEVERS 2000, p. 7).

Nas áreas industriais, são comuns plumas de poluentes que se deslocam e transportam compostos por longas distâncias. Os poluentes, que incluem material particulado, se deslocam vertical (inicialmente) e horizontalmente. As plumas, especialmente de fontes fixas pontuais, se movimentam condicionadas pela estabilidade da atmosfera, direção dos ventos e características da superfície, condições que definem os padrões de dispersão.

A dispersão dos poluentes na atmosfera é objeto de muitos estudos baseados em modelos matemáticos de transporte e deposição. Os modelos numéricos são utilizados para criar cenários futuros e direcionar ações de controle e monitoramento ambiental da poluição do ar (MOREIRA e TIRABASSI, 2004; ALBUQUERQUE, 2010; HOINASKI, 2010; MAIOLI, 2011; TADANO, 2012; ALVES, 2013).

Segundo Medeiros (2003, p.48), o processo de dispersão de poluentes na atmosfera depende principalmente do relevo da região, das condições meteorológicas, da topografia e das características das fontes emissoras.

Moreira, Tirabassi e Moraes (2004) ressaltam que a meteorologia tem um papel fundamental em relação à qualidade do ar, pois, na verdade, são os eventos

meteorológicos que controlam a dispersão de poluentes e a sua deposição no solo.

Eventos históricos de poluição, nas áreas urbanas industriais, a exemplo dos ocorridos em Londres, descrito por Logan (1956), tiveram, dentre os principais fatores, as condições meteorológicas.

Dos fatores meteorológicos, a velocidade e direção predominante dos ventos são fundamentais para o entendimento do deslocamento horizontal dos poluentes na atmosfera. A caracterização dos ventos fornece informações fundamentais sobre a dimensão da área de impacto dos poluentes.

Cooper e Alley (2011, p. 614) destacam que as variáveis meteorológicas e o conhecimento dos padrões de circulação em macro e microescala são os principais fatores no efetivo controle da poluição do ar e a rosa dos ventos mostra os padrões locais de dispersão dos particulados. Os autores também chamam atenção ao relevo como um dos importantes fatores que afeta a circulação à superfície.

Como mencionado, o relevo pode interferir no deslocamento da pluma influenciando na deposição desses poluentes. Essa interferência está relacionada à circulação da atmosfera à superfície, onde feições morfológicas podem atuar como barreiras orográficas.

Uma das dificuldades do estudo de particulados está justamente na delimitação da área de abrangência da pluma, já que o seu comportamento está condicionado a variáveis meteorológicas e específicas da superfície.

O deslocamento vertical e horizontal da pluma dificulta a obtenção de imagens, pois estas dependem do ponto de vista do observador e sempre oferecem uma visão parcial, conforme destaca Ribeiro (2009). Uma opção é o uso de técnicas do sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite.

O sensoriamento remoto permite o levantamento de diversas características da superfície baseada na resposta espectral dos objetos e são importantes ferramentas nos estudos ambientais (FLORENZANO, 2002).

Na década de 1970, Torsani e Viswanadham (1982) afirmaram que as técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas para o estudo de plumas de fumaça em fontes industriais e os resultados por eles encontrados já apontavam para a viabilidade do uso de imagens Landsat na detecção e monitoramento de plumas de grande extensão. Os avanços alcançados nas últimas décadas com a melhoria da resolução espacial e temporal ampliaram a possibilidade do estudo de plumas de menor extensão.

De maneira geral, imagens de satélite são bastante utilizadas na identificação de plumas de fumaça/

particulados, sobretudo em estudos de queimadas. No Brasil, trabalhos têm sido desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no Cerrado e na Amazônia (PEREIRA e SETZER, 1986; ALMEIDA-FILHO, 2003).

Devido à persistente dificuldade de obtenção de dados meteorológicos que atendam aos modelos de dispersão, as imagens de satélite podem ser um instrumento no estudo da dispersão de plumas de poluição atmosférica.

O artigo tem como objetivo delimitar e caracterizar o deslocamento da pluma de particulados emitida no distrito industrial de Pirapora-MG, a partir da análise estatística dos dados da extensão e direção dos ventos, de condicionantes geomorfológicas e do processamento digital imagens do satélite Landsat 5.

A produção do silício tem como principal impacto ambiental a emissão de poluentes atmosféricos emitidos pelos fornos de metalurgia. Segundo FEAM (2010, p. 14), de todas as emissões atmosféricas geradas em uma planta de fabricação de ferroligas e silício metálico, aquelas emitidas pelos fornos têm maior relevância. Sendo assim, é necessário instalar um sistema de controle para minimizar a quantidade de material particulado que é gerado e, nesse caso são utilizados equipamentos de despoejamento.

Apesar da necessária instalação dos filtros de

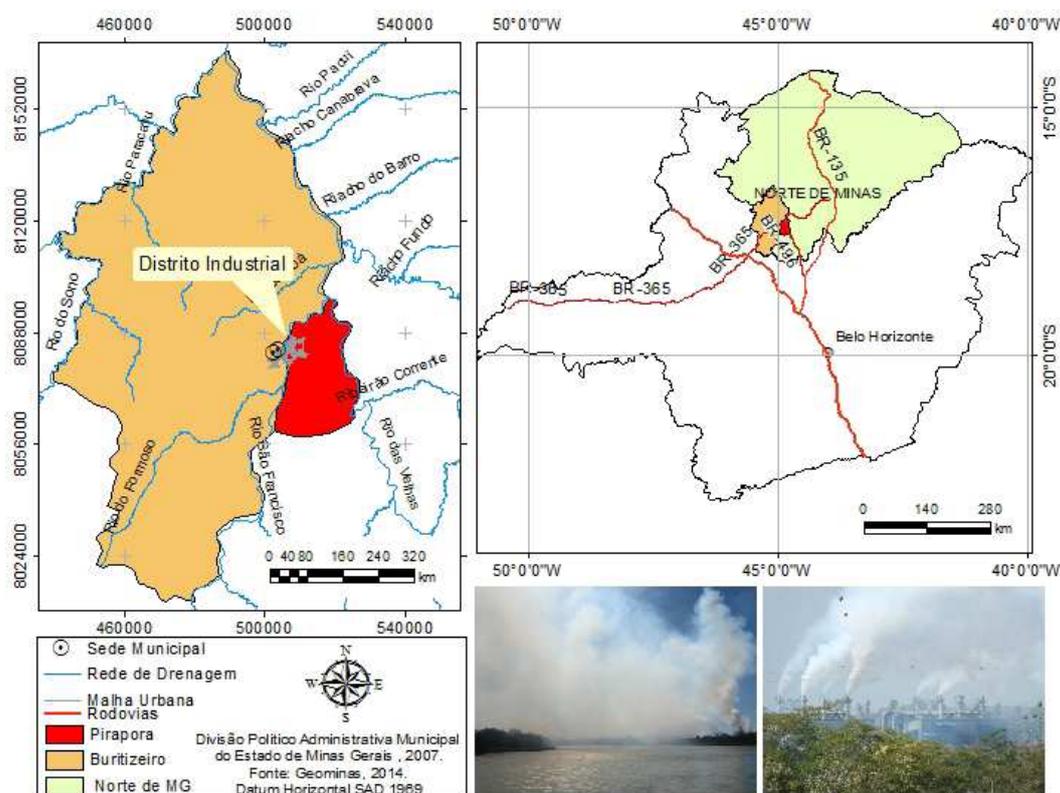
manga, esta não é uma realidade em muitas unidades de produção do Estado. Em Pirapora, dentre os 10 (dez) fornos, somente dois possuem o sistema instalado, como consequência, a emissão da área industrial pode ser visualizada na forma de uma densa pluma de particulados.

A elevada concentração do material particulado na atmosfera pode oferecer risco durante o transporte e, também, com a chegada desse material nos receptores. O conhecimento da área de circulação dos particulados é fundamental para a gestão ambiental e para os estudos de contaminação associada a este tipo de poluição. Além disso, o entendimento da trajetória da pluma é essencial para o direcionamento das ações de preservação da qualidade ambiental e controle da poluição atmosférica na escala local e regional.

### Área de estudo

A área de estudo (FIG.1) localiza-se na microrregião de Pirapora, no norte de Minas Gerais, entre os municípios de Buritizeiro e Pirapora. Essa região foi marcada por intensas transformações no uso e ocupação do solo a partir da década de 1960, período da implantação do distrito industrial da cidade, hoje polo de produção de ferro-silício e silício metálico do país.

FIGURA 1 - Localização da área de estudo no contexto regional e municipal. Em detalhe, fotos da pluma de particulados, visualizada a partir do Rio São Francisco a sul do distrito industrial (emissão pelas chaminés).



Em relação aos aspectos fisiográficos, a área de estudo encontra-se inserida na depressão Sanfranciscana com residuais do São Francisco, onde se destacam as superfícies tabulares e escarpas erosivas.

Neste trabalho é considerada a compartimentação em três unidades proposta por Baggio (2002): a Tabular (superfície de cimeira), Intermediária e a Depressão Interplanáltica (piso da depressão). O Piso da depressão que engloba a planície aluvial do Rio São Francisco e dos seus afluentes na cota média de 500m; a superfície intermediária inclui um relevo residual, às vezes em colinas policonvexas (700m); e a Superfície de Cimeira, nas cotas mais elevadas (900 m), é representada regionalmente pelo Chapadão dos Gerais, unidade tabular que se caracteriza por topo plano com suas bordas em escarpas erosivas. Os residuais marcam a transição entre as unidades locais, na cota de 600m entre o piso da depressão e a superfície intermediária, e a cota média de 800m refere-se à transição para os topos tabulares.

O clima é o tropical com duas estações bem definidas, segundo a classificação de Köppen, tipo Aw, tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso, caracterizado pela temperatura média, no mês mais frio, superior a 18°C (CPRM 2001).

Do ponto de vista hidrográfico, a área se insere no Alto/Médio curso da Bacia do Rio São Francisco. A área de estudo compreende um segmento do rio entre os municípios de Pirapora e Buritizeiro no qual a maioria das bacias drenam direto para o Rio São Francisco e delimitam-se pelos divisores internos: Chapadão dos Gerais e Serra do Jatobá em Buritizeiro e Serra do Repartimento em Pirapora.

A cobertura vegetal original é característica do domínio do Cerrado, com suas gradações fitofisionômicas, mas em função das alterações antrópicas, a vegetação encontra-se atualmente restrita às áreas de maior declividade, reservas legais ou Áreas de Preservação Permanente APPs.

## Dados e Metodologia

Neste estudo, trabalhou-se com informações de direção e velocidade dos ventos, imagens de satélite e dados SRTM.

Cenas do Landsat 5 foram utilizadas para identificar e mapear a pluma de particulados. Foram obtidas imagens do período de 1984 e 2011, somando 215 imagens, das quais 17, 20% apresentam nuvens ou algum ruído que impossibilitou a análise de direção e medida da extensão da pluma.

A composição colorida falsa cor RGB 413 foi a que apresentou melhor resultado na identificação da pluma. Segundo o INPE (2014), a banda 1 (0,45 - 0,52) apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial; a banda 3 (0,63 - 0,69) mostra bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação e foi utilizada para delimitar a mancha urbana e, por fim, a banda 4 (0,76 - 0,90), com sensibilidade à morfologia do terreno, permitiu a obtenção de informações sobre relevo, solos e geologia. Essas bandas atenderam ao objetivo do trabalho demonstrando boa visibilidade da pluma e rugosidade do terreno em contraste com as características da superfície.

O maior número de imagens corresponde aos últimos dez anos. Quanto à distribuição mensal, destacam-se os meses estação seca (principalmente julho), quando, em condições de céu claro, é possível a obtenção de imagens mais nítidas. Todas as imagens foram trabalhadas no software ArcGIS 10.1 utilizando a ferramenta "*composite bands*".

As unidades geomorfológicas foram caracterizadas com base em trabalhos prévios e levantamentos de campo. A identificação dessas unidades e das barreiras orográficas foi realizada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e perfis topográficos elaborados no Surfer 8.0 e ArcGIS 10.1, respectivamente. Para elaboração do MDE foram processados dados SRTM (86m) e geradas curvas de nível de 10 m visando obter uma melhor definição dos contornos.

O estudo de direção e velocidade do vento foi realizado a partir de dados das estações (TAB.1) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas em Pirapora (OMM 83483/OMM: 86759). Os dados supramencionados foram processados no software SGeM, de onde obteve-se uma modelagem geoestatística sobre padrões de transporte dos particulados e a área de influência (extensão) da pluma de poluentes. No SGeM foram realizadas rotinas baseadas em técnicas de Krigagem, simulação gaussiana.

TABELA 1- Estações meteorológicas na área de estudo

Estação (Código)	Início de Operação	Lat/Long	Altitude
Pirapora - MG (OMM: 83483)	23/12/1912	-17.349167°/- 44.921667°	505.24 metros
Pirapora - A545 (OMM: 86759)	04/07/2007	-17.258064°/- 44.835600°	505 metros

As Rosas dos ventos foram elaboradas a partir de dados mensais e horários utilizando Excel, e WRPLOT View 7.0. Os dados foram importados para o programa a partir de uma planilha do Excel (versão 97/2003), com a velocidade do vento em m/s, a direção em graus e a precipitação em mm. No programa foram gerados diagramas com a direção do vento e vetor do fluxo (36 vetores), e também, gráficos com a distribuição de frequência da velocidade em seis classes.

## Resultados e discussões

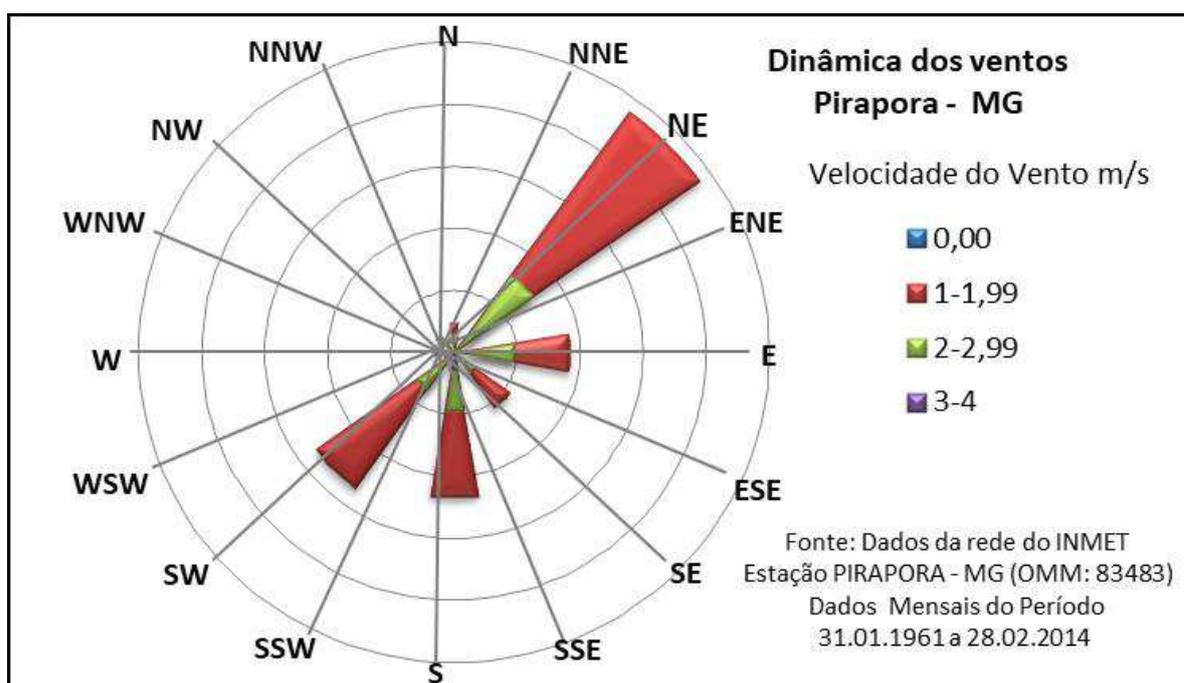
O vento é o mecanismo de transporte dos compostos na atmosfera, considerado meio de dispersão de poluentes na atmosfera, que dependendo da magnitude

da velocidade e direção, é um dos fatores meteorológicos determinante no estudo da poluição (BOUÇAS, 2009 p.21; ALVES, 2013 p. 32).

Os dados meteorológicos históricos de Pirapora demonstram a direção predominante de ventos de Nordeste (NE) em 31,70% dos dados. Ventos de Sul (S) e Sudoeste (SW) também são comuns, correspondendo, respectivamente a 14,31 e 7,98%.

A classe de velocidade (FIG. 2) predominante nos últimos 53 anos varia entre 1 - 1,99 m/s (70,14%), seguida pela classe entre 2- 2,99 m/s (26,99%). Essas duas classes de velocidades são comuns para os ventos com a direção predominante de NE. A relação entre a direção predominante dos ventos e as maiores velocidades indicam um maior potencial de dispersão dos poluentes.

FIGURA 2 - Rosa dos ventos. Observar a direção preferencial dos ventos de NE, SW e S. Rosa dos ventos obtida com os dados médios mensais, no período de 01 de Janeiro de 1961 e 28 de Fevereiro de 2014, da estação convencional de Pirapora.



Os dados meteorológicos analisados neste estudo, demonstram que o quadrante que apresenta menor risco ambiental é o Sudeste (SE), já que os ventos de Noroeste (NW) são os de menor frequência (3,27%), resultando numa baixa ocorrência de transporte de poluentes desta direção.

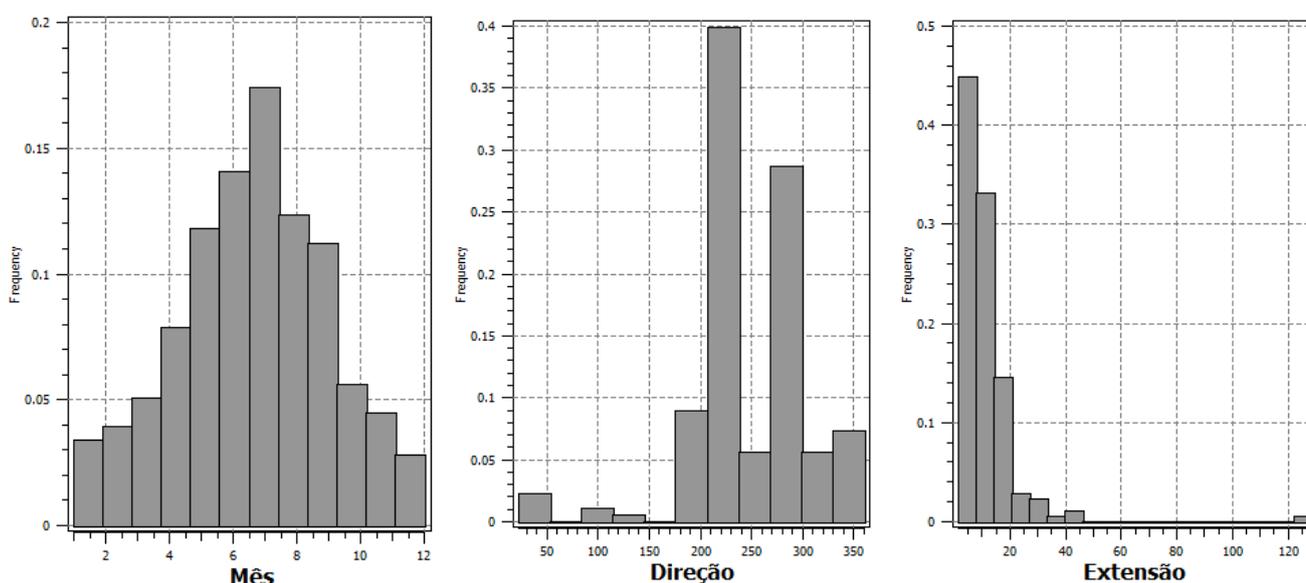
Guardadas as variações, a porção SW apresenta-se como a área de maior potencial de deposição e acúmulo do material particulado, isto se deve a maior frequência de ocorrência dos ventos de NE.

Em Pirapora, as imagens de satélite corroboram

com o estudo de direção dos ventos: o levantamento da direção da pluma mostra uma maior frequência com direção geral para oeste em mais de 80% das imagens analisadas, correspondendo ao quadrante NE.

Verificou-se que o deslocamento da pluma (FIG. 3) na série histórica foi de 39,9% para Sudoeste (SW); 28,7% para Oeste (W); 7,3 % para Norte (N), 5,6 % para Noroeste (NW) e Oeste-Sudoeste (WSW); 5,1% para Sul (S), 3,9% para Sul-Sudoeste (SSW) e os demais 3,9% se dividem entre Leste (E), Nordeste (NE), Norte-Nordeste (NNE) e Sudeste (SE).

FIGURA 3 - Distribuição de frequências mostrando as (1) imagens analisadas por mês, (2) a direção da pluma em graus e (3) a extensão da pluma em km. Análise estatística realizada no software The Stanford Geostatistical Modeling Software (SGeMS) disponível em <http://sgems.sourceforge.net/?q=node/77>.



A maior frequência observada no histograma de direção da pluma, demonstra que a pluma posiciona-se, predominantemente, entre 200 e 300 graus, que se refere, em sua maior parte, ao quadrante SW.

Quanto à distância alcançada, foi obtida uma média geral de 10,6 km, e para a pluma de maior densidade a média foi de 24,85 km. As plumas com extensão de 128,5 km na direção SW foram observados no ano de 2011, constituindo o máximo alcance da pluma no período analisado. O histograma de extensão ilustra o deslocamento da pluma, maior frequência até 20 km e ocorrências entre 20 e 45 km. Isolado a direita do mesmo gráfico tem-se a maior distância mapeada.

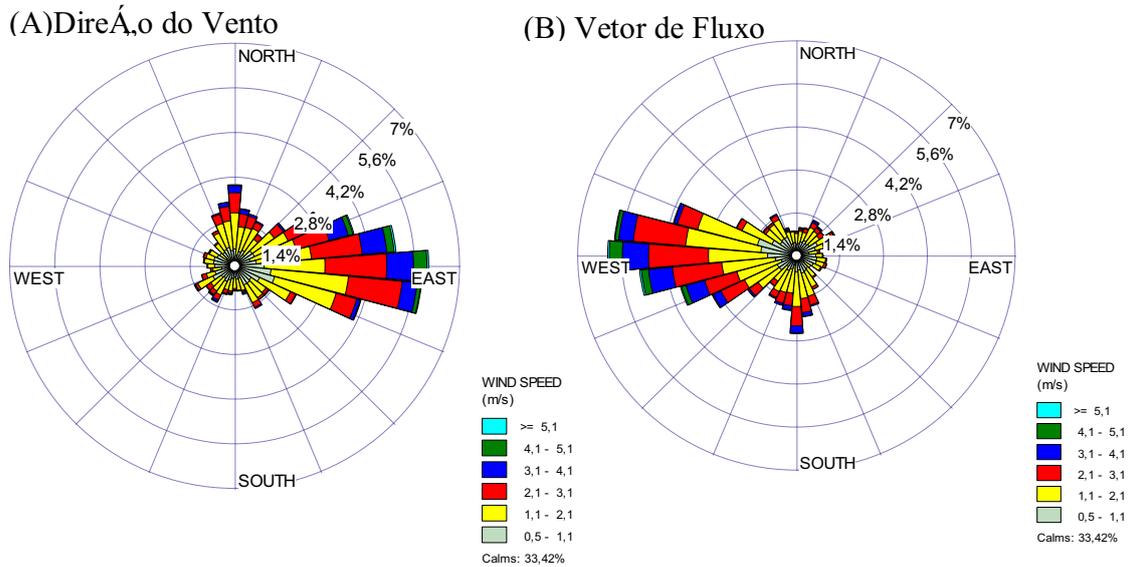
A distância percorrida pelos poluentes na atmosfera depende do tamanho das partículas transportadas, das características orográficas, da altura alcançada pela pluma, das condições de estabilidade da atmosfera e da direção e velocidade do vento.

O estudo histórico da direção dos ventos e o levantamento realizado a partir das imagens de satélite apontam dois pontos relevantes quanto ao deslocamento da pluma de particulados: (a) a maior distância alcançada em 2011 e o (b) controle pelo relevo.

### Caracterização anual dos ventos e movimentação em longa distância da pluma

O comportamento do vento em 2011 (FIG.4) foi caracterizado por meio da rosa dos ventos, elaborada no WRPLOT View 7.0 revelando um padrão bem definido dos ventos de Leste (E). As rosas dos ventos (FIG.4) mostram o comportamento médio da direção e intensidade do vento em 2011. A direção visualizada em (A) refere-se à sua origem, enquanto em (B) tem-se uma projeção do escoamento desse vento, neste caso com direção preferencial para o quadrante W.

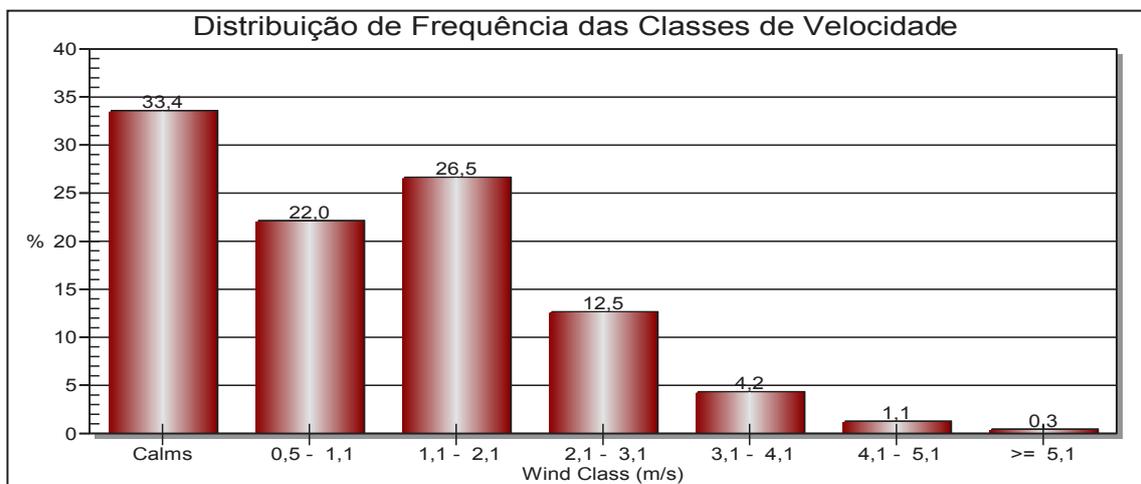
FIGURA 4 - Direção e velocidade do vento em 2011.



A média anual da velocidade do vento de 1,08m/s em 2011 condiciona uma menor dispersão e extensão da pluma levando assim, a uma maior densidade da pluma na zona de entorno à fonte. Além disso, verifica-se a alta frequência de calmaria, em 33,4% dos dados, corroborando com o menor potencial de dispersão e transporte dos poluentes pelos ventos.

A análise estatística mostra que a maior frequência (FIG.5) ocorre para as velocidades entre 1,1 e 2,1m/s em 26,5% das medições. Em sequência, tem-se a classe entre 0,5 e 1,1 (22 %) e 2,1 e 3,1 (12,5%).

FIGURA 5 - Velocidade do vento em 2011

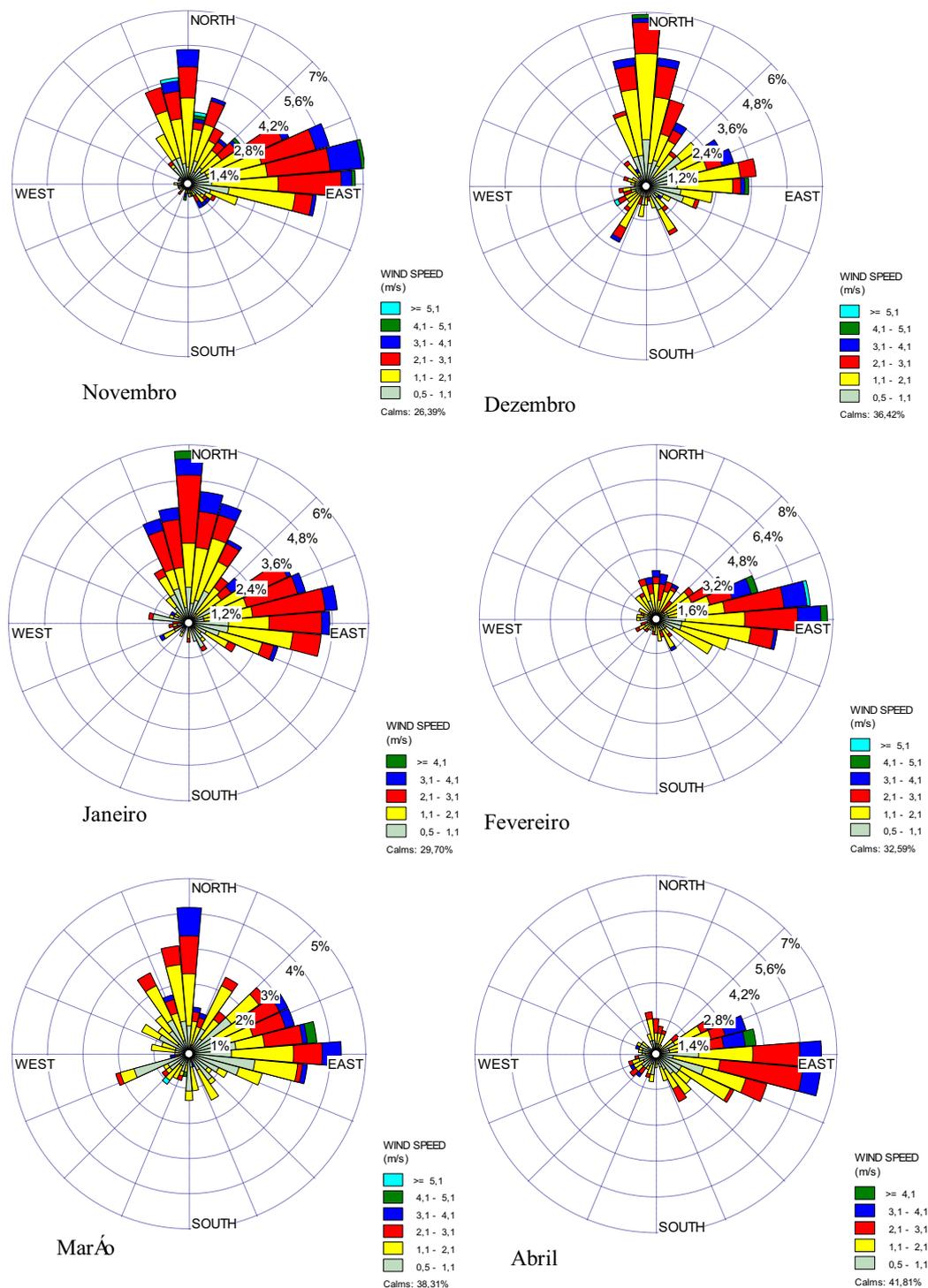


A predominância dos ventos de NE, indicados pela série histórica dos dados mensais, e os de E, obtidos com análise dos horários do ano de 2011, mostraram um padrão claro da direção dos ventos de E. Estes resultados explicam a maior ocorrência da movimentação da pluma na direção W.

Considerando a análise das imagens observa-se outros padrões de circulação que ajudam a entender a variação da movimentação da pluma ao longo do ano de 2011 (FIG. 6).

A direção variável do vento ao longo do ano implica em diferentes padrões de dispersão dos particulados atmosféricos e em áreas distintas de deposição. Entre os meses de novembro e abril os ventos fluem, principalmente, de leste e norte (FIG. 6) e direcionam o transporte para S e SW. Os ventos de N são mais expressivos nos meses de dezembro e janeiro, período no qual predomina em relação aos ventos de direção L.

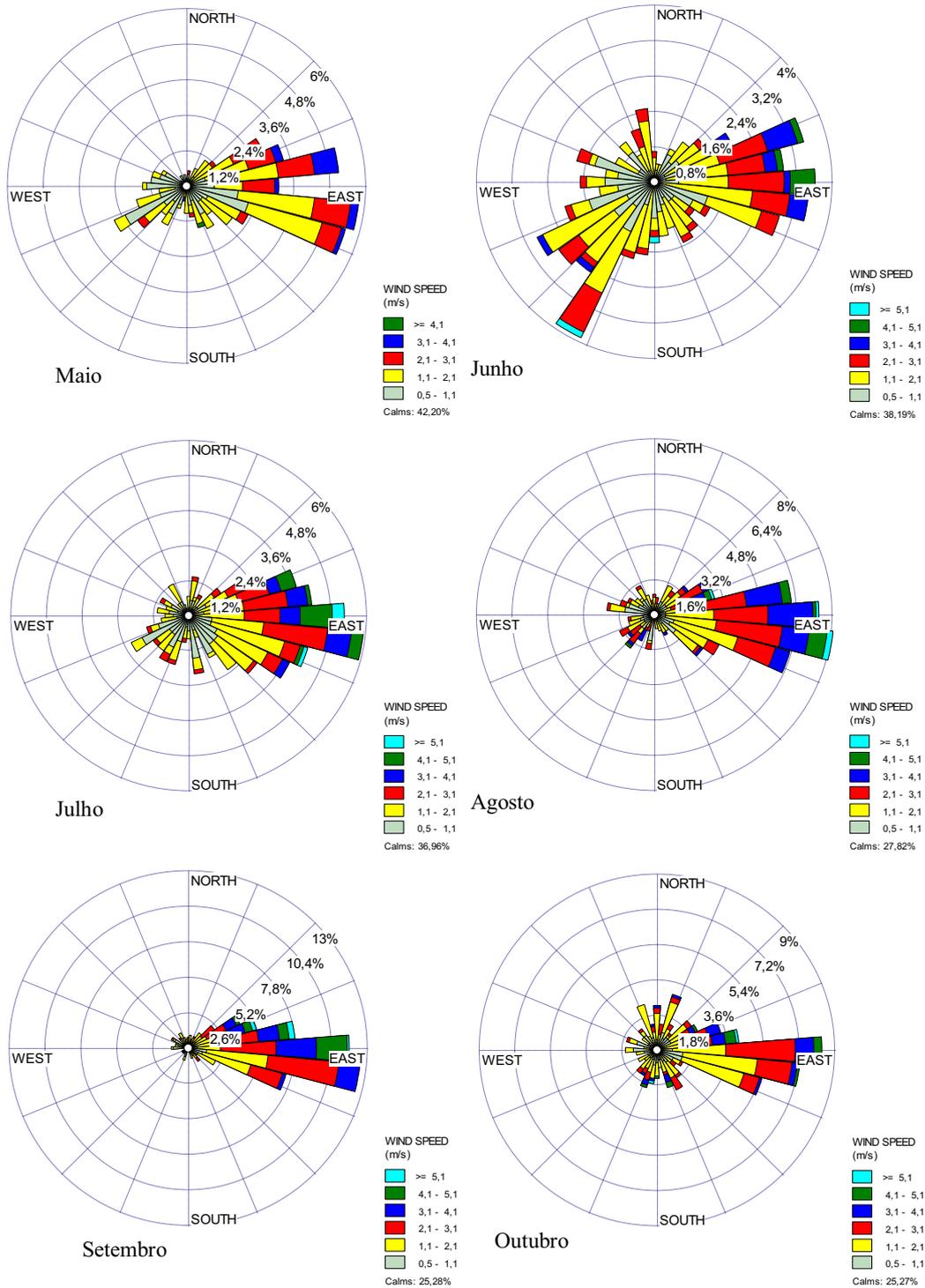
FIGURA 6 - Evolução da velocidade e direção dos ventos entre novembro e abril de 2011.



Apesar do risco potencial do quadrante sul devido o transporte de poluentes pelos ventos de norte, o período mencionado refere-se à estação úmida que concentra 83,34 % da precipitação anual. Assim, apesar do transporte de poluentes pela pluma nesta direção, o efeito de Limpeza da atmosfera que a precipitação tem sobre o material particulado (íntegram os núcleos de condensação ou são lavados pelas gotas de água) presente na atmosfera melhora a qualidade do ar nessa área durante a estação chuvosa.

No período entre maio e outubro (FIG. 7), predominam os ventos de leste, sendo este período de clima seco e frio, essa condição permite uma maior movimentação da pluma e deposição de material particulado na porção oeste da área de estudo.

FIGURA 7 - Velocidade e Direção dos ventos entre Maio e Outubro de 2011.

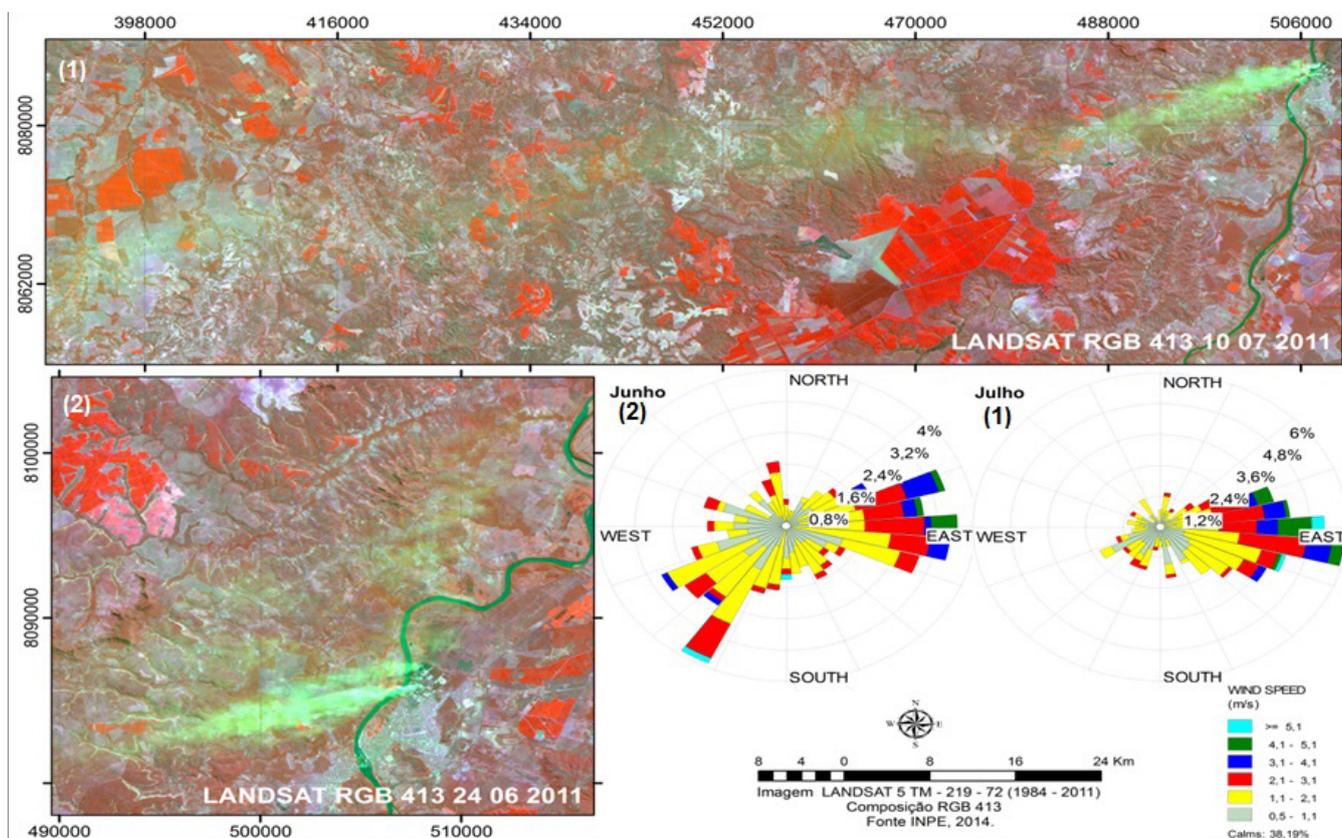


O padrão de escoamento da pluma para oeste, condicionado pelos ventos de leste entre julho e outubro, alerta para o risco potencial do quadrante oeste na área de estudo, especialmente durante a estação seca, quando se tem o maior acúmulo de poluentes na atmosfera e consequente transporte por maiores distâncias e aumento da área de deposição do material particulado.

No mês de julho, em que se constata uma alta porcentagem dos ventos de leste e maiores velocidades (>5,1 m/s), observou-se a maior distância alcançada (FIG. 8) pela pluma transportada dentro desta faixa de velocidade.

Assim, pode-se afirmar que a maior intensidade do vento possibilitou uma maior dispersão (transporte) dos poluentes expandindo a área de influência do distrito

FIGURA 8 - Direção do Vento e movimentação da pluma - cor verde claro na imagem. (1) Concentração dos ventos de leste e altas velocidades em julho (>5,1 m/s) condicionando o perfil da pluma maior que 100 km. (2) Vetor de ventos de sudoeste e dispersão secundária da pluma para norte.



industrial à escala regional (50 a 500 km segundo Vallero, 2008 p. 77) e, conseqüentemente, aumentando a área de impacto.

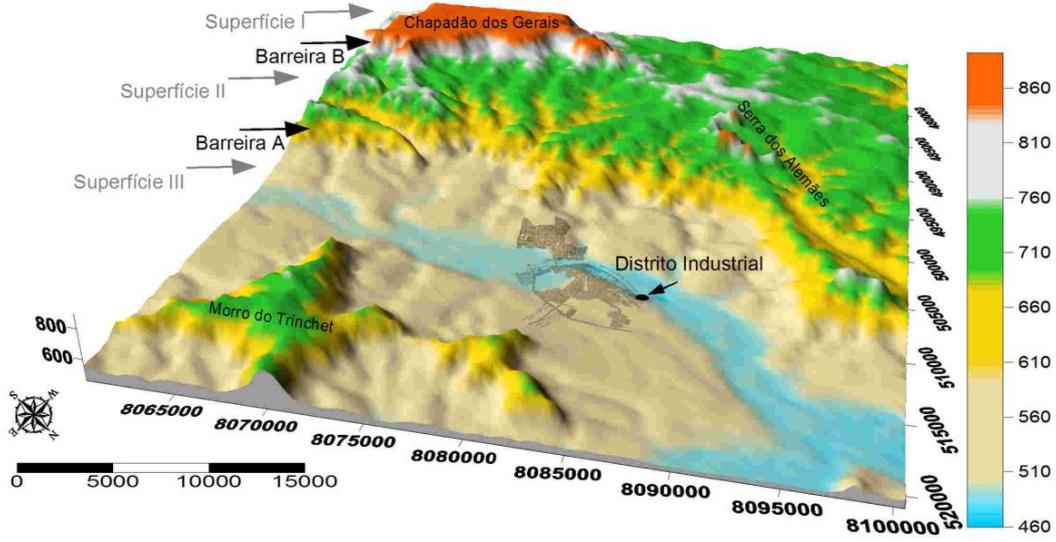
Os resultados para o mês de junho (FIG.8), mostram que existe uma mudança na direção da pluma relacionada com alteração na direção do vento. Essa variação é mostrada pelos ventos de sudoeste na rosa dos ventos que direcionam a dispersão da pluma para Norte.

Existe uma predominância do deslocamento da pluma para direção oeste e sudoeste controlados pelos ventos de Leste. Observa-se também algumas mudanças na direção de movimento da pluma com dispersão para norte e sul relacionadas a mudanças na direção dos ventos durante determinados períodos do ano.

Os resultados descritos apontam para necessidade de maior atenção ao quadrante sudoeste que, devido à maior frequência dos ventos de leste e à ocorrência deste no período seco, constitui-se na área mais crítica.

A direção predominante da pluma obtida a partir da análise das imagens de satélite mostra a relação direta com o comportamento do vento, conforme os dados históricos da estação convencional (médias mensais). A análise dos dados horários da estação automática, para o ano de 2011, confirma a influência da direção predominante do vento no comportamento da pluma, seja pela direção do vento quanto pela intensidade do mesmo.

FIGURA 9 - Modelo digital de Elevação. Feições geomorfológicas e barreiras orográficas (amarelo e cinza). Em laranja, a superfície tabular, em verde a superfície II (Intermediária) e em bege a área o piso da depressão (Superfície III). Em azul, planície de inundação do Rio São Francisco.



**Controle morfológico**

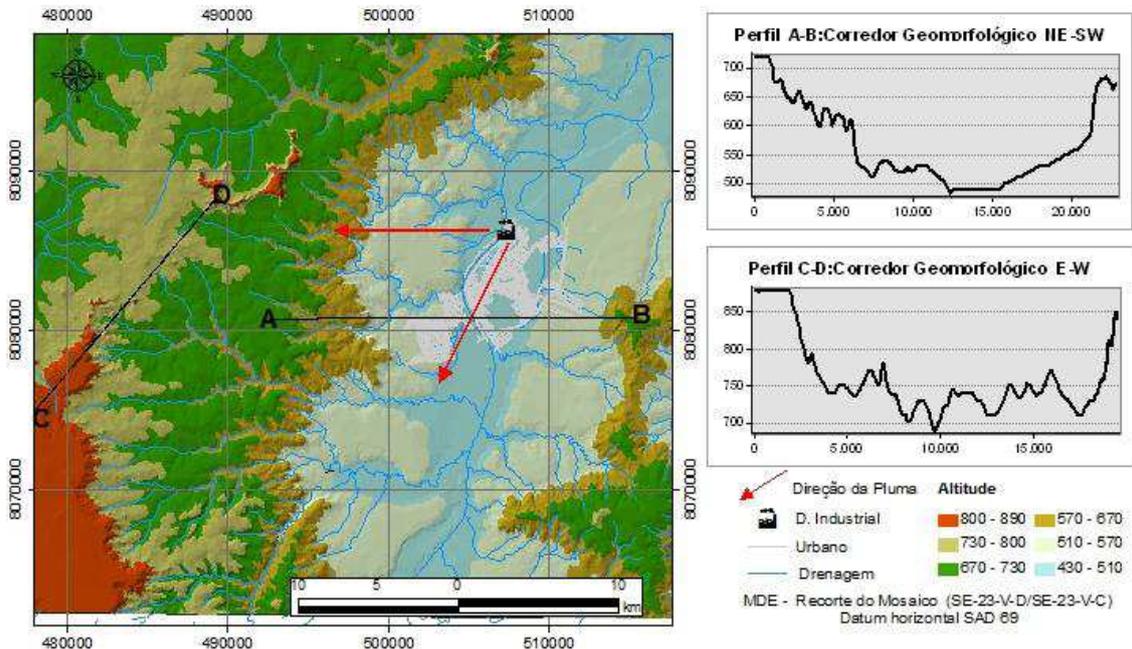
Do ponto de vista geomorfológico (FIG. 9), destacam-se as seguintes feições de relevo: os planaltos tabulares do Chapadão dos Gerais a oeste, Serra do Repartimento (Morro do Trinchet) a leste e o complexo do Jatobá (que inclui a Serra dos Alemães) a norte.

Essas feições se inserem nas três superfícies que caracterizam o relevo regional, a superfície de cimeira 900 m (I), intermediária 700m (II) e o piso da depressão 470m (III). A transição entre essas superfícies é marcada por dois patamares principais que funcionam como

barreiras naturais ao deslocamento dos particulados, denominadas neste trabalho de barreiras orográficas.

A primeira barreira orográfica (A) caracteriza-se por marcar um desnível de 230 metros entre o piso da Depressão do São Francisco (470 m) e a superfície intermediária (700m). A segunda barreira (B) compreende um desnível de 200 metros que define a transição da superfície intermediária para o patamar superior (Superfície I) composto pelos residuais e escarpas erosivas que bordejam as chapadas tabulares (900m). Assim, têm-se as barreiras A e B nas cotas médias de 600m e 800m de altitude (FIG.10), respectivamente.

FIGURA 10 -Perfis topográficos mostrando a área rebaixada onde a pluma circula, preferencialmente, condicionada pela topografia.



A partir das feições de relevo e do comportamento da pluma de particulados observado nas imagens foram identificados dois corredores geomorfológicos (FIG.10). O primeiro, de eixo preferencial NE-SW, onde ocorre o escoamento de 45,4% do fluxo com direção predominante para SW e SSW numa distância média de 10km. O segundo, de direção E-W, abrange uma área rebaixada (750m), localizada entre o limite norte do Chapadão dos Gerais (880m) e sul da Serra dos Alemães (870), onde as menores altitudes favoreceram o transporte dos particulados a oeste alcançando as distâncias máximas (FIG.11).

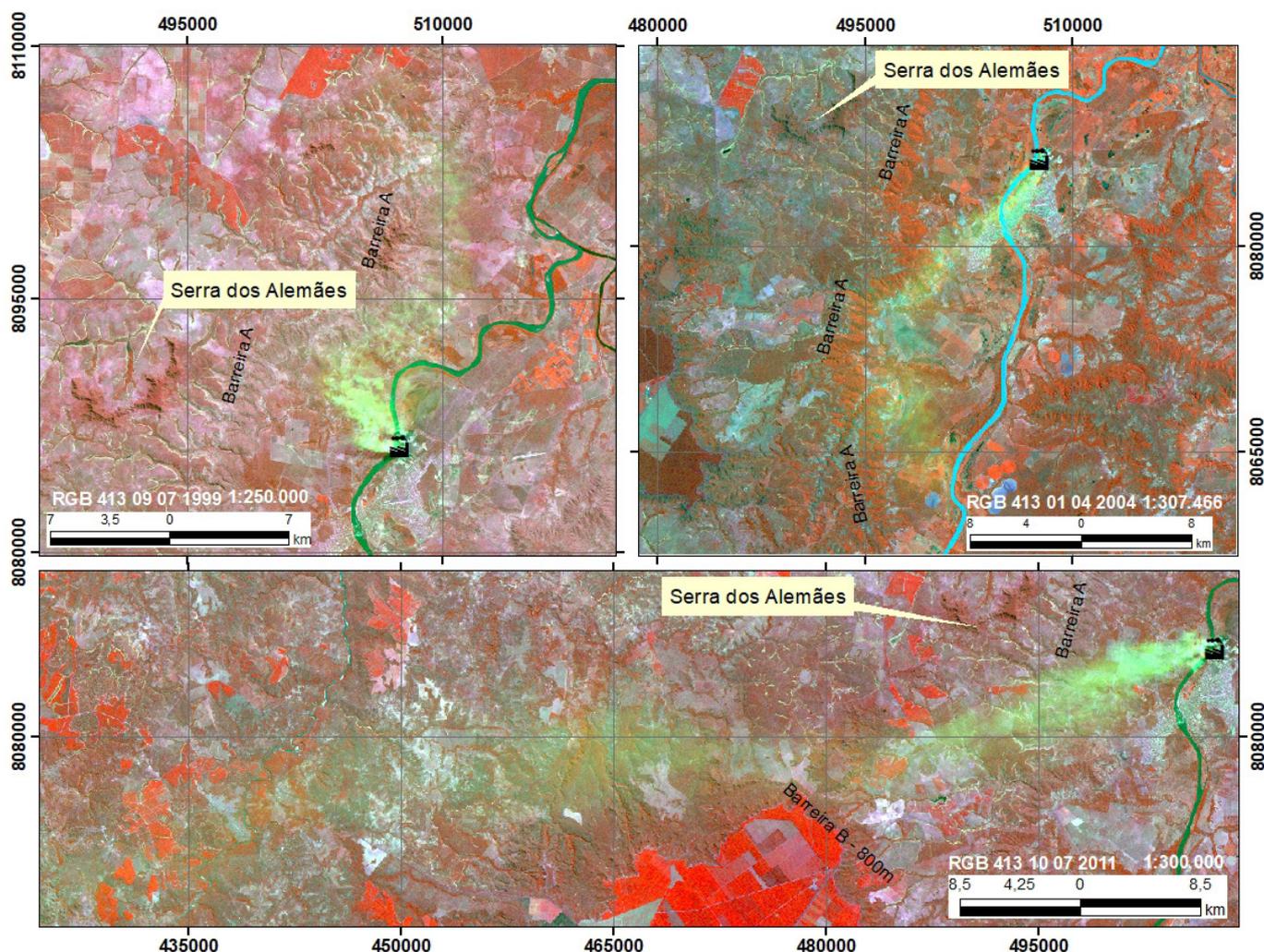
Ribeiro (2009, p. 25) aponta que a presença de elementos urbanos (edifícios e casas), assim como naturais (árvores e morros) ocasiona mudanças na direção e velocidade do vento, pois quando ele encontra um bloqueio, é desviado de seu fluxo normal tendendo a fluir pelas laterais e por cima da estrutura.

Para Cheremisinoff (2002, p. 295) o entendimento do comportamento de uma pluma, além das variáveis numéricas, depende das circunstâncias locais como rugosidade do terreno e variação dos efeitos orográficos e, por essa razão, o problema da determinação da ascensão de uma pluma é particularmente difícil.

Neste sentido, os compartimentos geomorfológicos locais atuam como barreiras naturais à circulação dos particulados mantendo a pluma principalmente na área de vale do baixo curso dos afluentes do Rio São Francisco, condicionada pela barreira A.

Em condições de ventos mais fortes, a pluma se desloca para oeste, seguindo pelo corredor E-W e condicionada pela barreira B.A grande distância percorrida pela pluma e sua direção indicam as áreas que podem apresentar riscos ambientais relacionados à deposição de particulados.

FIGURA 11 - Imagens de Satélite, composição colorida RGB413: distribuição da pluma de particulados e o condicionamento geomorfológico.



## Considerações finais

O histórico da direção seguida pela pluma observada nas imagens de satélites mostrou uma direção preferencial que ocorre sob dois condicionantes: (1) as barreiras orográficas associadas à (2) direção e velocidade do vento que caracterizam um sistema de transporte a oeste, podendo atingir uma distância superior a 100 km.

A distância média alcançada pelos particulados e o condicionamento pela barreira orográfica (A) indicam a área onde a deposição é mais constante e em maior quantidade, podendo levar a maiores impactos na qualidade ambiental na superfície III (470 - 600m).

Estudos detalhados das condições da atmosfera, padrões de circulação em macro e microescala, associados aos dados da fonte de emissão, volume e composição, poderão fornecer informações complementares sobre o comportamento da pluma de particulados.

O conhecimento da direção preferencial e da abrangência de deposição dos particulados atmosféricos fornecem informações que poderão ser utilizadas em estudos dos compartimentos ambientais afetados, influenciado, por exemplo, a escolha dos locais de amostragem e ações dos órgãos governamentais quanto ao monitoramento da qualidade do ar. Para a área deste estudo devem ser priorizadas ações no

quadrante sudoeste tendo em vista ser a área de maior recepção.

Os dados do transporte dos poluentes obtidos neste estudo apontam para a necessidade de uma atenção para as áreas urbanas de Pirapora e Buritizeiro na estação úmida em que os ventos de norte condicionam o transporte da pluma para Sul, onde se localizam os centros urbanos.

O quadrante leste, especialmente na sua porção sudeste, é o setor que sofre menor influência dos particulados, uma vez que os ventos de Noroeste e Oeste apresentam baixa frequência.

A escala regional (100km) alcançada pela pluma superou as perspectivas de alcance estimado de 10 km (observação visual dos pesquisadores e da população local) para emissão do distrito industrial de Pirapora.

Do ponto de vista da escala regional, verificou-se que a pluma de poluentes alcança distâncias superiores a 100 km da fonte de emissão. Esta distância é superior aos 10 km usualmente indicados pela população local e pesquisadores como extensão da pluma de poluentes.

O estudo do comportamento do vento, das unidades geomorfológicas e a análise das imagens de satélite mostraram-se ferramentas eficientes na avaliação do transporte de plumas de poluição e em conjunto podem ser utilizados no monitoramento de ambientes diretamente afetados.

## Referências

- ALBUQUERQUE. *Formação e transporte das partículas finas inorgânicas em uma atmosfera urbana: o exemplo de São Paulo*. 2010. 210 f. Dissertação (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ALMEIDA-FILHO, R. Um sistema brasileiro de sensoriamento remoto orbital dedicado à questão das queimadas? *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 de Abril INPE, 2003: 2409-2414.
- ALVES, S. F. *Utilização do modelo de dispersão ARTM associado a recursos de geoprocessamento para simulação do impacto ambiental radiológico e emissões atmosféricas de um reator de pesquisa*. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- BAGGIO, H. F. *Alterações na Paisagem Natural e Agrícola do município de Buritizeiro - MG: Implicações do Plantio Generalizado de Pinus e Eucalipto no Meio Físico, Biológico e Sócio-econômico*. Belo Horizonte - MG. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- BOUÇAS, J. G. *Aplicação de técnicas nucleares nos estudos de avaliação da poluição do ar da região metropolitana de Belo Horizonte*. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – Belo Horizonte, 2009.
- CHEREMISINOFF, N. P. *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002.
- COOPER, C. D., F. C. ALLEY. *Air pollution control: a design approach*. 4 ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Análise de Consistência de dados*. Belo Horizonte: CPRM, 2001.
- DE NEVERS, N. *Air pollution control engineering*. 2 ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- FEAM. *Levantamento da situação ambiental e energética do setor de prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade: relatório de requisitos legais / Gerência de Desenvolvimento e Apoio técnico às Atividades Industriais*. FEAM DPED - GEDIN - RT 07/2010. Belo Horizonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente, 2010.
- FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélites para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- HOINASKI, L. *Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (PM10)*. 2010. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Os satélites LANDSAT 5 e 7*. Disponível em: [http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57\\_PT.php](http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php). Acesso em: 22 de janeiro de 2014.
- LOGAN, W. P. D. Mortality from Fog in London. *British Medical Journal*, 1956: Mar 31; 1(4969): 722-5. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1979260/>. Acesso em: 02 de Agosto de 2014.
- MAIOLI, B. G. *Quantificação e caracterização do Material Particulado fino (MP2,5) na região metropolitana da grande Vitória-ES*. 2011: 118f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2011.
- MEDEIROS, A. M. *Bases metodológicas para a incorporação da variável ambiental no planejamento da expansão termelétrica no Brasil*. 126f. 2003. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)- Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- MOREIRA, D. M., T. TIRABASSI, e M. R. MORAES. *Meteorologia e Poluição da Atmosfera*. 2004: Ambiente & Sociedade – Vol. VII nº. 2 jul./dez. p. 1-13.
- MOREIRA, D., T. TIRABASSI. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a Gestão Ambiental. *Ambiente & Sociedade* – Vol. VII nº. 2 jul./dez. 2004, 2004: p. 159 -172.
- PEREIRA, M. C., A. W. SETZER. Detecção de queimadas e plumas de fumaça na Amazônia através de imagens de

satélites NOAA. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4.* (SBSR), 1986, Gramado. Resumos. São José dos Campos: INPE, Jun, 1986, 51p., v. 1, p. 206. Printed, On-line. ISBN 978-85-17-00048-5. Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/34Q3DC5>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

RIBEIRO L., L. A. A. *Procedimento de Determinação dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica do Modelo Gaussiano através de Análise Fotográfica de Plumas de Fumaça*. Rio de Janeiro: Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2009. Orientador: Prof. Sérgio Gavazza - Ph.D. 116 f., 2009.

STERN, A. C. *Air Pollution: Supplement to air pollutants, their transformation, transport, and effects*. v.6. 3 ed. Orlando: Academic Press, 1986.

TADANO, Y. S. *Simulação da Dispersão dos Poluentes Atmosféricos para Aplicação em Análise de Impacto*. Campinas: Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, 2012.

TORSANI, J. A., e Y. VISWANADHAM. Estudo da difusão atmosférica usando imagens do satélite Landsat. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2.* (SBSR), 1982, Brasília. Anais. São José dos Campos: INPE, 1982. p. 647-656. Impresso, On-line. ISBN 978-85-17-00046-1. (INPE-7772-PRE/3613). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/0>>, 1982.

VALLERO, D. A. *Fundamentals of air pollution*. 4 ed. Sam Diego: Academic Press, 2007.

Data de recebimento: Novembro/2014

Data de publicação: Junho/2020